UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"DISPOSITIVO IOT PARA EL MONITOREO DE VARIABLES CLIMÁTICAS RELACIONADAS CON LA APARICIÓN DE BOTRYTIS CINEREA EN CULTIVOS DE PIMIENTO"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Bryan Patricio Sarabia Vilañez

DIRECTOR:

MsC. Jaime Roberto Michilena Calderón

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓNA FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	SARABIA VILAÑEZ BRYAN PATRICIO

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"DISPOSITIVO IOT PARA EL MONITOREO DE VARIABLES CLIMÁTICAS RELACIONADAS CON LA APARICIÓN DE BOTRYTIS CINEREA EN CULTIVOS DE PIMIENTO"
AUTOR (ES):	SARABIA VILAÑEZ BRYAN PATRICIO
FECHA: DD/MM/AAAA	28/08/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR /ASESOR:	ING. JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERÓN, MSC ING. SUÁREZ ZAMBRANO LUIS EDILBERTO, MSC

1. CONSTANCIAS

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

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

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
BRYAN PATRICIO SARABIA VILANEZ

Bryan Patricio Sarabia Vilañez

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIUERIA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 28 de agosto de 2026

ING. MICHILENA CALDERÓN JAIME ROBERTO, MSC

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JAIME ROBERTO
MICHILENA CALDERON

f) ……

Ing. Michilena Calderón Jaime Roberto, Msc
C.C.: 1002198438

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios, por darme la vida, la sabiduría y la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo a lo largo de este camino. Por ser mi guía espiritual y permitirme alcanzar la meta de convertirme en un profesional.

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y por inculcarme los valores que me han forjado como persona. Este triunfo es el reflejo de todo su esfuerzo y es tan suyo como mío.

A mis hermanos, por su compañía constante, sus consejos y por ser siempre una fuente de motivación y apoyo incondicional. Gracias por creer en mí y por animarme a no rendirme nunca.

A mis amigos y compañeros de ruta, aquellos que se convirtieron en mi segunda familia durante estos años universitarios. Gracias por las largas jornadas de estudio, los momentos compartidos y por aligerar la carga en los momentos más difíciles.

A todas las personas que, con una palabra de aliento o un gesto de confianza, formaron parte de este importante logro en mi vida.

Bryan Patricio Sarabia Vilañez

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica del Norte, mi alma máter, por abrirme sus puertas y brindarme un espacio de excelencia para formarme como profesional. A todos los docentes que compartieron sus conocimientos, experiencia y calidad humana a lo largo de mi carrera universitaria.

Un profundo agradecimiento a mi director Ing. Jaime Michilena por su paciencia, orientación y valiosos consejos técnicos. Su guía metodológica y su rigor académico fueron fundamentales para estructurar y llevar a buen término este proyecto de investigación.

De igual manera, expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor Ing. Luis Suárez, por su invaluable apoyo técnico, sus acertadas recomendaciones y el tiempo dedicado a revisar y perfeccionar el desarrollo de este sistema. Su experiencia y visión práctica fueron piezas clave para alcanzar los objetivos propuestos y superar los retos técnicos del proyecto.

A mis amigos y compañeros de aulas, con quienes compartí largas jornadas de estudio, prácticas de laboratorio y proyectos; gracias por el compañerismo y los momentos que hicieron de esta etapa una experiencia inolvidable.

Bryan Patricio Sarabia Vilañez

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal el diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo IoT para el monitoreo de variables climáticas asociadas a la aparición de *Botrytis cinerea* en cultivos de pimiento a campo abierto, ubicado en la Comunidad de Santa Rosa, Cantón San Miguel de Urcuquí, provincia de Imbabura.

El sistema se estructuró bajo una topología en estrella compuesta por dos nodos sensores autónomos basados en placas Heltec WiFi LoRa 32 V3 (ESP32) y un gateway coordinador formado por una Heltec V3 en modo receptor conectada vía USB a una Raspberry Pi 4. Los nodos sensores adquieren temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, operando en modo Deep Sleep con ciclos de transmisión cada 15 minutos mediante LoRa en la frecuencia de 915 MHz, conforme al Plan AU915 regulado por la ARCOTEL. En el gateway se realiza el procesamiento perimetral mediante Node-RED, donde se calcula el punto de rocío utilizando la ecuación de Magnus-Tetens, se almacenan los datos en una base de datos relacional MariaDB y se generan alertas automatizadas a través de la API de Telegram cuando se detectan condiciones favorables para el desarrollo del patógeno.

La metodología de desarrollo siguió el modelo de ciclo de vida clásico en Cascada. Se realizaron las fases de análisis de requisitos, diseño de la arquitectura, implementación del hardware y software, y pruebas tanto en laboratorio como en campo. Las pruebas de desempeño evaluaron el alcance de la comunicación LoRa, la autonomía energética de los nodos, la precisión de los sensores, el correcto funcionamiento de los flujos en Node-RED y la efectividad del sistema de alertas.

Los resultados obtenidos demostraron que el sistema opera de manera estable y confiable bajo condiciones reales de cultivo. El alcance LoRa resultó adecuado para parcelas de tamaño mediano, la autonomía energética permitió un funcionamiento continuo con apoyo solar, y el procesamiento perimetral generó alertas oportunas que facilitan una gestión

preventiva de la enfermedad. De esta manera, el dispositivo IoT desarrollado representa una herramienta útil para los productores de pimiento, al permitir la detección temprana de condiciones de riesgo y contribuir a reducir la dependencia de aplicaciones reactivas de fungicidas.

El proyecto se alinea con los principios de agricultura de precisión y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 12 relacionado con la producción y consumo responsables. Los resultados confirman la viabilidad técnica y económica de la solución propuesta para entornos rurales con limitaciones de infraestructura.

Palabras clave:

Internet de las Cosas, *Botrytis cinérea*, pimiento, LoRa, monitoreo climático, agricultura de precisión, Node-RED, punto de rocío.

ABSTRACT

The main objective of this thesis was the design, development, and implementation of an IoT device for monitoring climatic variables associated with the appearance of Botrytis cinerea in open-field pepper crops located in the Santa Rosa Community, San Miguel de Urcuquí Canton, Imbabura Province.

The system was structured in a star topology composed of two autonomous sensor nodes based on Heltec WiFi LoRa 32 V3 (ESP32) boards and a coordinating gateway consisting of a Heltec V3 in receiver mode connected via USB to a Raspberry Pi 4. The sensor nodes acquire temperature, relative humidity, and soil moisture, operating in Deep Sleep mode with transmission cycles every 15 minutes using LoRa at a frequency of 915 MHz, in accordance with the AU915 Plan regulated by ARCOTEL. At the gateway, perimeter processing is performed using Node-RED, where the dew point is calculated using the Magnus-Tetens equation. Data is stored in a MariaDB relational database, and automated alerts are generated via the Telegram API when conditions favorable for pathogen development are detected.

The development methodology followed the classic Waterfall lifecycle model. The phases included requirements analysis, architecture design, hardware and software implementation, and both laboratory and field testing. Performance tests evaluated the LoRa communication range, the nodes' energy autonomy, sensor accuracy, the proper functioning of the Node-RED flows, and the effectiveness of the alert system.

The results demonstrated that the system operates stably and reliably under real-world cultivation conditions. The LoRa range proved adequate for medium-sized plots, the energy autonomy allowed for continuous operation with solar support, and the perimeter processing generated timely alerts that facilitate proactive disease management. In this way, the developed IoT device represents a useful tool for pepper growers, enabling the early detection of risk conditions and helping to reduce reliance on reactive fungicide applications.

The project aligns with the principles of precision agriculture and the Sustainable Development Goals, particularly SDG 12 related to responsible production and consumption. The results confirm the technical and economic viability of the proposed solution for rural environments with infrastructure limitations.

Keywords:

Internet of Things, Botrytis cinerea, pepper, LoRa, climate monitoring, precision agriculture, Node-RED, dew point.

LISTA DE CONTENIDOS

Capítulo I: Antecedentes 1

1.1 Tema 1

1.2 Problema 1

1.3 Objetivos 4

1.3.1 Objetivo General 4

1.3.2 Objetivos Específicos 4

1.4 Alcance 4

1.5 Justificación 7

Capítulo II: Estado del Arte 10

2.1 El cultivo de pimiento en el contexto ecuatoriano 10

2.1.1 Importancia económica del pimiento (Capsicum annuum) 11

2.1.2. Principales zonas de cultivo en Ecuador 12

2.1.3. Condiciones agroclimáticas óptimas para el cultivo. 12

2.1.4. Problemáticas agrícolas asociadas al pimiento. 14

2.1.5. Sistemas de riego utilizados y su influencia en enfermedades 14

2.2 Botrytis cinérea: El agente patógeno 15

2.2.1. Características morfológicas y biológicas del hongo 16

2.2.2 Ciclo de vida y mecanismos de infección 17

2.2.3. Condiciones climáticas que favorecen su proliferación 19

2.2.4 Síntomas y diagnóstico en pimiento 19

2.2.5. Impacto económico y productivo de la enfermedad 21

2.2.6 Métodos tradicionales de control: químicos, biológicos y culturales 21

2.2.7. Riesgos asociados al uso prolongado de fungicidas 22

2.3. Variables climáticas asociadas a Botrytis cinérea 22

2.3.1. Humedad relativa y su efecto en la germinación de esporas 23

2.3.2. Temperatura crítica para la proliferación del hongo 24

2.3.3. Punto de rocío y formación de microambientes favorables.....25

2.3.4. Influencia de la humedad del suelo en el desarrollo del patógeno 26

2.3.5. Otros factores relevantes: viento, radiación solar, pH (opcional).....27

2.4. Agricultura de precisión y tecnologías emergentes 27

2.4.1 Evolución de la agricultura hacia sistemas inteligentes.....28

2.4.2 Fundamentos de la agricultura 4.0 29

2.4.3 Rol de las TIC en la mejora de la producción agrícola.....31

2.4.4 Ventajas de la agricultura basada en datos 32

2.4.5 Limitaciones en el contexto rural ecuatoriano 33

2.5 Internet de las Cosas (IoT) aplicado a la agricultura 34

2.5.1 Concepto general de IoT 34

2.5.2 Componentes de un sistema IoT agrícola 36

2.5.3 Protocolos de comunicación en IoT: Wi-Fi, ZigBee, LoRa, NB-IoT 39

2.6 Sensores ambientales en sistemas IoT agrícolas.....43

2.6.1 Sensor de temperatura (DHT22, DS18B20, etc.) 44

2.6.2 Sensor de humedad relativa 45

2.6.3 Sensor de humedad del suelo 45
2.6.4 Sensor de radiación solar / luz UV 46
2.6.5 Sensor de punto de rocío (cálculo a partir de T y HR) 46
2.6.6 Consideraciones de calibración y precisión 47
2.6.7 Criterios para la selección de sensores adecuados 47
2.7. Entornos de Desarrollo y Programación IoT 48
2.7.1. Plataformas de Desarrollo y Orquestación 48
2.7.2. Lenguajes de Programación en Arquitecturas IoT 49
2.8. Procesamiento Perimetral y Almacenamiento de Datos 49
2.8.1. Algoritmos y Técnicas de Procesamiento en el Borde 50
2.8.2. Sistemas Gestores de Bases de Datos (SGBD) Relacionales 50
2.9. Capa de Aplicación y Visualización 50
2.9.1. Visualización y Paneles de Control (Dashboards IoT) 51
3.1. Metodología de Desarrollo 52
3.1.1. Modelo de ciclo de vida aplicado al desarrollo IoT 52
3.1.2. Fases de la metodología aplicada 53
3.2. Análisis de la Situación Actual 55
3.2.1. Caracterización de la zona de estudio 55
3.2.2. Identificación de la problemática fitosanitaria 57
3.2.3. Técnicas de recolección de información 57
3.2.4. Análisis de resultados: Carencias tecnológicas 57

3.2.5. Definición de variables críticas a monitorear 59

3.3. Definición y Análisis de Requerimientos 60

3.3.1. Identificación de Beneficiarios y Actores (Stakeholders).....60

3.3.2. Requerimientos Operativos (Autonomía y condiciones de campo) 61

3.3.3. Requerimientos Funcionales (Adquisición, Transmisión LoRa, Almacenamiento Local).....62

3.3.4. Requerimientos No Funcionales (Precisión, Energía, Costo).....63

3.4. Selección Técnica de Hardware y Software 64

3.4.1. Matriz de selección del Microcontrolador y Módulo de Radio (ESP32 LoRa vs. Alternativas) 64

3.4.2. Criterios de selección para sensores climáticos (DHT22 y Capacitivo)....66

3.4.3. Selección del Servidor Local (Raspberry Pi 4) y Gestor de Base de Datos 67

3.4.4. Selección de herramientas de desarrollo (Arduino IDE, Node-RED).....69

3.5. Diseño de la Arquitectura del Sistema 70

3.5.1. Arquitectura General IoT y Topología de Red en Estrella.....71

3.5.2. Diseño de la Capa de Percepción: Nodos Sensores Autónomos.....73

3.5.3. Diseño de la Capa de Comunicación: Protocolo LoRaWAN (915 MHz)..73

3.5.4. Diseño de la Capa de Aplicación: Servidor Local y Dashboard de Monitoreo 75

3.6. Diseño Electrónico y Energético.....76

3.6.1. Dimensionamiento del sistema de energía: Panel Solar y Batería Li-Ion..77

3.6.2. Esquema de conexión electrónico del Nodo Sensor (Diagrama esquemático) 80

3.6.3. Esquema de conexión e interfaz del Nodo Coordinador (Gateway)..... 83

3.6.4 Calibración y lectura de datos mediante sensores..... 84

3.6.5. Diseño de PCB y encapsulamiento con protección IP65..... 87

3.7. Diseño de Software y Lógica de Control..... 89

3.7.1. Diagrama de flujo del firmware del Nodo Sensor (Modos de bajo consumo) 90

3.7.2. Lógica del algoritmo de detección de riesgo de *Botrytis cinérea*..... 92

3.7.3. Diseño del Modelo Entidad-Relación de la Base de Datos Local..... 93

3.7.4. Diseño de la Interfaz de Usuario (Dashboard) y visualización de datos ... 94

3.7.5. Configuración del sistema de alertas locales y notificaciones..... 95

Capitulo IV: Pruebas de funcionamiento..... 97

4.1. Introducción al Capítulo 97

4.2. Pruebas de Configuración y Funcionamiento del Hardware 97

4.2.1. Pruebas de conectividad de los nodos sensores 98

4.2.2. Pruebas de integración del Gateway 99

Fuente: Autoría 100

4.3. Pruebas de Funcionamiento del Software (Procesamiento y Edge) 100

4.3.1. Pruebas del flujo en Node-RED..... 100

4.3.2. Pruebas de almacenamiento en MariaDB 102

4.4. Pruebas de Funcionamiento de la Capa de Aplicación 103

4.4.1. Validación del Dashboard Web 104

4.4.2. Pruebas de notificación vía Telegram 105

4.5. Pruebas de Desempeño en Campo (Validación de Resultados) 106

4.5.1. Evaluación del alcance de comunicación LoRa 107

4.5.2. Evaluación de la autonomía energética 115

4.5.3 Evaluación de las variables micro climáticas 120

4.6. Análisis Comparativo con los Requerimientos 137

4.7. Análisis de Costos y Presupuesto 140

4.7.1. Costos de componentes electrónicos y materiales (Hardware) 140

4.7.2 Costos de Infraestructura 141

4.7.3. Estimación de costos de ingeniería y desarrollo 141

4.7.4 Costos de Software 142

4.7.5. Costo total del prototipo funcional 142

4.8 Beneficios del Sistema 143

Conclusiones y Recomendaciones 144

Bibliografia. 147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Árbol de problemas* 3

Figura 2 *Arquitectura del dispositivo IoT para el analisis de variables climáticas* 6

Figura 3 *Ciclo biológico de Botrytis cinérea y puntos de infección en solanáceas* 18

Figura 4 *Manifestación clínica de Botrytis cinérea en fruto de Capsicum annuum, mostrando el característico moho gris y la degradación del tejido.* 20

Figura 5 *Ciclo de vida de la agricultura de precisión aplicado al control de cultivos*. 30

Figura 6 *Modelo de referencia de arquitectura IoT dividido en capas funcionales* 36

Figura 7 *Análisis comparativo de prestaciones técnicas: LoRaWAN frente a estándares tradicionales (Wi-Fi y ZigBee).* 41

Figura 8 *Fases del Modelo en Cascada aplicado al desarrollo del sistema IoT.* 53

Figura 9 *Lugar de instalación del dispositivo IoT* 56

Figura 10 *ESP32 LoRa* 65

Figura 11 *Sensor DHT22* 67

Figura 12 *Raspberry Pi4* 68

Figura 13 *IDE Arduino* 70

Figura 14 *Diagrama arquitectónico del sistema IoT y topología de red en estrella* .. 72

Figura 15 *Diseño de la trama de comunicación* 74

Figura 16 *Verificación de la frecuencia LoRa V3* 75

Figura 17 *Diagrama de la Capa de Aplicación.* 76

Figura 18 *Esquema de conexión del Nodo Sensor* 81

Figura 19 *Esquema de conexión del Nodo Coordinador y servidor local.* 84

Figura 20 *Esquema de conexión digital del sensor ambiental DHT22 al microcontrolador ESP32 (Heltec V3).* 86

Figura 21 *Esquema de conexión analógica del sensor capacitivo de humedad de suelo al microcontrolador ESP32 (Heltec V3).* 87

Figura 22 *Diseño de la PCB* 88

Figura 23 *Protección IP65* 89

Figura 24 *Diagrama de flujo del firmware del Nodo Sensor* 91

Figura 25 *Lógica del algoritmo* 93

Figura 26 *Modelo Entidad-Relación de la base de datos local.* 94

Figura 27 *Verificación de conectividad de los nodos sensores* 98

Figura 28 *Verificación de la recepción de datos en el Gateway* 100

Figura 29 *Verificación del envió de flujos en Node-Red* 102

Figura 30 *Comprobación de integridad transaccional y persistencia de registros históricos en el gestor relacional MariaDB* 103

Figura 31 *Visualización del Dashboard en tiempo real* 105

Figura 32 *Comprobación del despacho de alertas fitosanitarias automatizadas mediante la API de Telegram ante la superación de umbrales críticos.* 106

Figura 33 *Potencia de señal RSSI (dBm) Nodo 1 durante 24 horas* 109

Figura 34 *Relación Señal/Ruido SNR - Nodo 1 durante 24 horas* 109

Figura 35 *Potencia de señal RSSI (dBm) Nodo 2 durante 24 horas* 110

Figura 36 *Relación Señal/Ruido SNR - Nodo 2 durante 24 horas* 111

Figura 37 *Potencia de señal RSSI (dBm) Nodo 1* 112

Figura 38 *Relación Señal/Ruido SNR - Nodo 1* 113

Figura 39 *Potencia de Señal RSSI (dBm) - Nodo 2* 114

Figura 40 *Relación Señal/Ruido SNR - Nodo 2* 115

Figura 41 *Voltaje de Batería - Nodo 1 durante periodo de 24 horas de pruebas* 117

Figura 42 *Voltaje de Batería - Nodo 2 durante periodo de 24 horas de pruebas* 117

Figura 43 *Voltaje de Batería - Nodo 1 durante todo el periodo completo de pruebas* 118

Figura 44 *Voltaje de Batería - Nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas* 119

Figura 45 *Temperatura Ambiente - Nodo 1 durante un periodo de 24 horas de pruebas* 120

Figura 46 *Humedad Relativa - Nodo 1 durante un periodo de 24 horas de pruebas* 121

Figura 47 *Humedad del Suelo - Nodo 1 durante un periodo de 24 horas de pruebas* 122

Figura 48 *Temperatura Ambiente - Nodo 2 durante un periodo de 24 horas de pruebas* 123

Figura 49 *Humedad Relativa - Nodo 2 durante un periodo de 24 horas de pruebas* 123

Figura 50 *Humedad del Suelo - Nodo 2 durante un periodo de 24 horas de pruebas* 124

Figura 51 *Temperatura Ambiente - Nodo 1 durante todo el periodo completo de pruebas* 125

Figura 52 *Humedad Relativa - Nodo 1 durante todo el periodo completo de pruebas* 126

Figura 53 *Humedad del Suelo - Nodo 1 durante todo el periodo completo de pruebas* 127

Figura 54 *Temperatura Ambiente - Nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas* 128

Figura 55 *Humedad Relativa - Nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas* 129

Figura 56 *Humedad del Suelo - Nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas* 130

Figura 57 *Comparativa RSSI Nodo 1 y Nodo 2* 132

Figura 58 *Análisis Comparativo: Relación Señal/Ruido (SNR)* 133

Figura 59 *Comparativa Voltaje de Batería Nodo 1 y Nodo 2* 134

Figura 60 *Comparativa Temperatura Ambiente Nodo 1 y Nodo 2* 135

Figura 61 *Comparativa Humedad Relativa Nodo 1 y Nodo 2* 136

Figura 62 *Comparativa Humedad del Suelo Nodo 1 y Nodo 2* 137

Figura 63 Diagrama esquemático de conexión del nodo sensor. 153

Figura 64 Circuito electrónico ensamblado y distribución de componentes 154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Condiciones agroclimáticas principales del pimiento* 13

Tabla 2 *Principales sistemas de riego y su influencia en el desarrollo de enfermedades* 15

Tabla 3 *Clasificación taxonómica del fitopatógeno Botrytis cinérea* 16

Tabla 4 *Riesgos principales del uso prolongado de fungicidas* 22

Tabla 5 *Influencia de la humedad relativa en el desarrollo de Botrytis cinérea* 24

Tabla 6 *Relación entre la temperatura y la actividad de Botrytis cinérea* 25

Tabla 7 *Relación entre la humedad del suelo y la susceptibilidad a infecciones fúngicas* 26

Tabla 8 *Etapas de evolución tecnológica en la agricultura* 28

Tabla 9 *Proceso funcional de la Agricultura 4.0* 31

Tabla 10 *Comparativa técnica entre la Agricultura Tradicional y la Agricultura de Precisión* 33

Tabla 11 *Condiciones Climáticas Promedio de la Zona de Estudio* 56

Tabla 12 *Nomenclatura de Requerimientos* 60

Tabla 13 *Funciones de los Stakeholders* 60

Tabla 14 *Requerimientos por parte de Stakeholders (RDRS)* 61

Tabla 15 *Requerimientos Operativos* 62

Tabla 16 *Requerimientos Funcionales del Sistema* 62

Tabla 17 *Requerimientos de Arquitectura* 63

Tabla 18 *Selección de Microcontrolador para Nodo Sensor* 64

Tabla 19 *Selección de sensores* 66

Tabla 20 *Selección de Hardware para Nodo Central (Gateway)* 68

Tabla 21 *Selección de Software para Nodo Sensor* 69

Tabla 22 *Presupuesto de Consumo Energético Diario (Demanda)* 78

Tabla 23 *Capacidad* de Generación Solar (Oferta) 79

Tabla 24 *Matriz de enrutamiento y asignación de pines del nodo sensor* 82

Tabla 26 *Validación de requerimientos* 137

Tabla 27 *Costos de Hardware* 140

Tabla 28 *Costos de infraestructura* 141

Tabla 29 *Costos de Ingeniería* 141

Tabla 30 *Costos de Software* 142

Tabla 31 *Costo Total del Sistema* 142

Capítulo I: Antecedentes

1.1 Tema

Dispositivo IoT para el monitoreo de variables climáticas relacionadas con la aparición de botrytis cinérea en cultivos de pimiento.

1.2 Problema

En Ecuador, los cultivos de pimiento enfrentan numerosos desafíos relacionados con enfermedades fúngicas, entre las cuales destaca *Botrytis cinérea*, conocida comúnmente como moho gris. Este patógeno representa una amenaza significativa debido a su capacidad para proliferar en condiciones climáticas específicas, como alta humedad relativa y temperaturas moderadas, las cuales son comunes en las zonas agrícolas del cantón Urcuquí, provincia de Imbabura, donde el cultivo de pimiento tiene alta relevancia productiva.(CRUZ, 2023). La incidencia de esta enfermedad no solo reduce el rendimiento de las cosechas, sino que también afecta la calidad de los frutos, lo que impacta directamente en los ingresos de los agricultores.

Según (Nathalia, 2021) el manejo tradicional de *Botrytis cinerea* se basa principalmente en el uso de agroquímicos para prevenir o mitigar los daños. Sin embargo, esta práctica tiene limitaciones importantes: el uso excesivo de fungicidas puede generar resistencia en el patógeno, incrementar los costos de producción y afectar negativamente al medio ambiente y la salud humana. Además, muchos pequeños y medianos agricultores carecen de acceso a herramientas que les permitan identificar de manera temprana las condiciones favorables para la proliferación del patógeno, lo que los lleva a aplicar medidas reactivas en lugar de preventivas.

(De & Agropecuarias, 2019)menciona que las variables climáticas, como la temperatura, la humedad relativa y el punto de rocío, son factores determinantes en el desarrollo de *Botrytis cinerea*. Sin embargo, en cantones como Urcuquí, con fuerte actividad agrícola, no se dispone

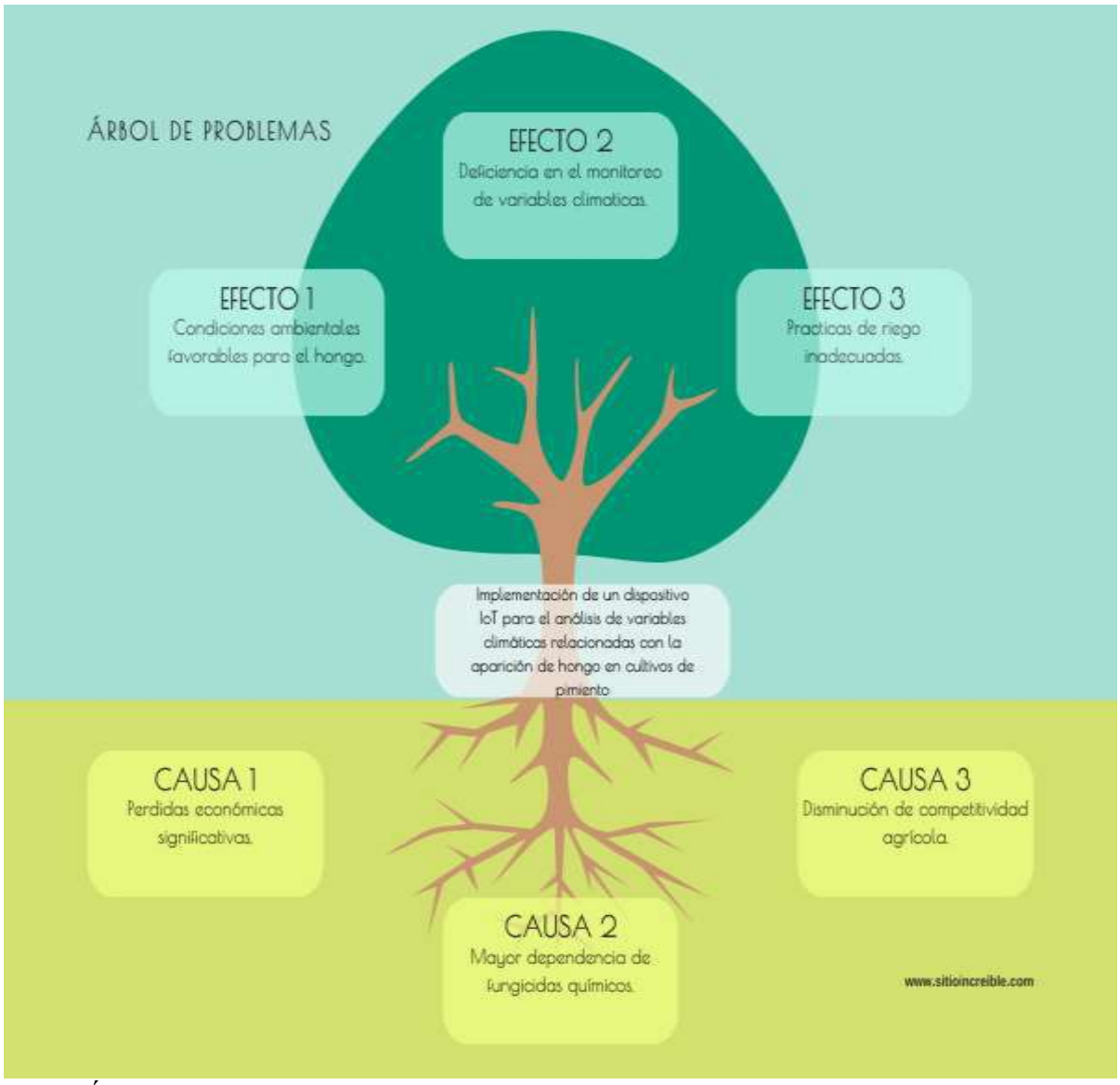
de sistemas accesibles para monitorear estos parámetros en tiempo real. La falta de información oportuna limita la capacidad de los agricultores para tomar decisiones informadas que reduzcan los riesgos de infección, optimicen el uso de insumos agrícolas y mejoren la sostenibilidad de sus prácticas. Como se indica en el árbol de problemas de la Figura 1.

En este ámbito, existe una necesidad urgente de implementar soluciones tecnológicas de bajo costo que permitan a los agricultores monitorear las condiciones climáticas de sus cultivos. Según (Lugo Sánchez, 2024) el uso de tecnologías IoT representa una alternativa innovadora y viable para abordar este problema, ya que permite la recolección, análisis y visualización de datos en tiempo real. Esto facilita la detección temprana de riesgos y promueve un manejo integrado de las enfermedades agrícolas, alineándose con los principios de producción sostenible establecidos en el ODS 12: Producción y Consumo Responsables. (Naciones, 2024)

A continuación, en la Figura 1 se presenta el árbol de problemas correspondiente al cultivo de pimiento en la comunidad de Santa Rosa, cantón Urcuquí, el cual permite visualizar de forma estructurada la relación entre el efecto principal, sus causas y consecuencias.

Figura 1

Árbol de problemas



Nota: Árbol de problemas Fuente: Autoría

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Implementar un sistema IoT para el monitoreo en tiempo real de variables climáticas asociadas a la proliferación de *Botrytis cinérea* en cultivos de pimiento en el cantón Urcuquí, con el objetivo de generar alertas preventivas y evaluar su efectividad en un entorno de prueba agrícola.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer los requerimientos técnicos, ambientales y funcionales necesarios para el diseño de un sistema IoT que permita el monitoreo de condiciones asociadas a la aparición de *Botrytis cinérea*.
- Diseñar un prototipo de sistema IoT que integre capacidades de monitoreo climático, procesamiento de datos y visualización de alertas para su aplicación en cultivos agrícolas.
- Probar el sistema IoT en una zona agrícola piloto en el cantón Urcuquí, evaluando su funcionamiento en condiciones reales de campo.
- Analizar los resultados obtenidos durante las pruebas de campo, considerando las variables climáticas identificadas en el desarrollo de la investigación, para validar el desempeño del sistema y su utilidad en el manejo preventivo de enfermedades en cultivos de pimiento.

1.4 Alcance

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño, desarrollo e implementación de un sistema IoT innovador para el monitoreo de variables climáticas asociadas a la proliferación de *Botrytis cinérea* en cultivos de pimiento. La intervención se llevará a cabo en una unidad agrícola localizada en la comunidad de Santa Rosa, en el cantón Urcuquí,

zona que presenta condiciones ambientales propicias para el desarrollo de esta enfermedad fúngica y donde el cultivo de pimiento tiene una presencia significativa.

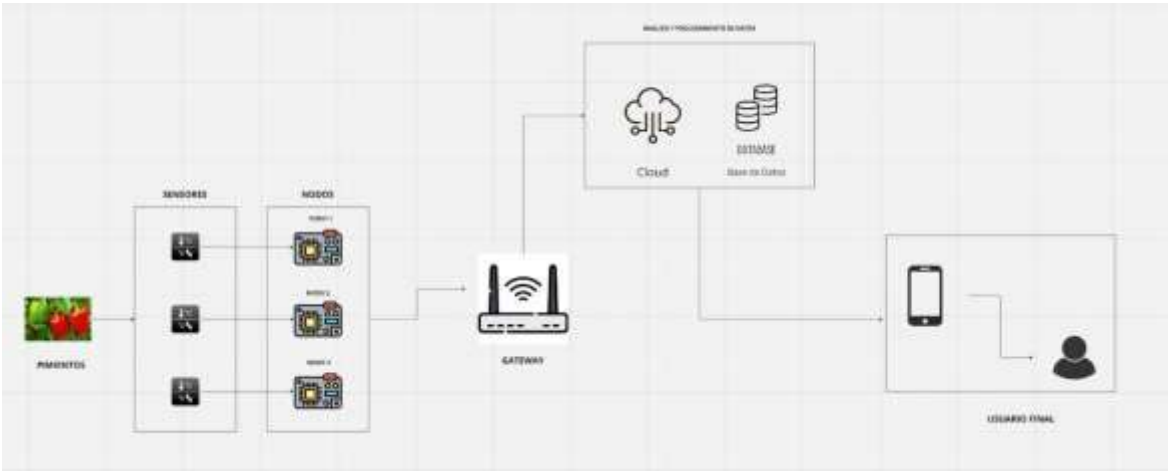
Con el fin de garantizar un desarrollo estructurado y coherente, se empleará la metodología en cascada, que permite avanzar de manera ordenada a través de fases secuenciales, asegurando que cada etapa cumpla con los objetivos planteados y sirva como base para la siguiente.

En la fase de análisis de requerimientos, se identificarán las necesidades técnicas y funcionales que debe cumplir el sistema IoT. Esta etapa incluirá una revisión exhaustiva de literatura científica sobre *Botrytis cinerea*, con el propósito de comprender los factores climáticos críticos como la humedad relativa, temperatura, punto de rocío y humedad del suelo, que favorecen su desarrollo. Este conocimiento permitirá establecer criterios claros para la selección de sensores, tecnologías de comunicación inalámbrica y requerimientos de procesamiento de datos. Asimismo, se definirán los parámetros que el sistema debe monitorear y las funcionalidades necesarias para emitir alertas preventivas en tiempo real, asegurando un enfoque integral y basado en la evidencia científica.

En la fase de diseño del sistema, se estructurará la arquitectura tecnológica, organizando los componentes clave como los nodos sensores, los módulos de comunicación inalámbrica y la plataforma en la nube. Esta arquitectura integrará tanto el hardware (encargado de recopilar los datos de las variables climáticas) como el software (que procesará, almacenará y presentará la información de manera intuitiva a través de una interfaz de usuario accesible). La interfaz permitirá a los agricultores visualizar los datos en tiempo real y recibir alertas personalizadas, optimizando la gestión de sus cultivos.

Figura 2

Arquitectura del dispositivo IoT para el analisis de variables climáticas



Nota. Arquitectura Fuente: Autoría

La fase de implementación estará dedicada al desarrollo práctico del sistema. Se ensamblarán y configurarán tres nodos sensores, que estarán equipados con sensores de temperatura, humedad ambiental, humedad del suelo y luminosidad, los cuales capturarán las condiciones climáticas del entorno en tiempo real. Cada uno de los nodos sensores se instalará en puntos estratégicos dentro del cultivo de pimiento en la comunidad de Santa Rosa, en el cantón Urcuquí, asegurando una cobertura adecuada para monitorear las variables climáticas relevantes. Además, se desarrollará una plataforma web o móvil que facilitará la consulta de los datos de forma remota, brindando herramientas para el análisis de la información y la toma de decisiones. La integración con servicios en la nube permitirá el almacenamiento seguro y el análisis eficiente de los datos, garantizando la operatividad del sistema en condiciones reales de uso.

Durante la fase de pruebas, se instalará el sistema en un cultivo de pimiento ubicado en la comunidad de Santa Rosa, en el cantón Urcuquí, para realizar pruebas piloto bajo

condiciones reales. Esta etapa permitirá evaluar la precisión de los sensores, la estabilidad de la red de comunicación, la funcionalidad de la interfaz de usuario y la capacidad del sistema para detectar y alertar sobre condiciones favorables para la proliferación de *Botrytis cinerea*. Se recopilarán datos de desempeño que servirán para ajustar y optimizar el sistema, asegurando su fiabilidad antes de su implementación definitiva.

Finalmente, en la fase de validación y análisis, se analizarán los resultados obtenidos en las pruebas piloto para evaluar la eficacia del sistema en el manejo integrado de cultivos. Este análisis se centrará en validar su aplicabilidad para optimizar las prácticas agrícolas, promoviendo la sostenibilidad a través de una gestión más eficiente de los recursos y una reducción del impacto ambiental. Además, se generará documentación detallada que incluirá conclusiones sobre el desempeño del sistema y recomendaciones para futuras mejoras o implementaciones en otros cultivos.

1.5 Justificación

El proyecto está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), que promueve prácticas agrícolas sostenibles y un equilibrio entre productividad y sostenibilidad ambiental. Al fomentar un manejo más racional de los recursos agrícolas y reducir la dependencia de agroquímicos, se contribuye a la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas locales, disminuyendo el impacto ambiental de las prácticas convencionales (Benito et al., 2000)

En el cantón Urcuquí, el cultivo de pimiento enfrenta desafíos significativos debido a la incidencia de enfermedades fúngicas, siendo *Botrytis cinerea* una de las más problemáticas. Este patógeno se ha consolidado como una amenaza recurrente debido a su alta capacidad de adaptación y su dependencia de condiciones climáticas específicas, como alta humedad relativa, presencia de rocío y temperaturas moderadas, que lo convierten en

un problema constante en regiones con condiciones favorables para su desarrollo. A pesar de ser considerado un cultivo de alta rentabilidad en la zona, los agricultores enfrentan pérdidas significativas debido a la falta de herramientas accesibles para identificar y gestionar las condiciones favorables para la proliferación del hongo (Enrique Sánchez Palacios et al., n.d.)

Este proyecto propone la implementación de un sistema IoT accesible y sostenible que permitirá a los agricultores de Urcuquí monitorear en tiempo real las condiciones climáticas críticas que favorecen el desarrollo de *Botrytis cinerea*. La adopción de esta tecnología contribuirá a una gestión más eficiente y precisa de los cultivos, reduciendo las pérdidas económicas y minimizando el impacto ambiental asociado al uso excesivo de fungicidas. Según (Lugo Sánchez, 2024) el uso de tecnologías IoT en la agricultura representa una alternativa innovadora y viable para abordar problemas como este, ya que permite la recolección, análisis y visualización de datos en tiempo real, facilitando la detección temprana de riesgos y promoviendo un manejo integrado de las enfermedades agrícolas.

Desde una perspectiva técnica, este proyecto se enmarca en la tendencia global hacia la Agricultura 4.0, que integra tecnologías digitales para transformar la gestión agrícola. El uso de IoT no solo aborda una problemática específica de los cultivos de pimiento, sino que establece un modelo replicable que puede aplicarse a otras zonas agrícolas de Ecuador, posicionando al proyecto como una contribución significativa al avance de la agricultura de precisión en el país. (Naciones, 2024)

Finalmente, este proyecto tiene un componente educativo y científico, generando conocimiento aplicable tanto para agricultores como para investigadores. Al integrar aspectos económicos, ambientales y tecnológicos, ofrece una solución integral y sostenible que responde

a las necesidades actuales de los agricultores en Urcuquí, promoviendo un sistema agrícola más resiliente y eficiente.

Capítulo II: Estado del Arte

Este capítulo presenta una revisión integral de los conceptos y tecnologías fundamentales para abordar el problema de investigación sobre el dispositivo IoT para el monitoreo de variables climáticas relacionadas con la proliferación de Botrytis cinérea en cultivos de pimiento. Se inicia con un análisis del cultivo de pimiento en Ecuador, específicamente en el cantón Urcuquí de la provincia de Imbabura, donde las condiciones climáticas propician la aparición de enfermedades fúngicas como Botrytis cinérea. La enfermedad afecta tanto la calidad como el rendimiento de la cosecha, y aunque el uso de fungicidas ha sido la estrategia principal de control, estas prácticas han demostrado ser insuficientes debido a la resistencia del hongo y sus efectos negativos en el medio ambiente y la salud.

A continuación, se explora cómo la tecnología de Internet de las Cosas (IoT) puede ser una solución efectiva para enfrentar estos desafíos. Al integrar sensores para monitorear en tiempo real variables climáticas como la temperatura, humedad y radiación solar, los agricultores pueden recibir alertas tempranas sobre las condiciones que favorecen la proliferación de Botrytis cinerea, permitiéndoles tomar decisiones preventivas. Este enfoque no solo optimiza el uso de recursos, sino que también mejora la sostenibilidad de las prácticas agrícolas, reduciendo la dependencia de productos químicos. A pesar de los desafíos relacionados con la infraestructura y capacitación en zonas rurales, como en Urcuquí, la implementación de IoT ofrece una oportunidad significativa para aumentar la productividad y la resiliencia del cultivo de pimiento, contribuyendo al desarrollo de una agricultura más eficiente y responsable.

2.1 El cultivo de pimiento en el contexto ecuatoriano

El pimiento (*Capsicum annuum*) es una hortaliza de gran relevancia económica y social en Ecuador, tanto por su alto valor comercial como por su aporte nutricional. Su cultivo se ha

expandido en diversas provincias, destacando Imbabura y Guayas, donde las condiciones climáticas y de suelo favorecen su desarrollo. En el cantón Urcuquí, la producción de pimiento constituye una actividad agrícola significativa, sustentada principalmente por pequeños y medianos productores. Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2021), este cultivo contribuye a la generación de empleo rural y a la dinamización de la economía local mediante la comercialización interna y la exportación hacia mercados internacionales.

A pesar de su importancia, el cultivo de pimiento enfrenta diversos desafíos fitosanitarios que comprometen su rentabilidad. Las condiciones de alta humedad relativa, precipitaciones frecuentes y temperaturas templadas propias de la región interandina favorecen la aparición de enfermedades fúngicas como la podredumbre gris, causada por *Botrytis cinerea*. Estas infecciones reducen el rendimiento y afectan la calidad del fruto, provocando pérdidas significativas en la producción.

En este contexto, la falta de herramientas tecnológicas que permitan el monitoreo en tiempo real de las variables ambientales limita la capacidad de los agricultores para implementar estrategias preventivas. La introducción de sistemas IoT constituye una oportunidad para optimizar la gestión de cultivos, proporcionando datos continuos sobre las condiciones climáticas y facilitando la toma de decisiones basadas en información precisa y actualizada.

2.1.1 Importancia económica del pimiento (Capsicum annuum)

El pimiento es considerado uno de los cultivos hortícolas más rentables del país debido a su demanda en los mercados nacionales e internacionales. Su producción contribuye significativamente a la economía agrícola ecuatoriana, generando fuentes de ingreso estables para numerosas familias rurales. En zonas como Urcuquí, el pimiento representa una

alternativa sostenible frente a otros cultivos de ciclo corto, gracias a su adaptabilidad y valor comercial (Quinto Espinoza, 2023).

La calidad del fruto y la productividad dependen, en gran medida, del manejo agronómico y de las condiciones climáticas. Por ello, la incorporación de tecnologías digitales y sensores IoT ha comenzado a implementarse progresivamente como una estrategia para mejorar la eficiencia productiva. El uso de herramientas tecnológicas no solo permite un control más preciso de las variables ambientales, sino que también reduce el uso indiscriminado de insumos químicos, fortaleciendo la sostenibilidad del sistema agrícola.

2.1.2. Principales zonas de cultivo en Ecuador

En Ecuador, las principales zonas de cultivo de pimiento se concentran en las provincias de Imbabura, Azuay, Guayas y Manabí. Cada una de estas regiones presenta características agroclimáticas específicas que determinan el comportamiento del cultivo. En particular, Urcuquí posee temperaturas promedio entre 18°C y 25°C, con una humedad relativa cercana al 70%, condiciones ideales para el desarrollo vegetativo del pimiento. Sin embargo, estos mismos factores ambientales también favorecen la aparición de enfermedades fúngicas, especialmente cuando no se dispone de sistemas de control ambiental (Suárez Cruz, 2023)

El manejo del riego, la ventilación y la humedad del suelo son factores determinantes para mantener un equilibrio agroecológico adecuado. El monitoreo de estas variables mediante sensores y sistemas automatizados puede contribuir significativamente a la reducción de enfermedades, garantizando una producción más estable y de mayor calidad.

2.1.3. Condiciones agroclimáticas óptimas para el cultivo.

El pimiento requiere un entorno agroclimático equilibrado para alcanzar un desarrollo óptimo y mantener una alta productividad. Factores como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la humedad del suelo influyen directamente en la fotosíntesis, el

crecimiento y la calidad del fruto. Mantener estos parámetros dentro de los rangos ideales evita el estrés fisiológico y reduce el riesgo de enfermedades fúngicas como la *Botrytis cinerea* (Suárez Cruz, 2023; Quinto Espinoza, 2023).

Las principales condiciones ambientales necesarias para el desarrollo óptimo del pimiento se resumen en la Tabla 1, donde se detallan los rangos climáticos ideales y su relevancia fisiológica en el cultivo

Tabla 1

Condiciones agroclimáticas principales del pimiento

Variable	Rango óptimo	Relevancia agronómica
Temperatura	20–26 °C (día) / 16–18 °C (noche)	Favorece el crecimiento y el cuajado del fruto
Humedad relativa	60–75 %	Reduce el riesgo de hongos y mejora la transpiración
Radiación solar	Moderada (15–25 $mol \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$)	Estimula la fotosíntesis y la floración
Humedad del suelo	70–90 % de la capacidad de campo	Mantiene la absorción de nutrientes y evita el estrés hídrico
pH del suelo	6,0–6,8	Mejora la disponibilidad de nutrientes esenciales

Fuente: Autoría

Según Martínez et al. (2020), conservar la humedad del suelo y el pH dentro de estos rangos permite una adecuada absorción de nutrientes y reduce la incidencia de patógenos. Además, el uso de sensores IoT y sistemas de riego automatizado contribuye a mantener las variables climáticas dentro de los valores óptimos, mejorando la eficiencia del cultivo (Abad Alay et al., 2023).

2.1.4. Problemáticas agrícolas asociadas al pimiento.

El cultivo de pimiento es susceptible a múltiples amenazas fitosanitarias, entre ellas las enfermedades causadas por hongos, bacterias y virus. Botrytis cinerea es una de las más comunes y perjudiciales, ya que prospera en ambientes con alta humedad y escasa ventilación. Este patógeno se propaga rápidamente en condiciones de lluvia o riego excesivo, afectando tanto las hojas como los frutos (*Principales Enfermedades y Plagas Del Pimiento*, n.d.)

El control químico ha sido la medida más empleada por los agricultores; sin embargo, su uso indiscriminado ha generado resistencia en los patógenos y consecuencias negativas para la salud humana y el medio ambiente. En este sentido, la adopción de tecnologías sostenibles como el monitoreo IoT permite anticipar las condiciones que propician el desarrollo de enfermedades, promoviendo un manejo preventivo y eficiente de los cultivos.

2.1.5. Sistemas de riego utilizados y su influencia en enfermedades

El manejo del riego constituye un factor determinante en la productividad y sanidad del cultivo de pimiento. Una gestión inadecuada del agua puede alterar el equilibrio hídrico de la planta y generar condiciones favorables para la proliferación de patógenos del suelo y del follaje. Según Martínez et al. (2020), el exceso de humedad y la falta de drenaje son las principales causas del desarrollo de enfermedades fúngicas como la Botrytis cinerea, Phytophthora capsici y la pudrición radicular.

Entre los sistemas de riego más empleados destacan el riego por gravedad, el riego por aspersión y el riego por goteo, cada uno con implicaciones diferentes sobre la humedad del suelo y del ambiente.

En la Tabla 2 se comparan los sistemas de riego más empleados en el cultivo de pimiento, destacando sus características, efectos fitosanitarios y recomendaciones técnicas

Tabla 2

Principales sistemas de riego y su influencia en el desarrollo de enfermedades

Sistema de riego	Características	Influencia fitosanitaria	Recomendación técnica
Gravedad o surcos	Alto consumo de agua y baja eficiencia	Favorece encharcamientos y patógenos del suelo	Evitar en suelos pesados o con mal drenaje
Aspersión	Buena distribución del agua, similar a la lluvia	Aumenta la humedad foliar y riesgo de Botrytis cinérea	Aplicar en horas tempranas del día
Goteo	Aporta agua directamente a la raíz	Reduce humedad ambiental y enfermedades fúngicas	Ideal para invernaderos y riego automatizado

Fuente: Autoria

El riego por goteo es el sistema más eficiente, pues mantiene la humedad del suelo sin elevar la humedad relativa del ambiente, reduciendo así la incidencia de hongos (Pérez et al., 2020). Además, su integración con sensores IoT permite automatizar los ciclos de riego y optimizar el uso del agua. De acuerdo con Suárez Cruz (2023), esta técnica contribuye a conservar un microclima estable y prevenir infecciones fúngicas, fortaleciendo la sostenibilidad y la eficiencia del cultivo.

2.2 Botrytis cinérea: El agente patógeno

Botrytis cinerea es un hongo fitopatógeno de distribución mundial que afecta una amplia gama de especies vegetales, especialmente aquellas de interés agrícola. En el caso del

pimiento (Capsicum annuum), este microorganismo es el causante de la enfermedad conocida como podredumbre gris o moho gris, considerada una de las principales amenazas para la producción hortícola bajo condiciones de alta humedad y temperaturas templadas. Su capacidad de adaptación, reproducción rápida y persistencia en los restos vegetales lo convierten en un patógeno de difícil control.

El conocimiento detallado de su morfología, ciclo de vida y condiciones ambientales que favorecen su proliferación resulta fundamental para diseñar estrategias de prevención y manejo. En este contexto, el uso de sistemas IoT para el monitoreo de variables climáticas como la humedad relativa, la temperatura y el punto de rocío puede ser determinante para anticipar la aparición del hongo y reducir su impacto en los cultivos.

2.2.1. Características morfológicas y biológicas del hongo

Desde el punto de vista taxonómico, *Botrytis cinerea* es un hongo fitopatógeno complejo perteneciente al filo Ascomycota. Su clasificación biológica completa, que lo ubica dentro de la familia Sclerotiniaceae, se detalla en la Tabla 3. Esta jerarquía es fundamental para comprender su comportamiento reproductivo y sus mecanismos de resistencia.

Tabla 3

Clasificación taxonómica del fitopatógeno Botrytis cinérea

Categoría Taxonómica	Clasificación
Reino	Fungi
Filo	Ascomycota
Clase	Leotiomycetes
Orden	Helotiales
Familia	Sclerotiniaceae

Categoría Taxonómica	Clasificación
Género	Botrytis
Especie	Botrytis cinerea

Nota. Adaptado de *Plant Pathology* (5.ª ed.), por G. N. Agrios, 2005, Elsevier.

El hongo se caracteriza por formar micelios de color grisáceo y conidios asexuales que se dispersan fácilmente por el viento, el agua o el contacto físico entre plantas. Esta estructura le permite colonizar rápidamente superficies vegetales húmedas, lo que explica su alta tasa de infección en cultivos con condiciones climáticas propicias (Ramírez et al., 2021).

Adicionalmente, *Botrytis cinerea* posee la capacidad de producir esclerocios, estructuras de resistencia que le permiten sobrevivir en condiciones ambientales adversas, como la ausencia de humedad o temperaturas extremas. Estas estructuras permanecen en los restos de plantas o en el suelo durante largos periodos, actuando como fuente de inóculo para nuevos brotes de infección. Cuando las condiciones son favorables, los esclerocios germinan, liberando conidios que inician nuevamente el proceso infeccioso.

El carácter oportunista del patógeno, junto con su capacidad para infectar tejidos dañados o senescentes, explica su persistencia en diversos ambientes agrícolas. Por ello, el monitoreo constante de las variables climáticas y la detección temprana de microambientes favorables son elementos clave en su control preventivo (Ramírez et al., 2021).

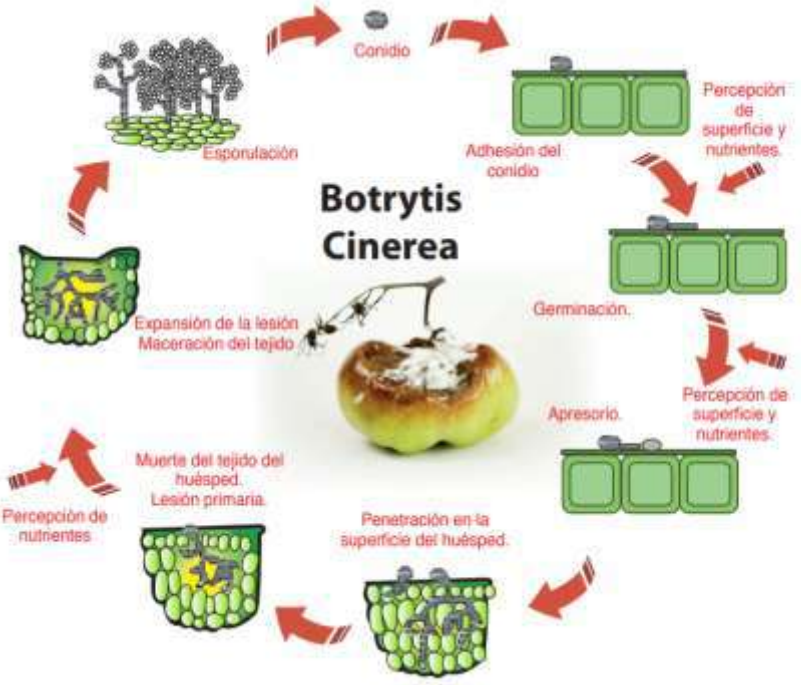
2.2.2 Ciclo de vida y mecanismos de infección

El ciclo de vida de *Botrytis cinerea* presenta fases de reproducción sexual y asexual, aunque en la mayoría de los casos la propagación ocurre de forma asexual mediante conidios. El proceso de infección inicia cuando las esporas germinan sobre superficies vegetales húmedas, formando apresorios que facilitan la penetración de los tejidos de la planta.

Tal como se ilustra en la Figura X, esta etapa de germinación representa el punto crítico de control, ya que depende directamente de la presencia de humedad ambiental para activar el desarrollo del patógeno antes de que penetre el tejido.

Figura 3

Ciclo biológico de Botrytis cinérea y puntos de infección en solanáceas



Fuente: Ecamed. (s.f.). Botrytis cinerea: Ciclo de vida.

Una vez dentro, el hongo libera enzimas y toxinas que degradan las paredes celulares, permitiendo la colonización del tejido vegetal (López et al., 2019). Durante su desarrollo, el patógeno se beneficia de las heridas provocadas por la manipulación o por insectos, así como de los tejidos envejecidos, lo que le facilita la invasión de la planta. En ambientes con alta humedad y temperaturas moderadas, la velocidad de infección aumenta significativamente. Posteriormente, el hongo produce nuevas esporas que se liberan al ambiente y continúan el ciclo de dispersión.

La comprensión de este proceso biológico es esencial para establecer medidas de prevención, ya que permite identificar los momentos críticos en los que el cultivo es más vulnerable. A través del uso de sensores IoT que registren las condiciones de humedad y temperatura, es posible predecir las etapas del ciclo infeccioso y activar alertas tempranas antes de que se produzcan daños visibles en el cultivo.

2.2.3. Condiciones climáticas que favorecen su proliferación

Las condiciones ambientales desempeñan un papel determinante en el desarrollo de Botrytis cinerea. El hongo prospera en ambientes con una humedad relativa superior al 90% y temperaturas comprendidas entre 15 °C y 23 °C. Estos parámetros son comunes en zonas agrícolas de clima templado, como el cantón Urcuquí, donde las precipitaciones frecuentes y la escasa ventilación en los invernaderos crean un entorno propicio para la infección (Syngenta, 2020).

La condensación del agua sobre las hojas y frutos, especialmente durante las horas de la madrugada, facilita la germinación de las esporas y la penetración del hongo en los tejidos vegetales. De igual forma, la falta de circulación de aire y el exceso de humedad en el suelo contribuyen a la persistencia del patógeno.

En este sentido, la integración de sistemas de monitoreo ambiental basados en IoT puede proporcionar información en tiempo real sobre las condiciones microclimáticas del cultivo, permitiendo ajustar factores como la ventilación o el riego para reducir los riesgos de proliferación del hongo

2.2.4 Síntomas y diagnóstico en pimiento

La infección por Botrytis cinerea se manifiesta a través de manchas acuosas y blandas en los frutos, que progresivamente se cubren de un micelio gris característico. Como se evidencia en la Figura 4, la infección avanza provocando una lesión necrótica sobre la cual

prolifera el cuerpo fructífero del hongo, comprometiendo totalmente la calidad comercial del producto

Figura 4

Manifestación clínica de Botrytis cinérea en fruto de Capsicum annuum, mostrando el característico moho gris y la degradación del tejido.



Fuente: Koppert. (s.f.). Tizón del pimiento: Síntomas y daños.

En las hojas, se observan áreas necróticas de bordes difusos, mientras que en las flores la enfermedad causa su marchitamiento prematuro. Los tejidos infectados presentan un olor desagradable producto de la descomposición y liberan nuevas esporas que contribuyen a la diseminación del patógeno (Certis Belchim, 2020).

El diagnóstico se realiza mediante la observación directa de los síntomas y la confirmación microscópica del micelio y los conidios. Sin embargo, los métodos tradicionales de detección suelen ser reactivos, es decir, se aplican cuando la infección ya está avanzada. De ahí la importancia de implementar sistemas de alerta temprana que permitan actuar de forma preventiva, evitando la propagación del hongo y las pérdidas económicas asociadas.

2.2.5. Impacto económico y productivo de la enfermedad

Las pérdidas ocasionadas por Botrytis cinerea en cultivos de pimiento pueden alcanzar hasta un 30% de la producción total, afectando directamente la rentabilidad de los agricultores (Ramírez et al., 2020). Además de la reducción en el rendimiento, la enfermedad deteriora la calidad del fruto, impidiendo su comercialización. Los costos de manejo, asociados al uso de fungicidas y labores culturales, incrementan significativamente los gastos operativos del productor.

Este escenario evidencia la necesidad de adoptar tecnologías que permitan la gestión inteligente de los cultivos. La implementación de sistemas IoT no solo facilita la detección temprana de condiciones propicias para la infección, sino que también optimiza el uso de recursos, reduce la dependencia de agroquímicos y contribuye a la sostenibilidad de la producción agrícola.

2.2.6 Métodos tradicionales de control: químicos, biológicos y culturales

El control de Botrytis cinerea se ha basado históricamente en la aplicación de fungicidas químicos, combinada con prácticas culturales como la eliminación de restos vegetales y la ventilación adecuada de los invernaderos. No obstante, el uso intensivo de productos químicos ha generado resistencia en el patógeno y efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana (González et al., 2019).

En respuesta a estas limitaciones, se han explorado métodos biológicos mediante el uso de microorganismos antagonistas como Trichoderma spp., que inhiben el crecimiento del hongo. Sin embargo, su eficacia depende de condiciones ambientales específicas. Por ello, la integración de estrategias basadas en el monitoreo climático mediante IoT representa una alternativa innovadora y complementaria, ya que permite intervenir antes de que las condiciones sean favorables para la infección.

2.2.7. Riesgos asociados al uso prolongado de fungicidas

El uso continuo de fungicidas en el cultivo de pimiento puede generar resistencia en patógenos, acumulación de residuos químicos y efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana. En el caso de Botrytis cinerea, la aplicación repetida del mismo modo de acción reduce la eficacia de los productos y aumenta los costos de control (González et al., 2019).

La Tabla 4 indica los principales riesgos vinculados al uso prolongado de fungicidas, junto con las consecuencias y estrategias de manejo recomendadas.

Tabla 4

Riesgos principales del uso prolongado de fungicidas

Riesgo	Consecuencia	Recomendación
Resistencia de patógenos	Pérdida de eficacia del tratamiento	Rotar principios activos según código FRAC
Residuos en fruto y suelo	Contaminación ambiental y rechazo comercial	Respetar dosis y periodo de carencia
Efectos no objetivo	Daño a microorganismos y fauna benéfica	Usar productos selectivos y biológicos

Fuente: Autoría

2.3. Variables climáticas asociadas a Botrytis cinérea

El desarrollo de Botrytis cinérea está directamente influenciado por las condiciones ambientales. Factores como la temperatura, la humedad relativa, la presencia de rocío y la ventilación determinan el inicio, la intensidad y la persistencia de la infección. Por este motivo, la comprensión y el monitoreo de estas variables climáticas son esenciales para el manejo preventivo de la enfermedad en los cultivos de pimiento.

La implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real mediante sistemas IoT permite registrar continuamente estos parámetros y establecer umbrales críticos que sirvan como base para generar alertas tempranas. De esta forma, los agricultores pueden anticiparse a las condiciones de riesgo y aplicar medidas de control de manera oportuna y sostenible.

2.3.1. Humedad relativa y su efecto en la germinación de esporas

La humedad relativa es el factor más determinante en la germinación de las esporas de Botrytis cinérea. Cuando el nivel de humedad supera el 90%, las esporas encuentran el ambiente ideal para activarse y colonizar los tejidos vegetales. En contraste, cuando los niveles de humedad son inferiores al 70%, la capacidad de germinación del hongo disminuye significativamente (González et al., 2019).

El control de la humedad en invernaderos o ambientes cerrados puede realizarse mediante una adecuada ventilación o el uso de sensores IoT que regulen automáticamente los sistemas de ventilación y riego. El monitoreo constante permite identificar los periodos críticos de condensación, especialmente durante la madrugada, cuando la humedad tiende a alcanzar su punto máximo.

La Tabla 5 muestra la relación entre la humedad relativa y el grado de riesgo de infección por *Botrytis cinérea*, indicando los rangos críticos que deben controlarse para evitar la proliferación del hongo

Tabla 5

Influencia de la humedad relativa en el desarrollo de Botrytis cinérea

Rango de Humedad Relativa	Efecto en el Hongo	Riesgo de Infección	Recomendación Agronómica
< 70%	Actividad mínima	Bajo	Mantener ventilación y control de riego
70% - 90%	Inicio de germinación	Moderado	Monitorear condensación y microclimas
> 90%	Germinación activa y rápida dispersión	Alto	Activar alertas IoT y reducir humedad ambiental

Fuente: Autoría

2.3.2. Temperatura crítica para la proliferación del hongo

La temperatura es otra variable decisiva en la dinámica de *Botrytis cinérea*. El rango óptimo para su crecimiento oscila entre los 15 °C y los 23 °C, siendo los 20 °C el punto de máxima actividad biológica (Syngenta, 2020). Temperaturas inferiores a 10 °C o superiores a 30 °C inhiben la germinación de las esporas, aunque el hongo puede mantenerse en estado latente esperando condiciones más favorables.

El conocimiento de estos umbrales térmicos es esencial para la calibración de sensores IoT, que permiten registrar variaciones de temperatura con alta precisión. Los datos obtenidos pueden integrarse en modelos predictivos que determinen el riesgo de infección en función de la temperatura y la humedad.

La Tabla 6 muestra la relación entre la temperatura en la cual se prolifera la *Botrytis cinerea*

Tabla 6

Relación entre la temperatura y la actividad de Botrytis cinérea

Temperatura (°C)	**Nivel de Actividad del Hongo**	**Observaciones**
< 10 °C	Latente	Las esporas permanecen inactivas pero viables
15 – 23 °C	Óptima	Germinación activa y rápida colonización
25 – 30 °C	Reducida	Disminuye la germinación, pero puede persistir
> 30 °C	Inhibida	Muerte celular o suspensión del ciclo biológico

Fuente: Autoría

2.3.3. Punto de rocío y formación de microambientes favorables

El punto de rocío es crucial en la dinámica de *Botrytis cinérea*, ya que cuando la temperatura desciende hasta alcanzar este punto, se crea un microambiente de alta humedad sobre las superficies vegetales, lo que favorece la germinación de los conidios. Este fenómeno es especialmente importante durante las noches frías en climas templados y en invernaderos, donde la falta de ventilación y la acumulación de humedad pueden permitir que las esporas germinen incluso cuando las temperaturas diurnas no son lo suficientemente bajas para afectar el desarrollo del hongo. La formación de estos microambientes aumenta la posibilidad de infección, especialmente en cultivos sensibles como el pimiento (López et al., 2019).

2.3.4. Influencia de la humedad del suelo en el desarrollo del patógeno

La humedad del suelo también tiene un impacto directo en la propagación de *Botrytis cinérea*. El hongo es más activo en suelos con alta humedad, ya que las condiciones húmedas favorecen la esporulación y la dispersión de las esporas. Sin embargo, un exceso de humedad puede también crear condiciones propicias para la proliferación de otros patógenos, lo que aumenta el riesgo de infecciones secundarias. En cultivos como el pimiento, la humedad en el suelo debe ser controlada cuidadosamente, ya que el exceso de agua no solo favorece a *Botrytis*, sino también a otras enfermedades fúngicas que afectan la raíz y el tallo de la planta (Pérez et al., 2020).

La Tabla 7 indica la relación entre la humedad del suelo y como esta influye en la propagación de *Botrytis cinérea.*

Tabla 7

Relación entre la humedad del suelo y la susceptibilidad a infecciones fúngicas

Nivel de Humedad del Suelo	**Efecto Fisiológico**	**Riesgo de Infección**	**Estrategia de Control**
Bajo (< 20%)	Estrés hídrico, reducción de crecimiento	Bajo	Aumentar frecuencia de riego
Moderado (30–50%)	Condiciones óptimas de desarrollo	Mínimo	Mantener humedad estable
Alto (> 70%)	Saturación, falta de oxígeno en raíces	Alto	Controlar drenaje y riego automatizado

Fuente: Autoría

2.3.5. Otros factores relevantes: viento, radiación solar, pH (opcional)

Además de los factores de humedad y temperatura, hay otros factores climáticos que pueden influir en la proliferación de *Botrytis cinérea*. El viento, aunque en pequeñas dosis puede ayudar a dispersar las esporas, también puede aumentar el estrés en las plantas al promover la deshidratación en áreas de alta humedad, lo que puede reducir la propagación del hongo en ciertas condiciones. Por otro lado, la radiación solar directa afecta la temperatura superficial de las plantas, lo que puede limitar la formación de microambientes húmedos necesarios para el desarrollo del hongo. El pH del suelo también influye en la susceptibilidad de las plantas a la infección; suelos con pH ácido favorecen el crecimiento de *Botrytis cinérea*, mientras que en suelos más alcalinos, el hongo muestra un desarrollo reducido (Syngenta, 2020).

2.4. Agricultura de precisión y tecnologías emergentes

La agricultura de precisión es un enfoque moderno que utiliza tecnologías avanzadas para optimizar la producción agrícola, reducir costos y mejorar la sostenibilidad del sector. Este tipo de agricultura se basa en la recopilación y análisis de datos específicos sobre las condiciones del suelo, el clima y las plantas, lo que permite tomar decisiones informadas para maximizar los rendimientos y minimizar el uso de recursos. En los últimos años, las tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT), los sensores inteligentes, la inteligencia artificial (IA) y los drones han permitido a los agricultores monitorear sus cultivos de manera más precisa y en tiempo real, facilitando la gestión eficiente de los recursos y la detección temprana de problemas fitosanitarios y climáticos (Laverde Mena & Laverde Mena, 2021).

Estas tecnologías emergentes están transformando la forma en que se lleva a cabo la agricultura, permitiendo que las decisiones se basen en datos reales, lo que mejora la eficiencia y sostenibilidad. La integración de estos avances en la agricultura, conocida como Agricultura 4.0, se está implementando gradualmente en diversas partes del mundo, incluidos países como

Ecuador, donde la adopción de tecnologías digitales puede contribuir al fortalecimiento del sector agrícola (Laverde Mena & Laverde Mena, 2021).

2.4.1 Evolución de la agricultura hacia sistemas inteligentes

La evolución de la agricultura hacia sistemas inteligentes ha sido un proceso gradual impulsado por la innovación tecnológica. Inicialmente, la agricultura se basaba en métodos tradicionales que dependían de la experiencia y el conocimiento empírico. Sin embargo, a medida que avanzaron las tecnologías, la agricultura comenzó a incorporar herramientas como el riego por goteo, las máquinas sembradoras automatizadas y los sistemas de monitoreo de cultivos basados en sensores. Estos avances permitieron una optimización del uso de recursos y una mejora en la productividad. Con la llegada de la Agricultura 4.0, los sistemas inteligentes integran tecnologías como los sensores IoT, los drones agrícolas y la inteligencia artificial (IA), lo que permite tomar decisiones de gestión basadas en datos en tiempo real.

La transición hacia estos sistemas inteligentes ha permitido una mayor precisión en la gestión de cultivos, lo que se traduce en un uso más eficiente del agua, los fertilizantes y otros insumos. En países como Ecuador, la implementación de estas tecnologías emergentes está siendo cada vez más necesaria para enfrentar los desafíos que presenta el cambio climático, como las variaciones en las precipitaciones y las temperaturas extremas (Abad Alay et al., 2023).

La Tabla 8 indica las etapas de la evolución de la tecnología en la agricultura.

Tabla 8

Etapas de evolución tecnológica en la agricultura

Etapa	Periodo aproximado	Características principales	Tecnologías predominantes

Agricultura Tradicional	Antes del siglo XX	Basada en la experiencia empírica	Herramientas manuales y tracción animal
Agricultura Mecánica	1900–1970	Uso de maquinaria agrícola	Tractores, cosechadoras
Agricultura de Precisión	1980–2010	Introducción de datos y sensores	GPS, sensores de humedad, SIG
Agricultura 4.0 (Inteligente)	2010–Actualidad	Digitalización total y automatización	IoT, IA, drones, análisis de big data

Fuente: Autoría

2.4.2 Fundamentos de la agricultura 4.0

La Agricultura 4.0 se refiere a la integración de tecnologías avanzadas en el sector agrícola para mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la rentabilidad de los cultivos. Este concepto incluye el uso de sensores IoT, big data, inteligencia artificial (IA), robotización y drones, entre otras tecnologías. La idea central de la Agricultura 4.0 es hacer que las decisiones en los campos agrícolas se basen en datos precisos y en tiempo real, lo que permite una gestión más eficaz de los recursos y una mayor precisión en la predicción de enfermedades, plagas y condiciones climáticas. La automatización de las actividades agrícolas, como la siembra, el riego y la cosecha, también forma parte fundamental de este concepto.

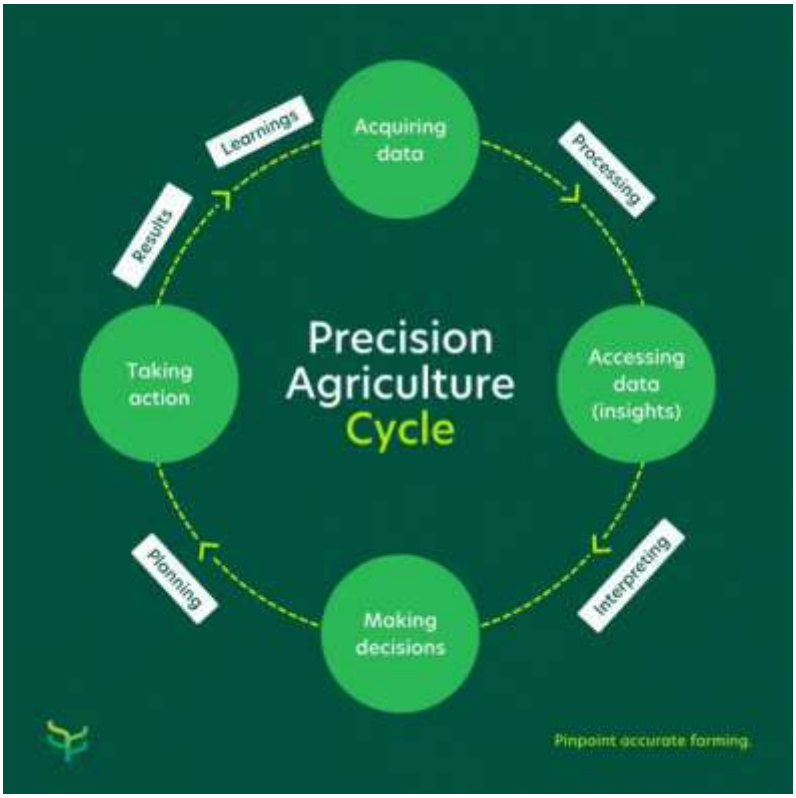
Una de las bases de la Agricultura 4.0 es la recopilación de grandes volúmenes de datos (big data) que provienen de sensores en el suelo, en las plantas y en el ambiente. Estos datos se procesan mediante algoritmos de inteligencia artificial para predecir el comportamiento de los cultivos y optimizar las intervenciones. En Ecuador, la implementación de Agricultura 4.0 tiene un gran potencial para mejorar la productividad y la competitividad del sector agrícola,

especialmente en regiones con climas variables y riesgos de plagas, como el cantón Urcuquí (Laverde Mena & Laverde Mena, 2021).

Este enfoque tecnológico no es lineal, sino que funciona como un sistema de retroalimentación continua. Como se ilustra en la Figura 5, el ciclo inicia con la captura de datos físicos y culmina con la ejecución de labores de control, cerrando la brecha entre la detección del problema y su solución.

Figura 5

*Ciclo de vida de la agricultura de precisión aplicado al control de cultivos***.**



Fuente: Adaptado de Cátedra Corteva (2020).

Para complementar este esquema visual, la Tabla 9 especifica en detalle las tecnologías involucradas y los resultados esperados en cada una de estas etapas funcionales.

Tabla 9

Proceso funcional de la Agricultura 4.0

Etapa	Tecnología aplicada	Resultado esperado
Recolección de datos	Sensores IoT, drones, estaciones climáticas	Información precisa del entorno agrícola
Procesamiento de datos	Plataformas en la nube, big data	Análisis estadístico y correlación de variables
Toma de decisiones	IA y algoritmos predictivos	Recomendaciones automáticas o alertas preventivas
Ejecución	Actuadores, riego inteligente, control remoto	Intervención automática o manual optimizada

Fuente: Autoría

2.4.3 Rol de las TIC en la mejora de la producción agrícola

Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) juegan un papel fundamental en la mejora de la producción agrícola. A través de las TIC, los agricultores pueden acceder a plataformas digitales que proporcionan información en tiempo real sobre condiciones climáticas, mercados y tendencias de consumo. Además, el uso de aplicaciones móviles y plataformas en la nube permite a los agricultores tomar decisiones basadas en datos precisos sobre el riego, la fertilización, el control de plagas y la cosecha. En Ecuador, las TIC han demostrado ser un catalizador importante para la modernización del sector agrícola,

especialmente en regiones como Urcuquí, donde la adopción de tecnologías de monitoreo y gestión ha mejorado la calidad y la rentabilidad de los cultivos.

Además, las TIC facilitan la capacitación de los agricultores en nuevas técnicas agrícolas, permitiéndoles mantenerse actualizados sobre las mejores prácticas y los avances tecnológicos. Este acceso a información aumenta la eficiencia de los cultivos, mejora la gestión de recursos y reduce los costos operativos. Las TIC también son esenciales en la agricultura de precisión, al permitir la recopilación y el análisis de datos que optimizan el uso de los insumos y mejoran la sostenibilidad del sector (Martillo Alchundia et al., 2022).

2.4.4 Ventajas de la agricultura basada en datos

La agricultura basada en datos ofrece numerosas ventajas que contribuyen a la optimización de la producción agrícola y la sostenibilidad del sector. La recopilación de datos en tiempo real a través de sensores IoT y otras tecnologías permite a los agricultores tomar decisiones más informadas y rápidas, lo que mejora la eficiencia en el uso de recursos como el agua, los fertilizantes y los pesticidas. El análisis de estos datos ayuda a predecir los resultados de las cosechas y a gestionar los riesgos asociados con enfermedades y plagas, lo que reduce las pérdidas y mejora la rentabilidad.

Una de las principales ventajas de la agricultura basada en datos es la reducción de costos. Al utilizar datos precisos sobre el suelo, el clima y las plantas, los agricultores pueden ajustar sus prácticas agrícolas para maximizar el rendimiento mientras minimizan los costos de insumos. Además, la agricultura de precisión permite una mejor gestión ambiental, ya que se evita el uso excesivo de productos químicos y se reduce el impacto negativo sobre el ecosistema. Estas ventajas han hecho que la agricultura basada en datos sea una tendencia creciente, especialmente en países con climas variables como Ecuador (Abad Alay et al., 2023).

La Tabla 10 hace referencia a la comparativa entre la agricultura tradicional y agricultura basada en datos.

Tabla 10

Comparativa técnica entre la Agricultura Tradicional y la Agricultura de Precisión

Criterio	Agricultura Tradicional	Agricultura Basada en Datos
Enfoque	Reactivo	Preventivo y predictivo
Fuente de decisión	Experiencia del agricultor	Análisis de datos en tiempo real
Uso de recursos	Elevado y generalizado	Optimizado y localizado
Sostenibilidad ambiental	Limitada	Alta
Rentabilidad	Variable	Estable y predecible

Fuente: Autoría

2.4.5 Limitaciones en el contexto rural ecuatoriano

A pesar de los avances en la adopción de tecnologías emergentes, existen varias limitaciones para la implementación de Agricultura 4.0 en el contexto rural de Ecuador. Una de las principales barreras es la falta de infraestructura tecnológica adecuada, especialmente en áreas rurales como Urcuquí, donde el acceso a internet de alta calidad y la disponibilidad de energía eléctrica son limitados. Además, muchos agricultores carecen de capacitación en el uso de nuevas tecnologías, lo que dificulta la adopción de sistemas de monitoreo climático y gestión inteligente de los cultivos.

Otra limitación importante es el costo asociado con la implementación de tecnologías avanzadas, como sensores IoT y drones. Aunque estas tecnologías pueden mejorar significativamente la productividad y sostenibilidad del sector agrícola, la inversión inicial es alta, lo que representa un obstáculo para los pequeños y medianos agricultores. Para superar estas limitaciones, es necesario que el gobierno y las instituciones privadas promuevan programas de capacitación y financiamiento que permitan a los agricultores acceder a las tecnologías necesarias para mejorar sus prácticas agrícolas (Laverde Mena & Laverde Mena, 2021).

2.5 Internet de las Cosas (IoT) aplicado a la agricultura

El Internet de las Cosas (IoT) ha emergido como una herramienta transformadora en la agricultura moderna, ofreciendo soluciones innovadoras para optimizar la producción, mejorar la sostenibilidad y reducir los costos operativos. Esta tecnología permite la interconexión de dispositivos físicos, como sensores y actuadores, a través de Internet, para recolectar y transmitir datos relevantes sobre las condiciones de los cultivos. Gracias al IoT, los agricultores pueden obtener información en tiempo real sobre variables críticas como la humedad del suelo, la temperatura ambiente, la radiación solar y el estado de los cultivos, lo que facilita una toma de decisiones más informada y precisa. Este tipo de monitoreo permite no solo optimizar los recursos, como el agua y los fertilizantes, sino también prevenir enfermedades y mejorar la eficiencia de los procesos agrícolas.

La implementación de sistemas IoT en la agricultura ha demostrado ser beneficiosa en diversas áreas, tales como la gestión eficiente del riego, la fertilización y el control de plagas. En países como Ecuador, el uso de tecnologías como los sensores inteligentes y los drones está comenzando a ser cada vez más común en cultivos como el pimiento, especialmente en zonas como el cantón Urcuquí. Estas herramientas permiten a los agricultores ajustar el riego y la aplicación de insumos según las condiciones climáticas y las necesidades específicas de cada cultivo, mejorando así los rendimientos y reduciendo los costos operativos. Además, la automatización de procesos permite una mayor sostenibilidad en el uso de los recursos agrícolas, alineándose con las necesidades de un mundo que enfrenta el reto del cambio climático y la escasez de recursos naturales (Cruz Vega et al., 2015).

2.5.1 Concepto general de IoT

El Internet de las Cosas (IoT) es una red de dispositivos físicos interconectados a través de Internet, que son capaces de recopilar, procesar y transmitir datos en tiempo real sin intervención humana directa. En el ámbito agrícola, el IoT implica la implementación de

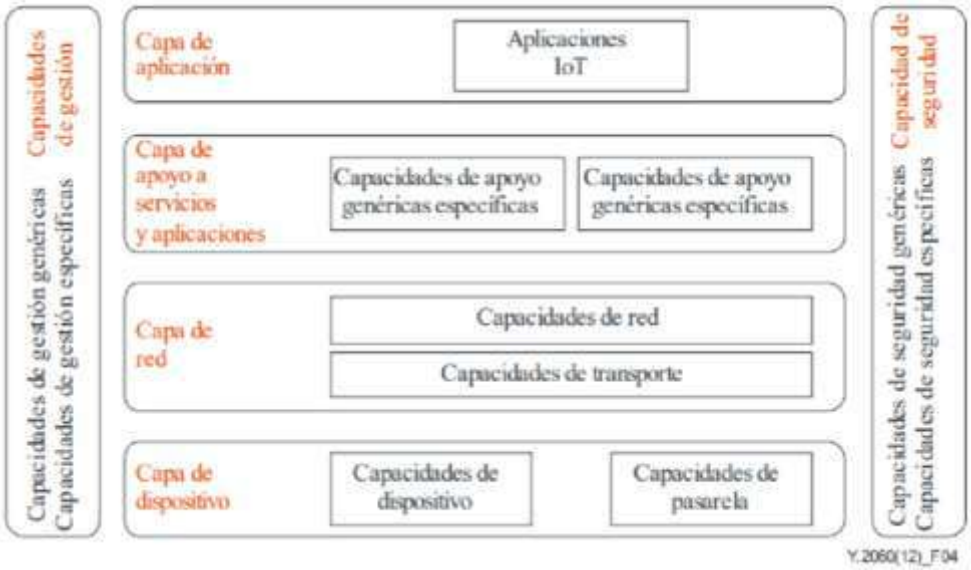
sensores y dispositivos conectados en el campo para monitorear variables como la humedad del suelo, la temperatura, la radiación solar y la calidad del aire. Estos dispositivos envían información a plataformas digitales que procesan los datos y proporcionan a los agricultores herramientas para tomar decisiones basadas en información precisa y oportuna. El IoT en la agricultura, también conocido como Agricultura de Precisión, permite una gestión más eficiente de los recursos, optimizando el uso de agua, fertilizantes y pesticidas, y mejorando la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.

En la práctica, la adopción de IoT permite que los agricultores no dependan únicamente de su experiencia o de métodos tradicionales, sino que utilicen datos en tiempo real para gestionar sus cultivos. Esto también se traduce en una mayor sostenibilidad, ya que se puede ajustar el uso de agua, fertilizantes y pesticidas de acuerdo con las necesidades específicas de cada cultivo y las condiciones climáticas. A medida que la tecnología avanza, la implementación de agricultura de precisión a través de IoT se ha vuelto indispensable para enfrentar los retos del sector, como la escasez de recursos y los efectos del cambio climático (García et al., 2020).

Para comprender la operatividad del sistema propuesto, es necesario analizar el modelo de referencia IoT estandarizado. Tal como se presenta en la Figura 6, la arquitectura se divide en cuatro capas lógicas que garantizan el flujo de información: la capa de percepción (sensores), la capa de red (conectividad), la capa de middleware (procesamiento) y la capa de aplicación (interfaz de usuario).

Figura 6

Modelo de referencia de arquitectura IoT dividido en capas funcionales



Fuente: Adaptado de ITU-T Y.2060.

2.5.2 Componentes de un sistema IoT agrícola

Un sistema IoT agrícola se compone de varios componentes clave que trabajan de manera conjunta para recoger, transmitir y analizar los datos de los cultivos en tiempo real. Estos elementos incluyen sensores, módulos de comunicación, microcontroladores y nodos, y plataformas de gestión y visualización. Cada uno de estos componentes juega un papel fundamental en la eficiencia de la agricultura de precisión, permitiendo optimizar el uso de los recursos y mejorar los rendimientos. Por ejemplo, los sensores miden variables como la humedad, la temperatura y la calidad del aire, mientras que los microcontroladores gestionan estos datos y los envían a través de los módulos de comunicación hacia plataformas digitales que ayudan a tomar decisiones informadas. El uso de sensores inteligentes en conjunto con plataformas basadas en IoT facilita la automatización de procesos agrícolas como el riego y la fertilización (Molina et al., 2021).

Además, el Internet de las Cosas (IoT) permite integrar una amplia variedad de tecnologías y dispositivos en la agricultura, desde sistemas de monitoreo climático hasta la

gestión del riego y el control de plagas. Estos sistemas interconectados proporcionan beneficios como la reducción de costos operativos, la optimización de recursos como el agua y los fertilizantes, y la mejora de la sostenibilidad de las prácticas agrícolas. La capacidad de ajustar las condiciones de los cultivos en función de datos en tiempo real es una de las principales ventajas de los sistemas IoT, lo que ha permitido una revolución en la agricultura a través de la automatización y la gestión eficiente de recursos (Sadowski & Spachos, 2020).

2.5.2.1 Sensores

Los sensores son dispositivos fundamentales en un sistema IoT agrícola, ya que permiten la medición y monitoreo continuo de las condiciones ambientales y del cultivo. Estos sensores recogen datos sobre variables como la humedad del suelo, la temperatura ambiente, la radiación solar, el pH del agua y la concentración de nutrientes. La información proporcionada por los sensores es crucial para ajustar las prácticas agrícolas, como el riego y la fertilización, de manera que se optimicen los rendimientos y se minimicen los recursos utilizados.

Por ejemplo, los sensores de humedad del suelo permiten detectar con precisión los niveles de agua disponibles para las plantas y ajustar el riego en consecuencia, evitando tanto el riego excesivo como la deshidratación de los cultivos. Además, los sensores de temperatura pueden ayudar a identificar cambios climáticos extremos que podrían afectar la salud de los cultivos, lo que permite a los agricultores tomar decisiones preventivas. Estos sensores son parte integral de la agricultura de precisión, donde la recopilación de datos de alta calidad mejora la toma de decisiones y la productividad agrícola (Sadowski & Spachos, 2020).

2.5.2.2 Módulos de comunicación

Los módulos de comunicación son esenciales en un sistema IoT agrícola, ya que permiten que los sensores transmitan los datos recopilados a plataformas digitales para su análisis y visualización. Estos módulos utilizan distintos protocolos de comunicación, cada uno

adecuado para diferentes necesidades y contextos agrícolas. Entre los más comunes se encuentran Wi-Fi, ZigBee, LoRa, y NB-IoT. El Wi-Fi es útil en áreas con buena conectividad a internet, ofreciendo alta velocidad de transmisión, pero su alcance es limitado. ZigBee es ideal para redes locales de corto alcance, mientras que LoRa permite transmitir datos a largas distancias con bajo consumo de energía, lo cual lo hace adecuado para cultivos en grandes áreas, como los de campo abierto.

NB-IoT (Narrowband IoT) se destaca por su capacidad de proporcionar cobertura amplia y bajo consumo energético, lo que lo hace perfecto para zonas rurales donde la conectividad es limitada. Estos módulos de comunicación permiten la transmisión de datos en tiempo real, lo que facilita el monitoreo continuo de las condiciones de los cultivos y la optimización de las prácticas agrícolas, como el ajuste del riego y la gestión de plagas (García et al., 2020).

2.5.2.3 Microcontroladores y nodos

Los microcontroladores son dispositivos de procesamiento que gestionan el flujo de datos entre los sensores y los módulos de comunicación. Estos microcontroladores reciben la información de los sensores, la procesan y envían los datos a través de los módulos de comunicación a plataformas digitales o servidores donde se analizan. Además, los microcontroladores permiten la toma de decisiones en tiempo real, como la activación de sistemas de riego o el encendido de luces en invernaderos, basándose en los datos obtenidos.

Los nodos, que consisten en microcontroladores y sensores interconectados, permiten la expansión del sistema IoT en áreas extensas, proporcionando una cobertura más amplia para el monitoreo de los cultivos. Estos nodos operan de manera autónoma y son fundamentales para la escalabilidad de los sistemas IoT en la agricultura. Su capacidad de operar sin

intervención humana constante hace que el sistema sea eficiente y adecuado para grandes extensiones de tierra (Cruz Vega et al., 2015).

5.2.4 Plataformas de gestión y visualización

Las plataformas de gestión y visualización permiten a los agricultores acceder a los datos recolectados por los sensores a través de interfaces digitales. Estas plataformas proporcionan herramientas para visualizar los datos en tiempo real, como gráficos, mapas y alertas, lo que facilita la toma de decisiones. Los agricultores pueden ver de inmediato la humedad del suelo, la temperatura y otros parámetros críticos, y ajustar el riego, la fertilización o el uso de pesticidas en consecuencia.

Además, las plataformas de gestión modernas también integran capacidades de análisis predictivo utilizando inteligencia artificial (IA) y big data. Esto permite no solo monitorear las condiciones actuales, sino también prever las condiciones futuras de los cultivos y el entorno, ayudando a optimizar la producción y a reducir riesgos. En este sentido, las plataformas IoT juegan un papel clave en la automatización de los procesos agrícolas, lo que resulta en una mayor eficiencia y sostenibilidad en la agricultura (Molina et al., 2021).

2.5.3 Protocolos de comunicación en IoT: Wi-Fi, ZigBee, LoRa, NB-IoT

Los protocolos de comunicación en un sistema IoT son esenciales para la transferencia de datos entre los sensores y las plataformas de gestión en tiempo real. La elección del protocolo adecuado depende de varios factores, como el alcance de la red, el consumo de energía, y la velocidad de transmisión requerida. Entre los protocolos más utilizados en la agricultura de precisión se encuentran Wi-Fi, ZigBee, LoRa, y NB-IoT.

Wi-Fi es un protocolo ampliamente utilizado en áreas donde hay buena conectividad a internet y corto alcance. Ofrece alta velocidad de transmisión, pero no es ideal para grandes

distancias ni áreas rurales con limitada cobertura de red. Es adecuado para granjas urbanas o zonas cercanas a infraestructuras tecnológicas.

ZigBee es un protocolo de comunicación de bajo consumo energético y corto alcance, ideal para aplicaciones locales de IoT agrícola, como el monitoreo de la humedad del suelo en invernaderos pequeños. Aunque tiene un alcance limitado, es eficiente para redes de sensores cercanos que requieren intercambio frecuente de datos.

LoRa es un protocolo de larga distancia y bajo consumo de energía que es adecuado para áreas rurales, donde la cobertura de red tradicional es débil. Permite comunicaciones a larga distancia sin requerir gran cantidad de energía, lo que lo hace ideal para cultivos de campo abierto y agricultura de precisión en zonas extensas.

NB-IoT (Narrowband IoT) es un protocolo de banda estrecha que proporciona gran cobertura incluso en áreas rurales o subterráneas. NB-IoT se utiliza para sistemas IoT donde el consumo de energía es crítico, y se destaca por su eficiencia en zonas de difícil acceso, lo que lo hace ideal para sistemas de monitoreo remoto en grandes campos de cultivo o áreas agrícolas de difícil conectividad.

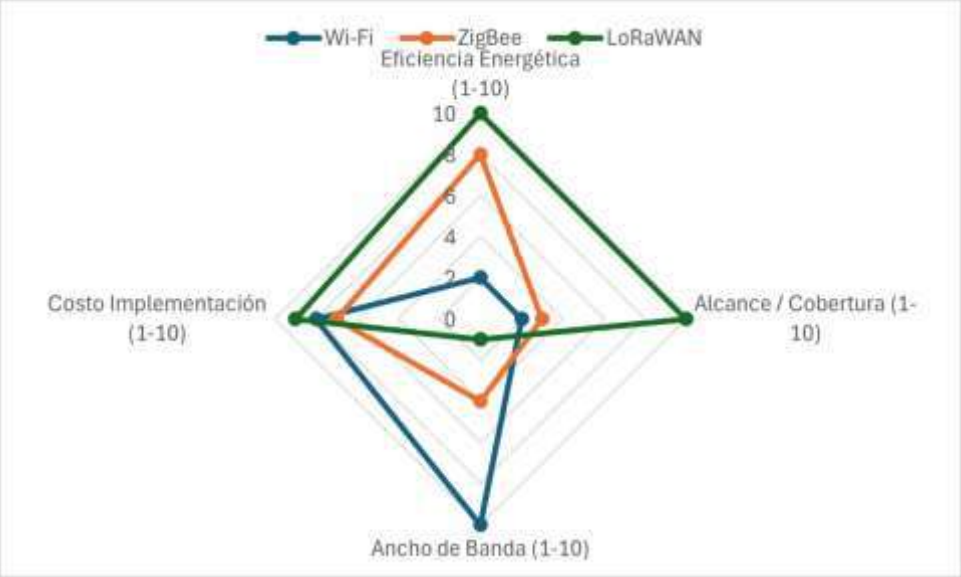
2.5.3.1 Análisis comparativo y selección de tecnología

La implementación de estos protocolos depende de las características geográficas, los requisitos de comunicación y los costos operativos de cada proyecto agrícola, lo que permite seleccionar el protocolo más adecuado para cada situación específica (Sadowski & Spachos, 2020). Para el contexto específico de este proyecto en Urcuquí, se realizó un análisis comparativo de las prestaciones técnicas de los tres estándares principales disponibles para redes privadas (Wi-Fi, ZigBee y LoRaWAN).

En la Figura 7 se presenta un diagrama radial que contrasta la eficiencia energética, el alcance de cobertura y el ancho de banda.

Figura 7

Análisis comparativo de prestaciones técnicas: LoRaWAN frente a estándares tradicionales (Wi-Fi y ZigBee).



Fuente: Elaboración propia basada en especificaciones técnicas de LoRa Alliance y estándares IEEE 802.

Como se evidencia en la gráfica, aunque la tecnología Wi-Fi (línea azul) sobresale en ancho de banda, su corto alcance la hace inviable para la extensión del cultivo objetivo. Por el contrario, LoRaWAN (línea verde) maximiza las variables críticas para este proyecto: eficiencia energética y cobertura kilométrica, validando técnicamente su elección para la implementación de los nodos sensores autónomos propuestos en el Capítulo III.

2.5.3.2 Aplicaciones IoT en invernaderos y cultivos de campo abierto

El Internet de las Cosas (IoT) tiene aplicaciones clave tanto en invernaderos como en cultivos de campo abierto. En los invernaderos, el IoT permite el monitoreo automatizado de las condiciones ambientales internas, como la temperatura, la humedad, la luminosidad y la concentración de CO2. Estos parámetros son esenciales para crear un entorno óptimo para el crecimiento de las plantas, y el uso de sensores IoT permite ajustes automáticos de sistemas de riego, ventilación y control de temperatura. De esta manera, los agricultores pueden mantener

las condiciones ideales para el cultivo durante todo el año, sin depender de las variaciones climáticas externas.

En los cultivos de campo abierto, el IoT es igualmente útil, permitiendo la implementación de sistemas de riego inteligente, el monitoreo de humedad del suelo y la detección de plagas. El uso de sensores en el suelo y el aire permite realizar ajustes en tiempo real para la aplicación de fertilizantes o pesticidas de manera precisa y localizada, lo que reduce el uso excesivo de estos insumos y mejora la sostenibilidad de la agricultura. Además, la integración de drones IoT permite monitorear áreas extensas de cultivo para detectar problemas, como la proliferación de enfermedades o la variación en el crecimiento de las plantas. El IoT no solo optimiza el rendimiento de los cultivos, sino que también mejora la eficiencia operativa y reduce costos en la agricultura (Martillo Alchundia et al., 2022).

2.5.3.3 Beneficios del monitoreo climático en tiempo real

El monitoreo climático en tiempo real a través de sistemas IoT tiene varios beneficios para la agricultura moderna, especialmente en términos de gestión eficiente de los recursos y sostenibilidad. Al utilizar sensores que miden variables clave como la temperatura, la humedad y las condiciones del suelo, los agricultores pueden ajustar el riego y la aplicación de fertilizantes de manera precisa, evitando el desperdicio de recursos y reduciendo los costos operativos. Además, la detección temprana de condiciones climáticas adversas (como olas de calor, heladas o tormentas) permite a los agricultores tomar decisiones preventivas para proteger sus cultivos.

Otro beneficio importante es la reducción de plagas y enfermedades. Gracias a los sistemas de monitoreo climático, es posible identificar las condiciones que favorecen el desarrollo de plagas y enfermedades, permitiendo que los agricultores actúen antes de que estos problemas afecten sus cultivos. Además, el monitoreo climático en tiempo real ayuda a maximizar el rendimiento de los cultivos, ya que permite a los agricultores tomar decisiones

más informadas sobre las mejores prácticas agrícolas, basadas en datos precisos (García et al., 2020).

2.5.3.4 Casos de éxito relevantes (Latinoamérica o Europa)

En Latinoamérica, varios países han adoptado soluciones IoT con gran éxito en el sector agrícola. En Chile, se han implementado sensores de humedad y temperatura para gestionar el riego en cultivos de frutas y hortalizas en regiones áridas del país. Gracias a la integración de sistemas IoT, los agricultores han podido reducir el consumo de agua hasta en un 30%, lo que ha permitido mejorar la sostenibilidad en zonas afectadas por la escasez de agua. Esta optimización también ha contribuido a aumentar los rendimientos de los cultivos, al proporcionar condiciones óptimas de riego según las necesidades de cada planta.

En Europa, España es uno de los países líderes en el uso de tecnologías IoT para la agricultura. Empresas como Sensacultivo han desarrollado soluciones basadas en IoT para optimizar el riego y la gestión de nutrientes en invernaderos, logrando una reducción de costos operativos de hasta un 25%. La plataforma también permite a los agricultores ajustar automáticamente los sistemas de riego y fertilización, basándose en datos de sensores de humedad y temperatura en tiempo real. Este tipo de aplicaciones en agricultura de precisión no solo ha mejorado la rentabilidad de los cultivos, sino que también ha permitido una gestión más eficiente de los recursos y una menor huella ambiental (dplnews.com, 2023).

2.6 Sensores ambientales en sistemas IoT agrícolas

En los sistemas IoT agrícolas, los sensores ambientales desempeñan un papel crucial en la recolección de datos necesarios para monitorear las condiciones del entorno y optimizar la producción agrícola. Estos sensores miden variables esenciales como temperatura, humedad relativa, radiación solar y humedad del suelo, lo que permite a los agricultores tomar decisiones informadas sobre el manejo de los cultivos. Al integrar estos sensores con módulos de comunicación, los datos pueden ser enviados a plataformas digitales donde se

procesan y visualizan, permitiendo la automatización de prácticas agrícolas como el riego inteligente, el control de plagas y la fertilización precisa. Los sensores también permiten gestionar el consumo de recursos de manera eficiente, lo que promueve la sostenibilidad y reduce los costos operativos, lo que resulta en una mejora significativa en los rendimientos de los cultivos (Wang et al., 2022).

La implementación de sensores IoT en la agricultura contribuye a la agricultura de precisión, un enfoque que utiliza datos específicos de cada campo o cultivo para hacer ajustes finos en tiempo real. Esto facilita la optimización del uso de insumos, como el agua y los fertilizantes, lo cual es fundamental en un contexto de creciente escasez de recursos y de presión por la sostenibilidad. Además, los sensores son esenciales para el monitoreo constante de las condiciones climáticas, lo que ayuda a anticipar eventos como heladas o sequías y a tomar decisiones preventivas para proteger las cosechas. Estos avances tecnológicos son clave para afrontar los retos del cambio climático y mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a factores adversos (Ramos et al., 2021).

2.6.1 Sensor de temperatura (DHT22, DS18B20, etc.)

Los sensores de temperatura son dispositivos esenciales en la agricultura de precisión, ya que la temperatura del aire y del suelo es un factor determinante para el crecimiento de los cultivos. Los sensores como el DHT22 y el DS18B20 se utilizan ampliamente en el monitoreo de estos parámetros. El DHT22 es un sensor digital que mide tanto la temperatura como la humedad relativa con un alto grado de precisión, lo que lo convierte en una opción popular para invernaderos y sistemas de riego inteligente. Este sensor es adecuado para ambientes de temperatura moderada y se usa comúnmente para gestionar las condiciones dentro de los invernaderos.

Por otro lado, el DS18B20 es otro sensor muy utilizado debido a su alta precisión en mediciones de temperatura, con un rango que va desde -55°C hasta +125°C. Este sensor es

particularmente útil en situaciones donde se requieren mediciones de temperatura precisas en ambientes de cultivo tanto en el suelo como en el aire. Su capacidad de medición precisa lo convierte en una opción popular para los sistemas de riego por goteo y para el control ambiental en áreas agrícolas de condiciones extremas (Sánchez et al., 2021).

2.6.2 Sensor de humedad relativa

El sensor de humedad relativa es uno de los sensores clave en los sistemas IoT agrícolas, ya que la humedad relativa del aire influye directamente en el estrés de las plantas y en la eficiencia del riego. Estos sensores son fundamentales para mantener las condiciones óptimas en invernaderos y cultivos en campo abierto. Los sensores de humedad relativa miden el contenido de vapor de agua en el aire, y sus datos se utilizan para gestionar el microclima dentro de las instalaciones agrícolas.

La precisión de los sensores de humedad relativa es fundamental para evitar la deshidratación o exceso de humedad en los cultivos. Si el nivel de humedad es muy bajo, las plantas pueden experimentar estrés hídrico; si es muy alto, pueden proliferar enfermedades fúngicas y otros problemas relacionados con la condiciones de humedad. Con la ayuda de estos sensores, los agricultores pueden automatizar sistemas de ventilación y humidificación, ajustando las condiciones climáticas según las necesidades específicas de cada cultivo (García et al., 2020).

2.6.3 Sensor de humedad del suelo

El sensor de humedad del suelo es crucial para la gestión eficiente del riego en los sistemas agrícolas. Este sensor mide el contenido de agua en el suelo, lo que permite a los agricultores ajustar el riego para evitar tanto la excesiva humedad como la falta de agua, condiciones que pueden dañar las raíces de las plantas. El sensor de humedad del suelo trabaja

basándose en principios como la capacitancia o la resistencia eléctrica, lo que permite medir con precisión el contenido de agua disponible para las plantas.

Estos sensores son fundamentales para la agricultura de precisión, ya que permiten ajustar el riego según las necesidades específicas de cada área del campo. De esta manera, no solo se optimiza el uso de agua, sino que también se evita el desperdicio de recursos y se mejora la sostenibilidad. La instalación de sensores de humedad en diferentes puntos de un cultivo ayuda a identificar zonas con deficiencia de riego y a ajustar la distribución del agua para maximizar el rendimiento de los cultivos (Martínez et al., 2020).

2.6.4 Sensor de radiación solar / luz UV

Los sensores de radiación solar y luz UV son fundamentales para monitorear las condiciones climáticas y el efecto de la radiación solar sobre el crecimiento de los cultivos. Estos sensores miden la intensidad de la luz solar que incide en el área de cultivo, lo cual es esencial para evaluar las condiciones de fotosíntesis. La radiación solar es uno de los factores más importantes para determinar el rendimiento de los cultivos, ya que afecta directamente la producción de energía de las plantas.

El sensor de luz UV mide la radiación ultravioleta que impacta los cultivos. Aunque las plantas no requieren directamente UV para la fotosíntesis, la exposición excesiva puede causar daño en las plantas, afectando su salud y crecimiento. Por tanto, estos sensores permiten a los agricultores ajustar las condiciones dentro de los invernaderos o modificar la exposición al sol en función de la radiación UV. Esto también es crucial para la prevención de daños en cultivos sensibles a las altas concentraciones de luz ultravioleta (López et al., 2022).

2.6.5 Sensor de punto de rocío (cálculo a partir de T y HR)

El sensor de punto de rocío se calcula utilizando los datos de temperatura (T) y humedad relativa (HR). Este sensor mide la temperatura a la cual el aire se satura con vapor de agua y

empieza a condensarse, formando rocío. La medición del punto de rocío es esencial para prevenir problemas relacionados con la condensación de agua sobre las plantas, lo que puede causar enfermedades fúngicas como el mildiú.

Los sensores de punto de rocío se utilizan en sistemas IoT para gestionar el microclima en invernaderos y áreas de cultivo, ajustando las condiciones de humedad y ventilación. Mantener un punto de rocío adecuado previene la formación de condensación excesiva, protegiendo así los cultivos de posibles enfermedades. Además, estos sensores ayudan a optimizar el uso del riego y a evitar humedad innecesaria en el ambiente (García et al., 2021).

2.6.6 Consideraciones de calibración y precisión

La calibración y la precisión de los sensores son esenciales para garantizar que los datos recogidos en el campo sean exactos y útiles para la toma de decisiones. Los sensores deben ser calibrados regularmente para mantener su exactitud y fiabilidad. La calibración periódica es fundamental, ya que los sensores pueden sufrir desviaciones con el tiempo debido a factores como la exposición a condiciones climáticas extremas o el desgaste.

La precisión de los sensores es crucial, ya que los datos erróneos pueden llevar a decisiones incorrectas, como un riego excesivo o la aplicación incorrecta de fertilizantes, lo que afectaría el rendimiento de los cultivos. Además, los sensores deben ser capaces de adaptarse a las condiciones cambiantes del ambiente agrícola, como la variabilidad en la temperatura o la humedad, sin perder su precisión. Esto permite tomar decisiones informadas que optimicen el uso de recursos y mejoren la sostenibilidad de los cultivos (González et al., 2021).

2.6.7 Criterios para la selección de sensores adecuados

La selección de sensores adecuados para sistemas IoT agrícolas depende de varios criterios técnicos y operativos. Uno de los factores más importantes es el rango de medición,

que debe coincidir con los valores de referencia del entorno agrícola. La precisión del sensor es otro criterio clave, ya que los datos deben ser lo más exactos posible para garantizar que las decisiones basadas en estos datos sean efectivas. Además, los sensores deben ser duraderos, ya que deben resistir condiciones de trabajo difíciles, como exposición constante a la intemperie, temperaturas extremas y la humedad.

El consumo energético también es un aspecto fundamental, especialmente en aplicaciones agrícolas donde el acceso a la electricidad puede ser limitado. Los sensores de bajo consumo permiten que los sistemas IoT funcionen durante largos períodos sin necesidad de recargar las baterías o reemplazarlas con frecuencia. Además, la facilidad de integración con otros dispositivos y plataformas digitales también es esencial para garantizar que el sistema IoT sea escalable y adaptable a diferentes necesidades agrícolas (García & Mendoza, 2021).

2.7. Entornos de Desarrollo y Programación IoT

Las plataformas de desarrollo en el ecosistema IoT constituyen la capa de abstracción de hardware que permite estructurar, compilar y desplegar lógica de control en dispositivos embebidos y servidores perimetrales.

2.7.1. Plataformas de Desarrollo y Orquestación

El desarrollo a nivel de microcontrolador o "bare-metal" requiere herramientas capaces de interactuar directamente con los registros del hardware. El entorno Arduino IDE se ha consolidado como una plataforma estándar debido a su capa de abstracción de hardware (HAL), la cual simplifica la programación de microprocesadores complejos de 32 bits mediante la escritura de código estructurado, compilación y flasheo a la memoria flash (Romero Molano & Orduz Pérez, 2026).

Por otro lado, a nivel de servidor perimetral, el procesamiento requiere herramientas orientadas al manejo de eventos asíncronos. Node-RED es una plataforma desarrollada sobre

el entorno Node.js, que utiliza la Programación Basada en Flujos (FBP). Permite interconectar protocolos de red y bases de datos mediante un enfoque gráfico, destacando por su arquitectura de entrada/salida no bloqueante (non-blocking I/O), lo que evita la saturación de recursos al manejar múltiples sensores (Sixfab, 2025).

2.7.2. Lenguajes de Programación en Arquitecturas IoT

El despliegue de una red inalámbrica heterogénea exige la utilización concurrente de múltiples lenguajes de programación:

C y C++: Lenguajes eficientes en el manejo de memoria, estándar para programar el firmware de nodos sensores. Permiten manipular temporizadores de hardware e interrupciones, cruciales para rutinas de hibernación profunda (Deep Sleep) que extienden la vida de las baterías (Zhu et al., 2024)

JavaScript (JS): En servidores locales, Node.js utiliza el motor V8 para ejecutar JS, permitiendo la manipulación nativa de objetos JSON (JavaScript Object Notation). A través de JS, el servidor extrae variables climáticas y aplica algoritmos de filtrado (Sixfab, 2025).

SQL (Structured Query Language): Lenguaje declarativo estándar para la gestión de bases de datos relacionales, fundamental para definir el esquema de tablas de series temporales y ejecutar consultas analíticas del microclima (Romero Molano & Orduz Pérez, 2026).

2.8. Procesamiento Perimetral y Almacenamiento de Datos

La evolución arquitectónica desde la computación en la nube hacia la computación en el borde (Edge Computing) es fundamental en escenarios de agricultura inteligente. En lugar de enviar todos los datos brutos a servidores remotos, el procesamiento se realiza localmente en el Gateway de la granja (Sharma & Singh, 2025).

2.8.1. Algoritmos y Técnicas de Procesamiento en el Borde

Las técnicas de procesamiento perimetral emplean algoritmos deterministas basados en reglas lógicas de condición-acción. Estos algoritmos modelan los requisitos biológicos de los patógenos agrícolas mediante estructuras condicionales (Gu et al., 2024). Al evaluar las variables climáticas entrantes frente a constantes matemáticas predefinidas, el algoritmo dictamina el nivel de riesgo epidemiológico en milisegundos. Esta arquitectura garantiza que, incluso ante la pérdida de conectividad a internet, el sistema continúe evaluando el peligro e impulsando alertas locales automatizadas.

2.8.2. Sistemas Gestores de Bases de Datos (SGBD) Relacionales

Un SGBD administra la estructura física y lógica de los datos, garantizando su persistencia y seguridad. En el procesamiento en el borde, el motor debe ser lo suficientemente ligero para ejecutarse en arquitecturas ARM sin comprometer las propiedades ACID (Atomicidad, Consistencia, Aislamiento y Durabilidad). Motores relacionales de código abierto, como MariaDB o MySQL, utilizan sistemas transaccionales que protegen los datos ante cortes de energía. Estructuran la telemetría en filas y columnas donde la marca de tiempo (timestamp) actúa como índice principal, garantizando la recuperación en fracciones de segundo (Romero Molano & Orduz Pérez, 2026).

2.9. Capa de Aplicación y Visualización

La visualización de datos constituye la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) del sistema, traduciendo registros de bases de datos en bruto en representaciones asimilables para la toma de decisiones.

2.9.1. Visualización y Paneles de Control (Dashboards IoT)

Los Dashboards modernos en entornos IoT utilizan protocolos de comunicación bidireccional continua como WebSockets. Esto permite que el navegador del usuario final actualice los gráficos en tiempo real sin recargar la página (Sixfab, 2025). La implementación típica incluye indicadores de estado tipo reloj (Gauges) para monitorear variables instantáneas contra umbrales críticos de riesgo fitosanitario, y diagramas de líneas multivariables para identificar tendencias y correlaciones climáticas a lo largo del ciclo diurno y nocturno, facilitando la intervención temprana del agricultor sin requerir conocimientos técnicos avanzados de bases de datos.

CAPÍTULO III DISEÑO DEL SISTEMA

3.1. Metodología de Desarrollo

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se optó por la implementación del Modelo en Cascada (Waterfall Model). Este enfoque metodológico estructura el ciclo de vida del sistema en fases secuenciales y lineales, lo que resulta idóneo para proyectos de ingeniería donde los requisitos de hardware, telecomunicaciones y las condiciones ambientales deben estar claramente definidos antes de proceder a la implementación física y la programación del código.

A diferencia de las metodologías ágiles, que permiten iteraciones constantes, el modelo en cascada asegura que cada etapa (análisis, diseño, implementación y pruebas) sea validada y documentada antes de avanzar a la siguiente. Esto es crítico en el desarrollo de dispositivos IoT para entornos rurales como Santa Rosa, donde la validación de la infraestructura de red y la selección de componentes energéticos debe ser precisa para evitar fallos en la operación de campo.

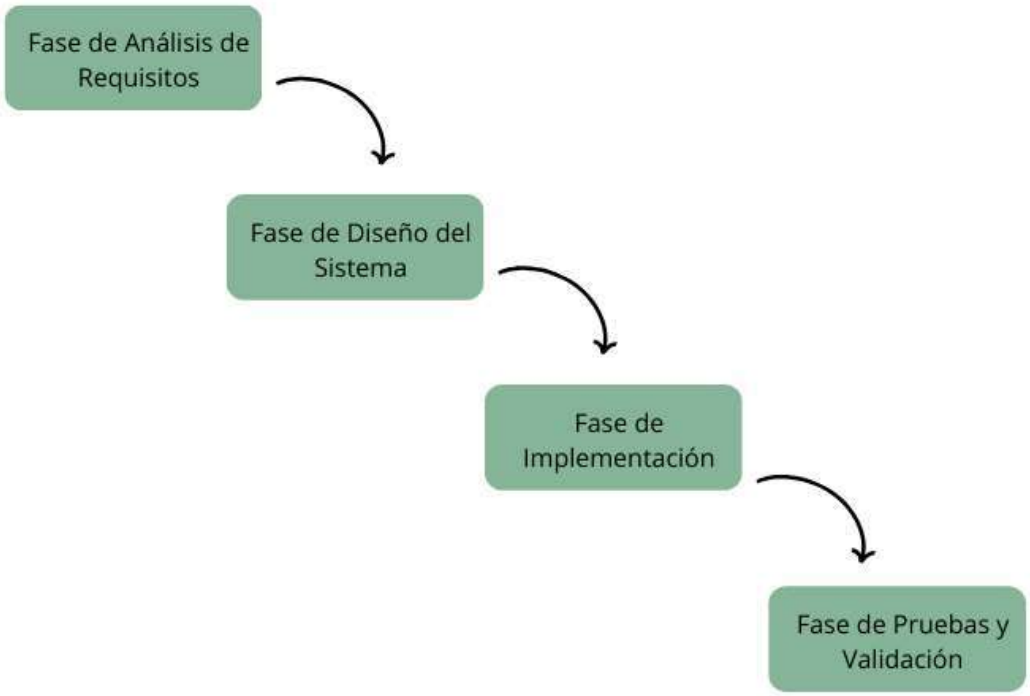
3.1.1. Modelo de ciclo de vida aplicado al desarrollo IoT

El modelo en Cascada se caracteriza por su enfoque secuencial y no iterativo. Cada fase debe completarse plenamente antes de pasar a la siguiente, lo que facilita el control del proyecto y la generación de documentación técnica exhaustiva.

Como se observa en la Figura 8, el progreso del proyecto fluye de manera escalonada a través de cuatro fases principales, permitiendo un control riguroso sobre los entregables de cada etapa y asegurando la coherencia entre los requisitos fitosanitarios del cultivo y la solución tecnológica implementada.

Figura 8

Fases del Modelo en Cascada aplicado al desarrollo del sistema IoT.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Fases de la metodología aplicada

El desarrollo del sistema IoT se estructuró en cuatro fases principales del modelo en Cascada, adaptadas a las particularidades del proyecto y a las restricciones técnicas y agronómicas establecidas. Cada fase se documentó exhaustivamente para garantizar trazabilidad y reproducibilidad.

1. **Fase de Análisis de Requisitos** En esta etapa inicial se realizó un diagnóstico detallado de la zona de estudio en la Comunidad de Santa Rosa, Cantón San Miguel de Urcuquí. Se caracterizaron las condiciones climáticas locales (temperaturas entre 14-22°C con caídas térmicas nocturnas y alta condensación) y se identificaron las variables críticas

para la proliferación de *Botrytis cinerea* (temperatura, humedad relativa y humedad del suelo). Mediante observación directa, entrevistas a productores y revisión bibliográfica se definieron los requisitos técnicos (autonomía energética, conectividad LoRa 915 MHz), funcionales (adquisición de datos, alertas) y no funcionales (precisión, bajo costo y protección IP65). Esta fase culminó con la definición precisa del alcance del proyecto: dos nodos sensores autónomos y un gateway local basado en Raspberry Pi 4.

2. **Fase de Diseño del Sistema** Una vez establecidos los requisitos, se procedió al diseño detallado de la solución. Se definió la arquitectura en estrella con dos nodos sensores basados en ESP32 y un gateway coordinador (Heltec receptor + Raspberry Pi 4). Se elaboraron los esquemas electrónicos, se seleccionaron los sensores (DHT22 y capacitivo), se diseñó el modelo entidad-relación de MariaDB y se estructuró la lógica de procesamiento en Node-RED, incluyendo el cálculo analítico del punto de rocío mediante la ecuación de Magnus-Tetens. También se definió la lógica de alertas y el diseño del dashboard de visualización. Esta fase produjo los diagramas arquitectónicos, esquemáticos y de flujo que sirvieron de base para la implementación.
3. **Fase de Implementación** En esta etapa se materializó el diseño. Se desarrolló el firmware de los nodos sensores en Arduino IDE, implementando el modo Deep Sleep de 15 minutos y la transmisión LoRa a 915 MHz. Se configuró el gateway (conexión USB entre Heltec receptor y Raspberry Pi 4), se crearon los flujos de Node-RED para recepción, procesamiento, almacenamiento en MariaDB y envío de alertas vía Telegram. Se realizó el ensamblaje físico de los nodos y se verificó la integración completa del sistema antes de las pruebas de campo.
4. **Fase de Pruebas y Validación** Finalmente, se ejecutaron pruebas exhaustivas tanto en laboratorio como en el sitio real del cultivo. Se validaron el alcance de la comunicación LoRa, la precisión de los sensores, la autonomía energética de los nodos, el correcto

funcionamiento del procesamiento perimetral en Node-RED, el almacenamiento en MariaDB y la efectividad del sistema de alertas. Los resultados de esta fase permitieron confirmar el cumplimiento de los objetivos planteados y realizar los ajustes finales al prototipo.

Esta secuencia metodológica aseguró un desarrollo ordenado, controlado y bien documentado, minimizando riesgos y facilitando la validación final del sistema en condiciones reales de operación.

3.2. Análisis de la Situación Actual

La etapa de análisis de la situación actual constituye el fundamento diagnóstico del proyecto. En esta fase se evaluó el contexto agronómico, climático y tecnológico de los productores de pimiento en la Comunidad de Santa Rosa, con el propósito de identificar las carencias reales que justifican la implementación del sistema IoT propuesto. Este análisis permitió alinear los requisitos técnicos del dispositivo con las necesidades específicas del cultivo y del entorno rural.

3.2.1. Caracterización de la zona de estudio

La investigación se centra en la Comunidad de Santa Rosa, perteneciente al Cantón San Miguel de Urcuquí, provincia de Imbabura, ubicada a una altitud aproximada de 2300 metros sobre el nivel del mar. Esta zona presenta un clima templado-seco interandino, caracterizado por temperaturas diurnas entre 18°C y 24°C y nocturnas entre 10°C y 14°C, con variaciones térmicas significativas y alta condensación durante las madrugadas.

Las condiciones climáticas promedio de la zona de estudio se resumen en la Tabla 11. Estas condiciones micro climáticas, combinadas con la topografía ondulada y la densidad foliar de los cultivos de pimiento, generan microambientes de alta humedad relativa que favorecen el desarrollo de patógenos fúngicos.

Tabla 11

Condiciones Climáticas Promedio de la Zona de Estudio

Variable	Valor Promedio
Temperatura diurna	20 °C
Temperatura nocturna	12 °C
Humedad relativa	78 %
Precipitación anual	850 mm
Altitud	2.300 m s. n. m.

Fuente: Adaptado de INAMHI (2023) y MAG (2024).

Estas condiciones ambientales, especialmente las altas fluctuaciones térmicas y los periodos de elevada humedad relativa, explican la recurrencia de Botrytis cinérea en los cultivos de pimiento de la zona. El dispositivo se instalará en el invernadero de la señora Consuelo Andrade ubicada en el cantón Urcuquí

Figura 9

Lugar de instalación del dispositivo IoT



Fuente: Google Maps

3.2.2. Identificación de la problemática fitosanitaria

En la zona de estudio, el cultivo de pimiento (Capsicum annuum) enfrenta importantes pérdidas económicas debido a la incidencia de Botrytis cinérea, comúnmente conocida como moho gris. Este patógeno se ve favorecido por la combinación de alta humedad relativa, presencia de punto de rocío y temperaturas moderadas, condiciones frecuentes en el área. Los agricultores dependen principalmente de métodos reactivos basados en la aplicación de fungicidas una vez que los síntomas son visibles, lo que genera costos elevados, resistencia del patógeno y contaminación ambiental.

3.2.3. Técnicas de recolección de información

Para el análisis de la situación actual se emplearon técnicas mixtas de investigación. Se realizaron observaciones directas en campo, entrevistas semiestructuradas a productores locales y revisión bibliográfica especializada. Las visitas al sitio permitieron evaluar las prácticas agrícolas actuales, las limitaciones de infraestructura (falta de energía eléctrica y conectividad) y las condiciones reales de los cultivos. Las encuestas permitieron cuantificar la incidencia histórica de la enfermedad y las estrategias de control utilizadas.

3.2.4. Análisis de resultados: Carencias tecnológicas

El procesamiento de los datos arrojados por las encuestas, contrastado con las notas de la observación física, hizo evidentes varias deficiencias operativas que reducen la rentabilidad del cultivo en el sector. A partir de esta tabulación, se identificaron las siguientes limitaciones críticas:

- Manejo netamente reactivo: Las respuestas de los agricultores confirmaron que el control de enfermedades depende casi en su totalidad de la inspección visual periódica. Para cuando el productor logra ver el moho gris en el tallo o fruto del pimiento, el tejido ya presenta un daño irreversible. Esto los obliga a aplicar

fungicidas costosos de emergencia para salvar el resto del lote, evidenciando la falta de estrategias de prevención.

- Carencia absoluta de datos microclimáticos: La totalidad de los encuestados desconoce los niveles reales de humedad y temperatura que se encierran debajo del follaje de sus plantas. Aunque algunos se guían por el clima general de la región, ignoran que el microclima a nivel de la raíz y las hojas bajas es mucho más húmedo, siendo este el ambiente exacto donde germina el patógeno.
- Brecha de conectividad en campo: Las encuestas y pruebas en sitio corroboraron que las parcelas de siembra no tienen acceso a redes Wi-Fi, y la cobertura de datos móviles (GSM/LTE) es intermitente o inexistente en las zonas más bajas de la topografía. Esta limitación técnica justifica plenamente la decisión de descartar módulos IoT comerciales dependientes de Internet y optar por el diseño de una red de radiofrecuencia autónoma (tecnología LoRa).
- Ausencia de red eléctrica: La observación confirmó que los cultivos se encuentran alejados de acometidas eléctricas residenciales. Este factor obliga a que los dispositivos de campo, como la placa Heltec V3 y los sensores, dependan exclusivamente de baterías recargables acopladas a pequeños paneles fotovoltaicos para garantizar un monitoreo ininterrumpido.

El análisis reveló varias carencias tecnológicas críticas. Los productores carecen de sistemas de monitoreo en tiempo real de las variables climáticas que favorecen Botrytis cinerea. Esta limitación impide la detección temprana de condiciones de riesgo, obligando a intervenciones reactivas y poco eficientes. Además, la ausencia de conectividad confiable y de fuentes de energía estables en las parcelas impide el uso de soluciones comerciales dependientes de internet o infraestructura eléctrica. Estas deficiencias justifican la necesidad de un sistema IoT autónomo, de bajo consumo y con transmisión LoRa.

3.2.5. Definición de variables críticas a monitorear

Como resultado del análisis de la situación actual, se definieron tres variables climáticas críticas para el monitoreo continuo del riesgo de *Botrytis cinerea*. La selección se basó en la biología del patógeno y en las condiciones ambientales predominantes en la zona de estudio.

- **Temperatura (T)**:

Constituye uno de los factores determinantes en el ciclo de vida del hongo. *Botrytis cinerea* presenta un rango óptimo de desarrollo entre 15 °C y 25 °C. Temperaturas fuera de este intervalo inhiben significativamente su actividad. El monitoreo preciso de esta variable permite identificar las ventanas térmicas de mayor riesgo.

- **Humedad Relativa (HR)**:

Es la variable de mayor peso en la germinación de las esporas. Cuando la HR supera el 85-90% de forma sostenida, se crean las condiciones ideales para la infección. En la zona de Santa Rosa, las noches con alta condensación hacen especialmente crítica esta medición.

- **Humedad del Suelo (HS)**:

Aunque no afecta directamente al patógeno foliar, influye indirectamente al aumentar la evaporación y la humedad relativa del microclima bajo el follaje. Su monitoreo permite correlacionar prácticas de riego con el riesgo de infección.

Adicionalmente, a partir de los valores de temperatura y humedad relativa se calcula en tiempo real el punto de rocío mediante la ecuación de Magnus-Tetens. Esta variable derivada es clave, ya que indica la formación de condensación sobre los tejidos vegetales, uno de los principales desencadenantes de la enfermedad.

La definición precisa de estas variables permitió enfocar el diseño del sistema en la captura eficiente de información relevante, evitando la incorporación de sensores innecesarios que incrementarían el costo y el consumo energético.

3.3. Definición y Análisis de Requerimientos

El éxito de una implementación IoT en entornos agrícolas depende directamente de una planificación metódica. Con el objetivo de que el sistema opere con la máxima eficiencia y responda a las necesidades reales del cultivo de pimiento, se han definido con precisión los requisitos técnicos necesarios para su desarrollo. Este proceso permite evaluar las condiciones del entorno y asegurar que la solución cumpla con los objetivos propuestos, basándose en directrices de ingeniería de sistemas. Para facilitar su interpretación, se ha establecido la nomenclatura detallada en la Tabla 11.

Tabla 12

Nomenclatura de Requerimientos

Abreviatura	**Descripción**
RDRS	Requerimientos de Stakeholders
RDS	Requerimientos del Sistema (Funcionales)
RDA	Requerimientos de Arquitectura

Fuente: Autoría

3.3.1. Identificación de Beneficiarios y Actores (Stakeholders)

Los requerimientos de los actores involucrados son el punto de partida fundamental para garantizar que el desarrollo satisfaga las expectativas de quienes interactúan con el sistema. En la Tabla 12 se identifican los roles clave, mientras que la Tabla 13 sistematiza los requerimientos prioritarios detectados a partir de las necesidades de cada perfil.

Tabla 13

Funciones de los Stakeholders

Lista de Stakeholders	
Usuario Directo	Consuelo Andrade

Lista de Stakeholders	
Desarrollador del proyecto	Bryan Patricio Sarabia Vilañez
Director del proyecto	MSc. Jaime Roberto Michilena Calderón
Asesor del proyecto	MSc. Suárez Zambrano Luis Edilberto

Fuente: Autoría

Tabla 14

Requerimientos por parte de Stakeholders (RDRS)

#	Requerimientos de Stakeholders	Prioridad		
		Alta	**Media**	**Baja**
RDRS1	Implementación en cultivos de pimiento.	x		
RDRS2	Monitoreo proactivo de *Botrytis*.	x		
RDRS3	Autonomía energética (solar).	x		
RDRS4	Interfaz intuitiva para usuarios no técnicos.	x		

Fuente: Autoría

3.3.2. Requerimientos Operativos (Autonomía y condiciones de campo)

La operatividad en campo presenta desafíos únicos, desde la exposición a condiciones meteorológicas variables hasta la necesidad de independencia energética. En la Tabla 14, se presentan los requerimientos que aseguran la resiliencia del prototipo, garantizando que el sistema sea capaz de monitorear el riesgo fitosanitario de forma autónoma, sin comprometer su integridad ante factores ambientales.

Tabla 15

Requerimientos Operativos

#	Requerimientos Operativos	Prioridad		
		Alta	**Media**	**Baja**
RDRS5	Operación continua 24/7 en campo.	X		
RDRS6	Protección física contra humedad (IP65).	X		
RDRS7	Acceso remoto mediante túnel seguro (Ngrok).		X	

Fuente: Autoría

3.3.3. Requerimientos Funcionales (Adquisición, Transmisión LoRa, Almacenamiento Local)

La arquitectura IoT requiere de capacidades funcionales robustas para transformar datos brutos en información valiosa para la toma de decisiones. En la Tabla 15, se detallan las funciones esenciales que permiten al sistema ejecutar la captura, procesamiento y notificación de riesgos, asegurando que la información fluya desde el cultivo hasta la interfaz del usuario sin fisuras ni pérdidas

Tabla 16

Requerimientos Funcionales del Sistema

#	Requerimientos del Sistema	Prioridad		
		Alta	**Media**	**Baja**
RDS1	Lectura cíclica de sensores (DHT22/suelo).	x		
RDS2	Transmisión de datos LoRa (915 MHz).	x		
RDS3	Procesamiento de riesgos fitosanitarios en Edge.	x		

#	Requerimientos del Sistema	Prioridad		
		Alta	**Media**	**Baja**
RDS4	Envío de notificaciones proactivas (Telegram).		X	

Fuente: Autoría

3.3.4. Requerimientos No Funcionales (Precisión, Energía, Costo)

Finalmente, los requerimientos no funcionales definen los estándares de calidad y viabilidad técnica que sostienen la propuesta. La **Tabla 3.6** sintetiza los criterios de desempeño, eficiencia energética y viabilidad económica. Estos elementos son cruciales, ya que no solo aseguran la precisión fitosanitaria necesaria para el control de *Botrytis cinerea*, sino que también validan la sostenibilidad y escalabilidad del proyecto como una solución técnica real para la comunidad agrícola.

Tabla 17

Requerimientos de Arquitectura

#	Requerimientos de Arquitectura	Prioridad		
		Alta	**Media**	**Baja**
	RDA - Hardware			
RDA1	Microcontrolador Heltec V3 (ESP32-S3).	X		
RDA2	Sensores (DHT22 + Humedad suelo).	X		
	RDA - Software			
RDA3	Node-RED Dashboard para visualización.		x	
RDA4	Backend con almacenamiento local (MariaDB).	X		
	RDA - Sistema Eléctrico			
RDA5	Sistema fotovoltaico con respaldo de batería.	X		

#	Requerimientos de Arquitectura	Prioridad		
		Alta	**Media**	**Baja**
RDA6	Aislamiento y protección del cableado interno.	X		

Fuente: Autoría

3.4. Selección Técnica de Hardware y Software

Para el diseño del sistema de monitoreo de *Botrytis cinérea* en cultivos de pimiento, se realizó un proceso de selección de componentes de hardware y plataformas de software, fundamentado en criterios de precisión fitosanitaria, robustez en condiciones de campo y capacidad de procesamiento de datos climáticos. Esta etapa resulta crítica, pues la correcta elección garantiza no solo la eficiencia técnica, sino también la viabilidad operativa frente a los retos del entorno agrícola, permitiendo que la solución tecnológica responda a las necesidades reales del agricultor.

3.4.1. Matriz de selección del Microcontrolador y Módulo de Radio (ESP32 LoRa vs. Alternativas)

La selección del nodo sensor priorizó el alcance inalámbrico para cubrir áreas de cultivo con limitaciones de infraestructura de red. Se comparó el ESP32 LoRa frente a alternativas de radiofrecuencia convencional mediante una matriz de decisión técnica.

Tabla 18

Selección de Microcontrolador para Nodo Sensor

Hardware	**Requerimientos**								**Valoración**
	RDRS2	**RDRS7**	**RDRS7**	**RDA1**	**RDA5**	**RDS1**	**RDS5**	**RDS**	**Total**
ESP32	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Hardware	Requerimientos								Valoración
	RDRS2	RDRS7	RDRS7	RDA1	RDA5	RDS1	RDS5	RDS	Total
ESP32 C3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Arduino Uno	0	1	1	0	0	1	0	0	3

1-Cumple

0-No Cumple

Elección: Microcontrolador ESP32 – 38 pines

Fuente: Autoría

Con base en la evaluación, se determinó que el ESP32 es la opción que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto. Su capacidad de integración inalámbrica y su potencia de procesamiento permiten gestionar el protocolo LoRa con una eficiencia energética óptima, siendo vital para los dispositivos desplegados en el cultivo de pimiento que deben operar de manera autónoma en condiciones ambientales exigentes.

Figura 10

ESP32 LoRa



3.4.2. Criterios de selección para sensores climáticos (DHT22 y Capacitivo)

La selección de los sensores se fundamentó en su capacidad para detectar umbrales críticos de proliferación del patógeno (*Botrytis* requiere Hum. >90% y Temp. 15-23°C). Se optó por el sensor capacitivo debido a su superioridad técnica sobre el resistivo, el cual presenta una rápida degradación por oxidación.

Tabla 19

Selección de sensores

Hardware	**Requerimientos**							**Valoración**
	RDRS2	**RDRS6**	**RDA2**	**RDA7**	**RDS8**	**RDS9**	**RDS17**	**Total**
DHT11	1	1	1	0	1	1	1	6
DHT22	1	1	1	1	1	1	1	7
DS18B20	1	1	1	1	1	1	0	6

1-Cumple

0-No Cumple

Elección: Sensor de Temperatura y Humedad DHT22

Fuente: Autoría

La elección del DHT22 responde a su fiabilidad en la medición de humedad relativa, factor determinante en la germinación de esporas de *Botrytis*. A diferencia de otras alternativas, este sensor ofrece un equilibrio necesario para que el sistema de monitoreo actúe de manera proactiva antes de que el moho gris comprometa el fruto, garantizando mediciones precisas y confiables en el tiempo.

Figura 11

Sensor DHT22



Fuente: Tomado Sensor de Temperatura y Humedad DHT22. Por (https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html)

3.4.3. Selección del Servidor Local (Raspberry Pi 4) y Gestor de Base de Datos

Para el procesamiento de datos en el borde (*Edge Computing*), se evaluó la necesidad de un servidor capaz de gestionar simultáneamente el *Gateway* LoRa, la lógica de control y el almacenamiento histórico. La selección de la Raspberry Pi 4 responde a su arquitectura basada en procesador ARM, la cual ofrece el equilibrio perfecto entre bajo consumo energético y capacidad de cómputo para ejecutar un sistema operativo Linux robusto.

La integración con MariaDB como gestor de base de datos se fundamenta en su alta eficiencia para la administración de series temporales. A diferencia de soluciones de almacenamiento ligero, MariaDB permite realizar consultas complejas en tiempo real, garantizando la integridad de los datos climáticos incluso durante los periodos en los que el sistema opera de manera autónoma, sin conexión a una red externa.

Tabla 20

Selección de Hardware para Nodo Central (Gateway)

Hardware	Requerimientos							Valoración
	RDRS1	RDRS4	RDS4	RDRS6	RDS7	RDA1	RDA6	Total
Raspberry Pi 4	1	1	1	1	1	1	1	7
Arduino Mega	0	1	0	1	0	0	0	2
Intel Galileo	1	0	0	0	1	0	0	2

1-Cumple

0-No Cumple

Elección: Microcontrolador Raspberry Pi 4

Fuente: Autoría

Figura 12

Raspberry Pi4



Fuente: Tomado Raspberry Pi 4, por (https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/)

3.4.4. Selección de herramientas de desarrollo (Arduino IDE, Node-RED)

El desarrollo del software se estructuró bajo un enfoque de capas para garantizar la estabilidad entre la adquisición de datos en el nodo y la visualización en el servidor. La elección de Arduino IDE para el firmware responde a su madurez técnica y al soporte nativo para la gestión de protocolos SPI e I2C, esenciales para el manejo de los sensores climáticos y el transceptor LoRa.

Por otro lado, la adopción de Node-RED como orquestador central del sistema representa una decisión estratégica. Esta plataforma de programación basada en flujos permite integrar de manera nativa la ingesta de datos a través del puerto serial, la inserción automatizada en MariaDB y la construcción del *Dashboard* en una única interfaz. Esta arquitectura desacoplada no solo reduce la complejidad de mantenimiento técnico, sino que también facilita futuras actualizaciones y la escalabilidad del sistema, permitiendo que el desarrollo se centre en la mejora de la detección fitosanitaria y no en la complejidad del código fuente.

Tabla 21

Selección de Software para Nodo Sensor

Hardware	**Requerimientos**								**Valoración**
	RDRS4	**RDRS6**	**RDS2**	**RDS5**	**RDS7**	**RDS14**	**RDA5**	**RDA6**	**Total**
Arduino IDE	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Python	1	1	1	1	1	1	0	0	6

1-Cumple

0-No Cumple

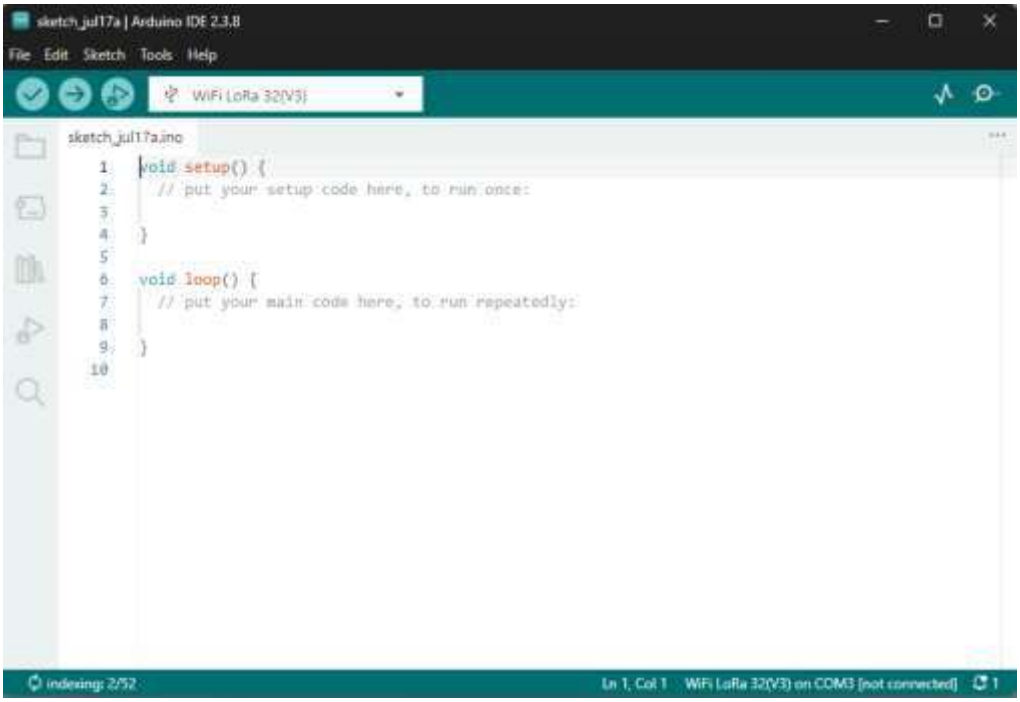
Elección: Arduino IDE

Fuente: Autoría

Para la programación de los nodos, se seleccionó Arduino IDE por su amplia compatibilidad y soporte comunitario, mientras que para el servidor central, Node-RED facilita la orquestación visual de los flujos de datos. Esta combinación tecnológica reduce la complejidad de implementación, permitiendo que el sistema de monitoreo sea escalable, sencillo de mantener durante las pruebas de campo y capaz de proporcionar una interfaz clara para el usuario final.

Figura 13

IDE Arduino



Fuente: Autoría entorno de IDE de Arduino para la programación

3.5. Diseño de la Arquitectura del Sistema

El sistema se diseñó bajo una topología en estrella compuesta estrictamente por dos nodos sensores autónomos y un gateway local coordinador basado en Raspberry Pi 4. Esta configuración garantiza simplicidad, confiabilidad y bajo consumo energético, siendo adecuada para las condiciones climáticas templado-secas interandinas de la Comunidad de

Santa Rosa, Cantón San Miguel de Urcuquí, provincia de Imbabura, a aproximadamente 2300 m s.n.m. (Hallasi et al., 2026).

Los nodos sensores, basados en ESP32 con módulo LoRa SX1262, adquieren exclusivamente las variables temperatura (T), humedad relativa (HR) y humedad del suelo (HS). Cada nodo incorpora un identificador único y opera en modo Deep Sleep con intervalos de 15 minutos. La transmisión inalámbrica se realiza mediante LoRa en la frecuencia de 915 MHz, conforme al Plan AU915 regulado por la ARCOTEL (ARCOTEL, 2021).

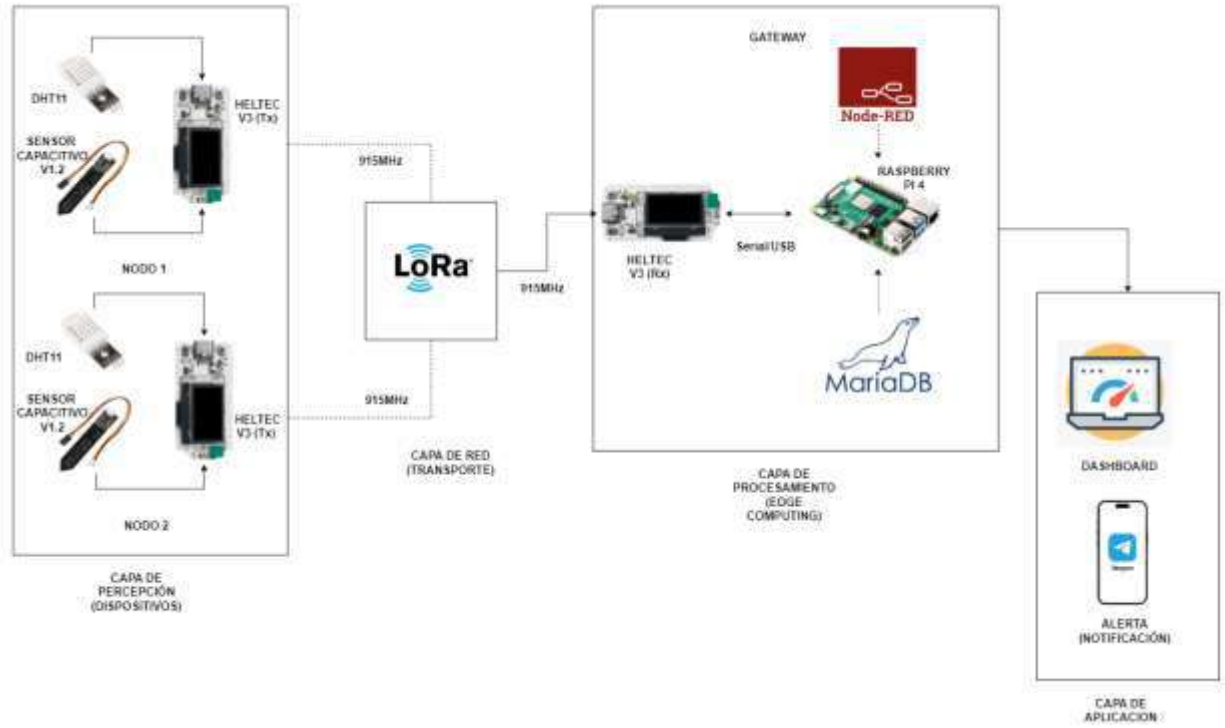
El gateway coordinador utiliza una Raspberry Pi 4 que recibe los paquetes a través de un módulo receptor Heltec (ESP32) conectado vía USB. En esta unidad se ejecuta el procesamiento perimetral mediante Node-RED, se calcula analíticamente el punto de rocío mediante la ecuación de Magnus-Tetens y se almacenan los datos en MariaDB, generando alertas automatizadas vía API de Telegram cuando se detectan condiciones favorables para *Botrytis cinerea* (Hernández-Torres et al., 2024; Campillay-Llanos et al., 2025).

3.5.1. Arquitectura General IoT y Topología de Red en Estrella

La arquitectura propuesta se organiza lógicamente en tres niveles jerárquicos de operación: percepción, comunicación y aplicación. Físicamente, esta distribución se despliega sobre el terreno bajo una topología de red en estrella, tal como se detalla en la

Figura 14

Diagrama arquitectónico del sistema IoT y topología de red en estrella



Fuente: Autoria

En esta configuración estructural, los múltiples dispositivos finales (nodos sensores instalados a lo largo de las hileras de pimiento) actúan como periféricos de transmisión independientes. Ninguno de estos equipos posee la capacidad ni la instrucción lógica de comunicarse entre sí; todos dirigen sus paquetes de datos de forma unidireccional hacia un único nodo coordinador central (el Gateway).

La selección de la topología en estrella frente a alternativas como las redes en malla (*mesh*) se justifica fundamentada en la eficiencia de recursos. Al evitar que los nodos actúen como repetidores de información de terceros, los microcontroladores de campo pueden permanecer en estado de suspensión profunda la mayor parte del tiempo, maximizando la autonomía de las baterías.

3.5.2. Diseño de la Capa de Percepción: Nodos Sensores Autónomos

La capa de percepción representa el nivel físico o la "frontera" de la red (*Edge*), situada directamente dentro del microclima de la plantación. Su función principal es la transducción y digitalización: convertir el estado físico del entorno agrario en información procesable.

Cada nodo autónomo está gobernado por la placa de desarrollo Heltec WiFi LoRa 32 V3. El diseño operativo de esta capa se fundamenta en un ciclo de trabajo (*Duty Cycle*) estrictamente segmentado para garantizar el cumplimiento del requerimiento operativo de autonomía energética (RO-01).

El procesador ESP32-S3 está programado para salir de su estado de hibernación (*Deep Sleep*) en intervalos definidos de 15 minutos. Al despertar, energiza momentáneamente los periféricos y adquiere las lecturas del sensor digital DHT22 (temperatura y humedad relativa del aire) y del sensor analógico capacitivo (humedad volumétrica del suelo). Tras capturar estas variables, el microcontrolador empaqueta los valores numéricos junto a su identificador de nodo (ID) en una trama de datos, la entrega al módulo de radio para su emisión electromagnética y retorna de inmediato a su modo de ultra bajo consumo (consumiendo apenas microamperios).

3.5.3. Diseño de la Capa de Comunicación: Protocolo LoRaWAN (915 MHz)

Para solventar la carencia de infraestructura de banda ancha e Internet móvil en la zona de siembra, la capa de enlace y transporte de datos se estructuró utilizando tecnología de espectro ensanchado y modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), característica del estándar LoRa.

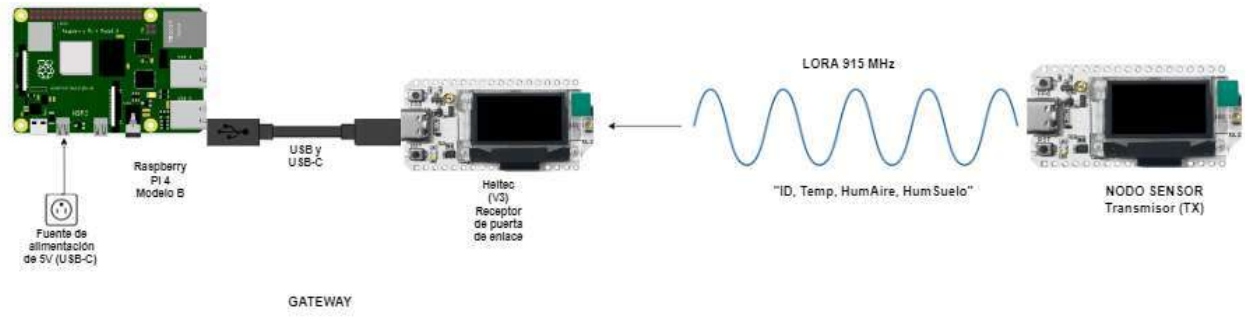
El sistema se configuró para operar en la banda ISM de 915 MHz, cumpliendo con la normativa de uso libre de espectro radioeléctrico para la Región 2 de la UIT (aplicable en Ecuador). La elección de esta frecuencia sub-gigahercio constituye una decisión crítica de ingeniería electromagnética; a diferencia de los protocolos tradicionales como Wi-Fi (2.4 GHz)

o Bluetooth, cuyas señales sufren alta atenuación al colisionar con el agua contenida en las hojas de las plantas, las ondas de 915 MHz poseen una mayor longitud de onda. Esta característica les otorga una capacidad superior de penetración y difracción a través del denso follaje del cultivo de pimiento, logrando enlaces robustos a largas distancias.

El Gateway receptor, ubicado en la infraestructura física del productor (caseta de control), mantiene su transceptor en modo de escucha continua (*Continuous Receive*). Al capturar una trama válida proveniente del campo, demodula la señal de radiofrecuencia y transfiere la carga útil de datos (Payload) hacia la unidad de procesamiento central mediante una interfaz serial alámbrica.

Figura 15

Diseño de la trama de comunicación

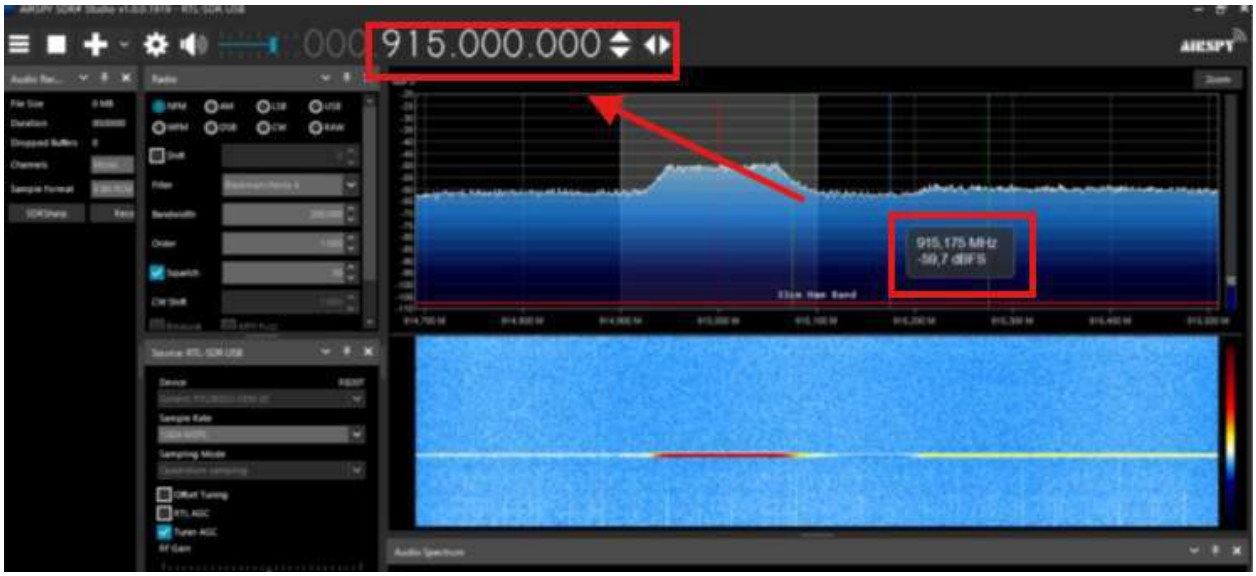


Fuente: Autoría

Para poder verificar que las placas de desarrollo tanto las transmisoras (Tx) como las receptoras (Rx) operaban en la frecuencia establecida 915 MHz se procedió a realizar la comprobación por medio del uso del RTL-SDR

Figura 16

Verificación de la frecuencia LoRa V3



Fuente: Autoría

3.5.4. Diseño de la Capa de Aplicación: Servidor Local y Dashboard de Monitoreo

La capa de aplicación representa el "cerebro" analítico del sistema y la interfaz directa con el agricultor. Esta arquitectura fue desplegada sobre una microcomputadora Raspberry Pi que actúa como servidor local (Gateway) y núcleo de procesamiento perimetral (*Edge Computing*).

El flujo de procesamiento de datos fue diseñado utilizando la plataforma basada en eventos Node-RED. Una vez que el Gateway recibe la trama serial, el motor lógico extrae las variables y las somete a un algoritmo de evaluación condicional. Este algoritmo cruza en tiempo real los valores de humedad relativa (≥85 %) y temperatura (15 °C - 25 °C) para determinar si el cultivo se encuentra en la ventana biológica de riesgo fitosanitario.

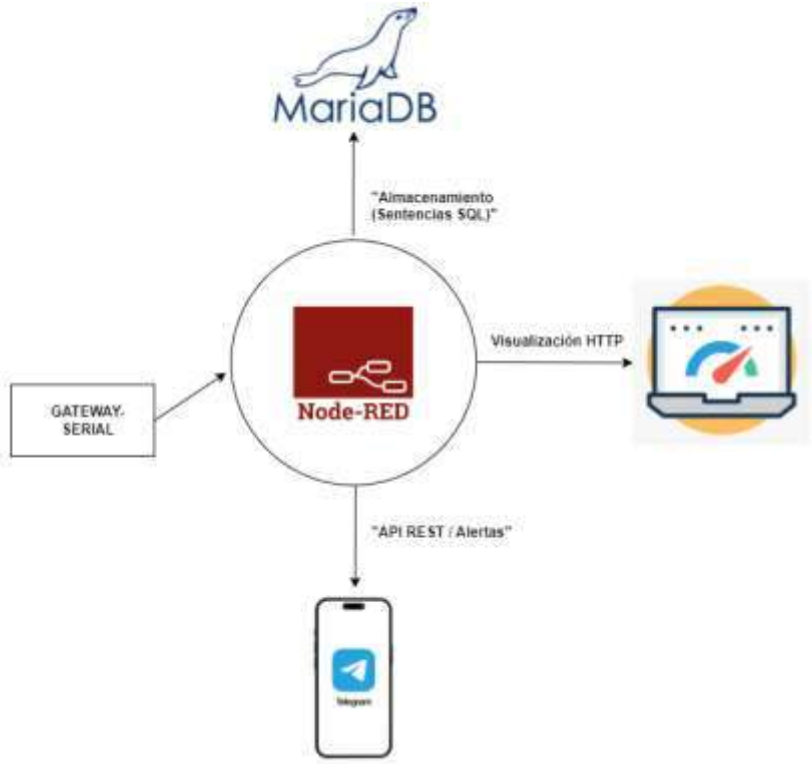
Para el almacenamiento histórico y la toma de decisiones a largo plazo, el sistema integra un Sistema Gestor de Bases de Datos relacional (MariaDB), donde se insertan automáticamente todas las telemetrías válidas. A nivel de usuario, la visualización se resolvió

mediante un *Dashboard* interactivo con medidores semafóricos que indican el nivel de estrés del cultivo.

Adicionalmente, para garantizar la ubicuidad del monitoreo sin depender de direcciones IP estáticas locales, se implementó un túnel inverso seguro mediante Ngrok, y se estableció una API de conexión hacia la plataforma Telegram, encargada de despachar alertas preventivas directamente al dispositivo móvil del operador en caso de peligro inminente.

Figura 17

Diagrama de la Capa de Aplicación.



Fuente: Autoría

3.6. Diseño Electrónico y Energético

Esta fase del diseño detalla la arquitectura de hardware a nivel de componentes, abarcando desde la gestión de energía ininterrumpida hasta el acondicionamiento de las señales capturadas por los biosensores, garantizando que el nodo soporte las condiciones de despliegue en campo cerrado o abierto.

3.6.1. Dimensionamiento del sistema de energía: Panel Solar y Batería Li-Ion

Para asegurar una operación ininterrumpida sin intervención humana en invernadero, el nodo sensor fue diseñado bajo el paradigma de recolección de energía (*Energy Harvesting*). El sistema de alimentación híbrido consta de una celda de iones de litio (formato 18650) como almacenamiento principal y un panel solar monocristalino de 6V y 200 mA como fuente de recarga continua.

El dimensionamiento técnico del circuito de alimentación se justifica mediante el cálculo del balance energético del sistema. En primer lugar, se determinó la demanda de corriente diaria del nodo sensor. Dado que el microcontrolador utiliza un esquema de gestión de energía con estados alternados (suspensión y actividad), el consumo total se rige por la siguiente ecuación:

$$C_{diario} = \left(I_{sleep} \cdot t_{sleep}\right) + \left(I_{activo} \cdot t_{activo}\right) \quad \textbf{(1)}$$

donde:

- C_{diario} es la demanda de capacidad diaria expresada en miliamperios-hora (mAh).
- I_{sleep} es la corriente drenada en el estado de suspensión profunda (0.4 mA).
- t_{sleep} es el tiempo total en horas que el dispositivo pasa en suspensión al día (23.6 h).
- I_{activo} es la corriente promedio drenada durante el encendido, lectura de sensores y transmisión LoRa (~100 mA).
- t_{activo} es el tiempo total en horas de actividad diaria, calculado en base a activaciones de 15 segundos cada 15 minutos (0.4 h).

Reemplazando los valores operativos del hardware en la ecuación, se obtiene:

$$C_{diario} = (0.4\ \text{mA} \cdot 23.6\ \text{h}) + (100\ \text{mA} \cdot 0.4\ \text{h}) \quad \textbf{(2)}$$

$$C_{diario} = 9.44 \text{ mAh} + 40.00 \text{ mAh} \quad \textbf{(3)}$$

$$C_{diario} = 49.44 \text{ mAh/día} \quad \textbf{(4)}$$

Estos resultados de demanda energética se consolidan a manera de resumen en la **Tabla 21** que se muestra a continuación.

Tabla 22

Presupuesto de Consumo Energético Diario (Demanda)

Estado de Operación	Consumo de Corriente (I)	Tiempo Diario Estimado (t)	Consumo Total Diario
Suspensión Profunda (*Deep Sleep*)	0.4 mA	23.6 h	9.44 mAh
Modo Activo (Lectura, OLED y LoRa Tx)	~100 mA	0.4 h (24 minutos)	40.00 mAh
Total, Demanda del Sistema			**~49.44 mAh/día**

Fuente: Autoria

En segundo lugar, se calculó la oferta energética del arreglo fotovoltaico periférico. La capacidad teórica de recarga diaria se determina mediante el producto de la corriente nominal del panel y la constante de radiación solar útil del emplazamiento:

$$G_{diaria} = I_{panel} \cdot \text{HSP} \quad \textbf{(5)}$$

Donde:

- G_{diaria} es la generación total diaria en mAh.

- I_{panel} es la corriente máxima de salida del panel solar (200 mA).
- HSP son las Horas de Sol Pico estimadas para la zona de estudio, asumiendo un escenario conservador de 4 horas diarias.

Reemplazando los valores técnicos del componente y las condiciones climáticas:

$$G_{diaria} = 200 \text{ mA} \cdot 4 \text{ h} \quad \textbf{(6)}$$

$$G_{diaria} = 800 \text{ mAh/día} \quad \textbf{(7)}$$

Los resultados de esta proyección de generación se desglosan en la Tabla 22 mostrada a continuación.

Tabla 23

Capacidad de Generación Solar (Oferta)

Componente	Especificación Técnica	Horas de Sol Pico (HSP)	Generación Diaria Teórica
Panel Solar Monocristalino	Voltaje: 6V Corriente Máx: 200 mA	4.0 h	800 mAh
Total, Generación del Sistema			**800 mAh/día**

Fuente: Autoría

Como se evidencia en el cálculo de ambas variables, la demanda total del nodo asciende a tan solo 49.44 mAh diarios. Aun bajo este esquema operativo de muestreo continuo de los biosensores, la capacidad de generación teórica del panel solar ($G_{diaria} = 800$ mAh) supera holgadamente el consumo del hardware ($C_{diario} = 49.44$ mAh). Este superávit energético garantiza que la celda de iones de litio recupere rápidamente la energía drenada durante las

horas de luz, manteniéndose en un ciclo de flotación óptimo que asegura una autonomía ininterrumpida frente a secuencias de días con baja radiación en el entorno agrícola.

3.6.2. Esquema de conexión electrónico del Nodo Sensor (Diagrama esquemático)

La topología de hardware del nodo sensor fue diseñada bajo estrictos criterios de integridad de señal, minimización de ruido electromagnético y eficiencia energética. El núcleo de procesamiento está gobernado por el módulo Heltec WiFi LoRa 32 V3, el cual orquesta la adquisición de datos de los sensores y administra la interfaz de radiofrecuencia.

Para garantizar la estabilidad del sistema en campo, el conexionado se dividió en tres etapas funcionales:

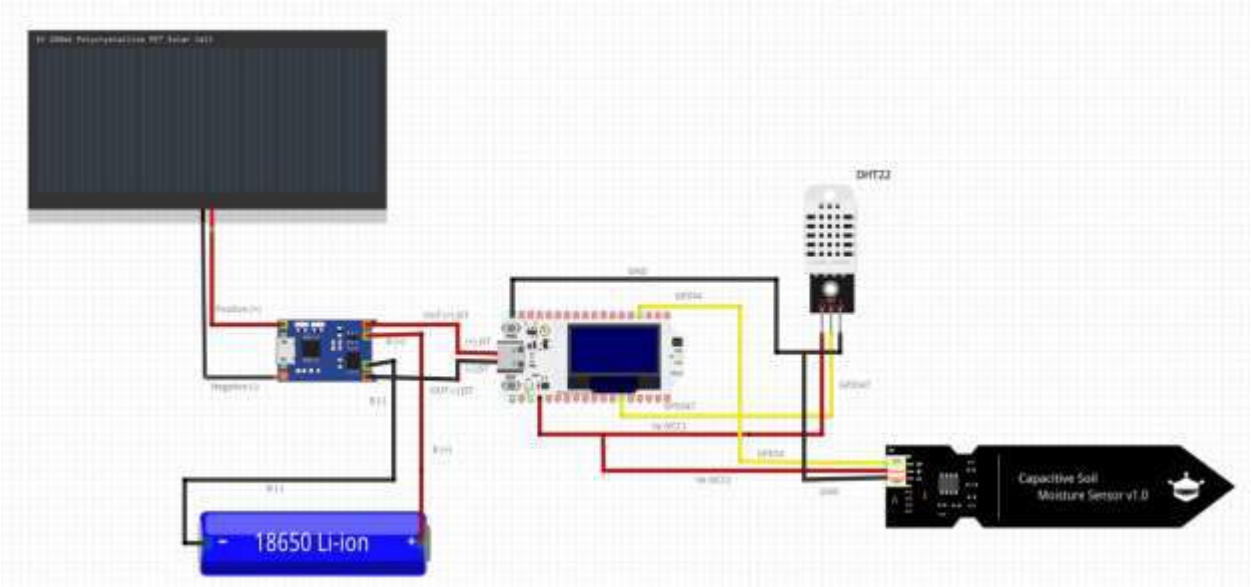
- **Etapa de Gestión de Potencia (Power Management):** La autonomía del sistema recae sobre un circuito controlador de carga dedicado. El arreglo fotovoltaico de 6V inyecta energía a la etapa de entrada de este controlador, el cual ejecuta un algoritmo de regulación de Corriente Constante / Voltaje Constante (CC/CV). Este proceso estabiliza la tensión para recargar la celda de iones de litio 18650 (conectada a los terminales B+ y B-) previniendo sobrecargas térmicas o sobredescargas profundas. La salida regulada del módulo (OUT+ y OUT-) se acopla directamente al puerto JST de la placa base, proveyendo un flujo energético lineal y libre de transitorios de tensión hacia el regulador LDO (Low Dropout) interno del microcontrolador ESP32.
- **Interfaz de Adquisición Digital (Microclima Ambiental):** El acondicionamiento del sensor de temperatura y humedad relativa (DHT22) se implementó a través de un bus de comunicación serial de un solo hilo (*Single-Wire*). El terminal de datos del sensor fue ruteado hacia el pin GPIO 47 del microcontrolador. Para prevenir discrepancias en los niveles lógicos y evitar el uso de conversores de nivel bidireccionales, el periférico fue energizado directamente desde el pin de salida de 3.3V (Ve/VCC) de la placa base.

Asimismo, se estableció una referencia equipotencial al conectar el terminal negativo al plano de masa común (GND) del sistema.

- **Interfaz de Adquisición Analógica (Humedad Edáfica):** Para la evaluación del estrés hídrico del sustrato, se integró el sensor capacitivo de humedad (v1.0/v1.2). A diferencia de los sensores resistivos, este componente mitiga la corrosión galvánica mediante la medición de la constante dieléctrica del medio. Su alimentación se fijó a 3.3V, y su señal de salida analógica fue canalizada hacia el pin GPIO 4. Este pin corresponde a uno de los canales del Conversor Analógico-Digital (ADC) del ESP32, el cual fue configurado vía software con la atenuación adecuada para mapear el voltaje de entrada aprovechando al máximo la resolución de 12 bits del hardware, garantizando así una alta fidelidad en la cuantificación de la variable física.

Figura 18

Esquema de conexión del Nodo Sensor



Fuente: Autoria *(Nota: Por limitaciones de la librería del software de esquematización gráfico, el panel fotovoltaico se ilustra con una etiqueta referencial de 5V; no obstante, el dimensionamiento físico corresponde a un arreglo de 6V - 200 mA)*

A fin de sistematizar la arquitectura de hardware expuesta y garantizar la trazabilidad de las conexiones para la construcción y replicabilidad del prototipo, se estructuró la matriz de enrutamiento físico del nodo sensor. En la **Tabla 23** se mapea detalladamente la correspondencia entre los terminales de los periféricos externos, el módulo de gestión de energía y los puertos específicos asignados en la placa de desarrollo. Esta asignación estricta establece el vínculo directo entre el diseño electrónico y la programación lógica, definiendo las rutas de hardware que el *firmware* utilizará para la correcta interpretación de las señales analógicas y digitales.

Tabla 24

Matriz de enrutamiento y asignación de pines del nodo sensor

Dispositivo Origen	Terminal / Pin	Dispositivo Destino	Terminal / Pin	Descripción de la Señal
Panel Solar (6V - 200 mA)	Positivo (+)	Controlador de Carga	IN (+)	Entrada de voltaje fotovoltaico
Panel Solar (6V - 200 mA)	Negativo (-)	Controlador de Carga	IN (-)	Referencia de masa (GND)
Batería Li-Ion (18650)	Positivo (+)	Controlador de Carga	B (+)	Terminal de carga/descarga
Batería Li-Ion (18650)	Negativo (-)	Controlador de Carga	B (-)	Referencia de masa (GND)
Controlador de Carga	OUT (+)	Placa Heltec V3	JST (+)	Alimentación principal (Power IN)

Dispositivo Origen	Terminal / Pin	Dispositivo Destino	Terminal / Pin	Descripción de la Señal
Controlador de Carga	OUT (-)	Placa Heltec V3	JST (-)	Masa común del sistema (GND)
Sensor DHT22	VCC (+)	Placa Heltec V3	3.3V (Ve)	Alimentación lógica del periférico
Sensor DHT22	GND (-)	Placa Heltec V3	GND	Masa común del sistema (GND)
Sensor DHT22	DATA	Placa Heltec V3	GPIO 47	Bus de datos digital (*Single-Wire*)
Sensor Capacitivo	VCC (+)	Placa Heltec V3	3.3V (Ve)	Alimentación analógica del periférico
Sensor Capacitivo	GND (-)	Placa Heltec V3	GND	Masa común del sistema (GND)
Sensor Capacitivo	AOUT	Placa Heltec V3	**GPIO 4**	Señal analógica (Hacia el ADC)

Fuente: Autoría

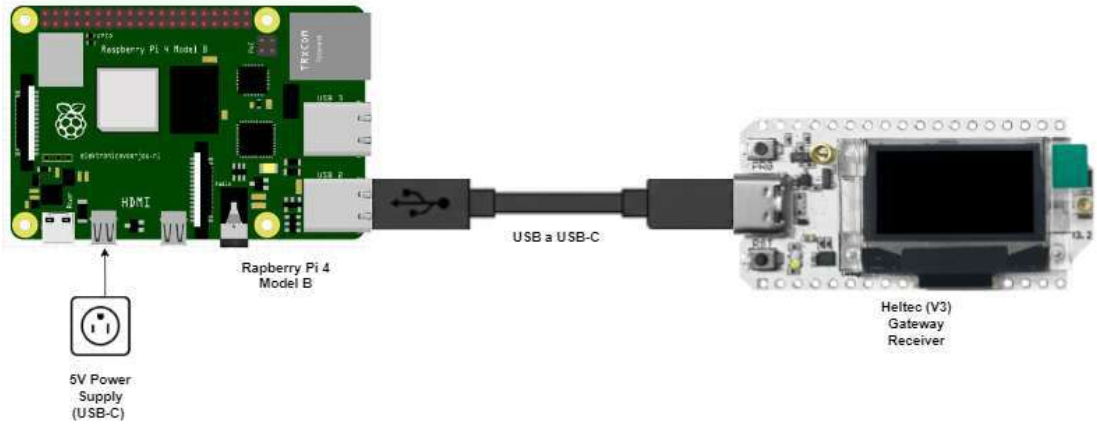
La declaración inmutable de esta matriz de pines en las variables globales del código fuente previene colisiones operativas con los periféricos internos del microcontrolador (tales como la pantalla OLED y el transceptor LoRa), asegurando una lectura íntegra y libre de ruido electromagnético en las líneas de los biosensores.

3.6.3. Esquema de conexión e interfaz del Nodo Coordinador (Gateway)

A diferencia de la complejidad del nodo de campo, la capa física del Gateway central tiene un diseño minimalista orientado a la estabilidad de transferencia de datos en interiores.

Figura 19

Esquema de conexión del Nodo Coordinador y servidor local.



Fuente: Elaboración propia.

El circuito consta únicamente de la placa receptora Heltec WiFi LoRa 32 V3 enlazada a la microcomputadora Raspberry Pi 4. La conexión se realiza de forma directa mediante un cable de datos USB a USB-C. Este enlace alámbrico cumple una doble función técnica:

- **Alimentación ininterrumpida:** La placa transceptora drena los 5V y la corriente necesaria directamente del bus USB de la Raspberry Pi, la cual está conectada a la red eléctrica residencial mediante su adaptador de corriente oficial de 15W.
- **Túnel de comunicación serial:** Los pines TX/RX del conversor USB-UART integrado en la placa Heltec transmiten las tramas demoduladas de LoRa directamente al puerto /dev/ttyUSB0 del sistema operativo Linux, donde Node-RED las intercepta.

3.6.4 Calibración y lectura de datos mediante sensores

Esta sección detalla el proceso de preparación, configuración y calibración de los sensores seleccionados previamente, los cuales están diseñados para realizar mediciones en tiempo real de las variables microclimáticas y edáficas esenciales para el monitoreo y prevención del patógeno *Botrytis cinerea*. Cada sensor ha sido adaptado según los

requerimientos específicos del entorno agrícola, permitiendo una captura eficiente, ininterrumpida y precisa de los datos relevantes para el control agronómico.

Los sensores empleados operan tanto en modalidad analógica como digital, dependiendo de la naturaleza de la variable física monitoreada. De este modo, la calibración adecuada y el correcto acondicionamiento de las señales no solo aseguran la fiabilidad de los datos recogidos, sino que también garantizan una respuesta eficiente del sistema automatizado de alertas tempranas, optimizando la toma de decisiones preventivas y favoreciendo el desarrollo óptimo del cultivo de pimiento.

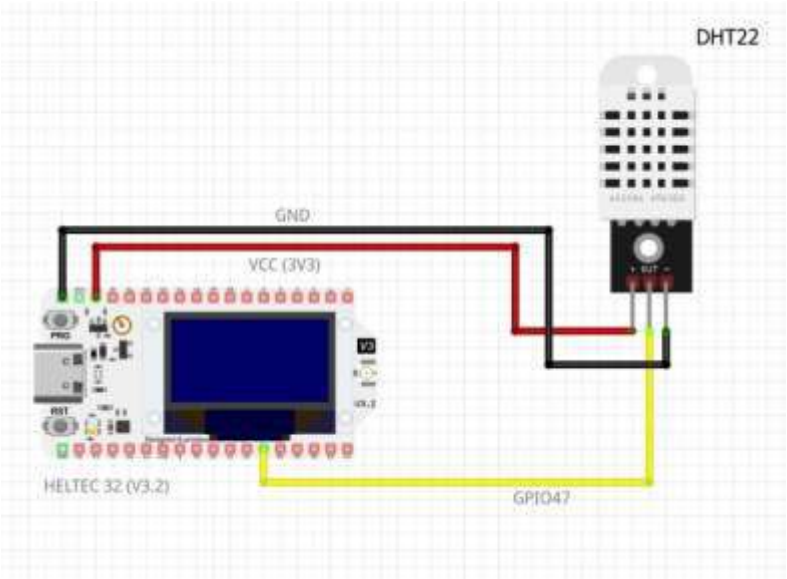
3.6.4.1. Adquisición de Datos de Temperatura y Humedad Ambiental

La adquisición de datos de temperatura y humedad del aire se realiza mediante el sensor DHT22, un dispositivo digital ampliamente utilizado en arquitecturas IoT por su alta precisión y estabilidad a largo plazo. Este sensor constituye el núcleo de percepción para evaluar el microclima del follaje, y su conexión se establece de forma directa con la placa de desarrollo Heltec WiFi LoRa 32 V3, tal como se ilustra en la Figura [Insertar número].

El circuito está configurado de manera que el pin de alimentación (VCC) del módulo DHT22 se conecta al pin de salida de 3.3V (3V3) de la placa base, garantizando niveles lógicos de voltaje compatibles sin necesidad de conversores externos. El pin de tierra (GND) del sensor se enlaza al pin GND común del microcontrolador. Finalmente, el terminal de datos (OUT) se conecta a un pin de Entrada/Salida digital del ESP32, específicamente el GPIO 47, estableciendo así el bus de comunicación *Single-Wire*. Al tratarse de un módulo preensamblado, este ya integra en su placa la resistencia *Pull-Up* necesaria entre la línea de datos y la alimentación, asegurando transiciones de señal limpias.

Figura 20

Esquema de conexión digital del sensor ambiental DHT22 al microcontrolador ESP32 (Heltec V3).



Fuente: Autoría

3.6.4.2. Adquisición de Datos de Humedad de Suelo

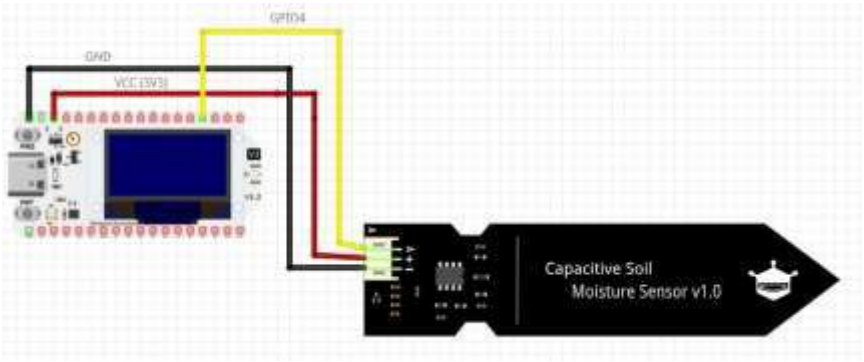
La recolección de los niveles de humedad edáfica se lleva a cabo mediante el sensor capacitivo de humedad de suelo (v1.0). A diferencia de los sensores resistivos tradicionales, este dispositivo analógico determina el contenido volumétrico de agua midiendo los cambios en la constante dieléctrica del sustrato, lo que evita el desgaste por corrosión galvánica y prolonga su vida útil en campo. Su integración física con el nodo sensor se detalla en la **Figura 15.**

Para su interconexión, el pin de alimentación (VCC) y el pin de tierra (GND) del sensor capacitivo se conectan a los respectivos terminales de 3.3V y GND de la placa Heltec V3. El pin de salida de señal analógica (AOUT) se enruta hacia el pin GPIO 4 del ESP32. Este pin corresponde a un canal del Conversor Analógico-Digital (ADC) del microcontrolador, encargado de cuantificar la variación de voltaje. Posteriormente, mediante la calibración por software, los valores crudos del ADC (obtenidos entre el estado totalmente seco y la

inmersión en agua) se interpolan para mapear la lectura a un rango porcentual preciso de 0 % a 100 % de humedad relativa del suelo.

Figura 21

Esquema de conexión analógica del sensor capacitivo de humedad de suelo al microcontrolador ESP32 (Heltec V3).



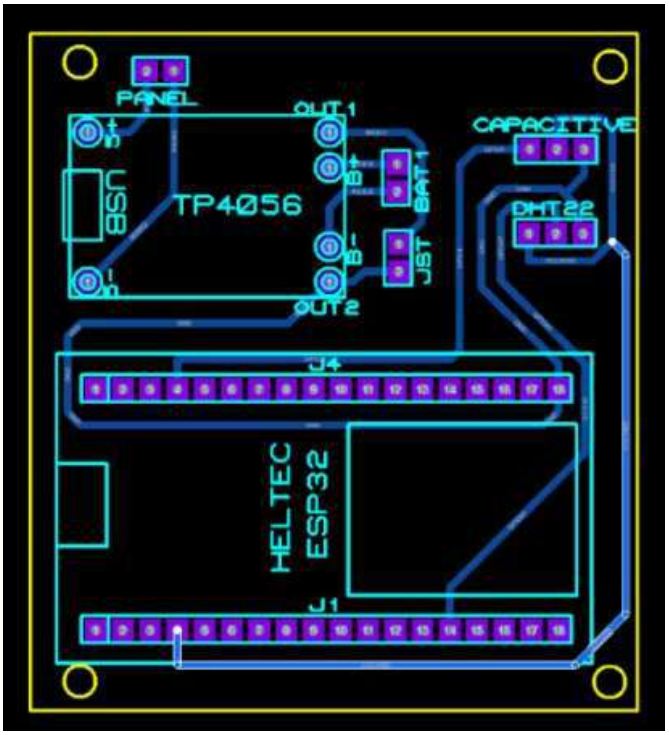
Fuente: Autoría

3.6.5. Diseño de PCB y encapsulamiento con protección IP65

Para evitar las falsas conexiones inherentes al uso de placas de pruebas (*protoboards*) y cables puente (*jumpers*), el circuito del nodo sensor se consolidó soldando los componentes sobre una placa de circuito impreso (PCB) perforada de fibra de vidrio. Se utilizaron regletas de pines hembra (*headers*) para permitir la extracción y reemplazo rápido tanto de la placa Heltec como del controlador TP4056 en caso de fallo técnico.

Figura 22

Diseño de la PCB



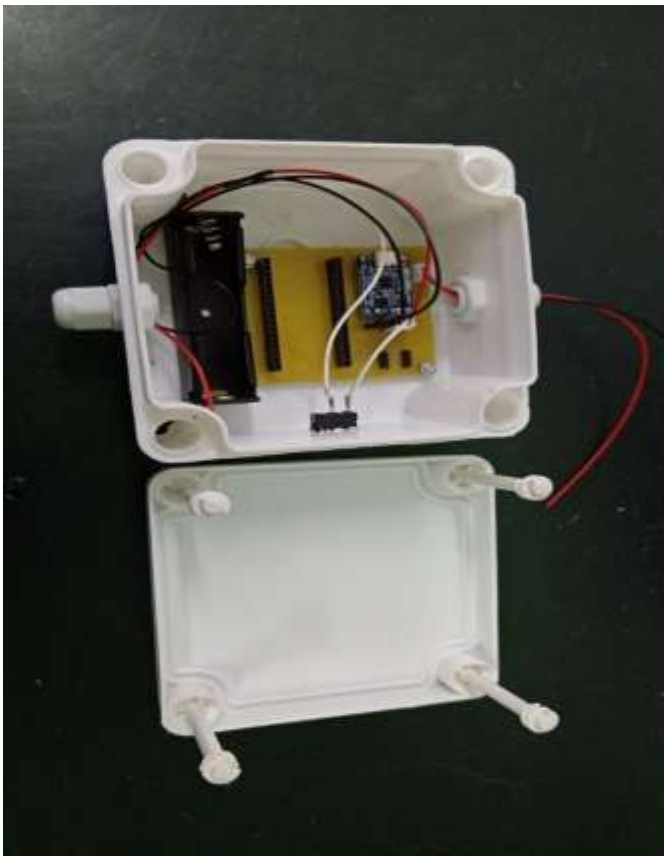
Fuente: Autoría

El encapsulamiento de la electrónica se realizó dentro de cajas de paso estancas de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) certificadas con un grado de protección **IP65**. Esta clasificación avala que el habitáculo es totalmente hermético contra la entrada de polvo y resistente a chorros de agua de baja presión, condiciones habituales por la lluvia y los sistemas de riego por aspersión.

Para la salida del cableado de los sensores hacia el exterior de la caja, se instalaron prensaestopas (glándulas de cable) en la cara inferior del encapsulamiento. Esta orientación mecánica asegura que, por gravedad, el agua resbale por el cable sin posibilidad de infiltrarse en la caja. Adicionalmente, el sensor DHT22 se resguardó dentro de un protector de radiación térmica ventilado, evitando que el calentamiento por incidencia solar directa distorsione la lectura de temperatura del aire que rodea a la planta de pimiento.

Figura 23

Protección IP65



Fuente: Autoría

3.7. Diseño de Software y Lógica de Control

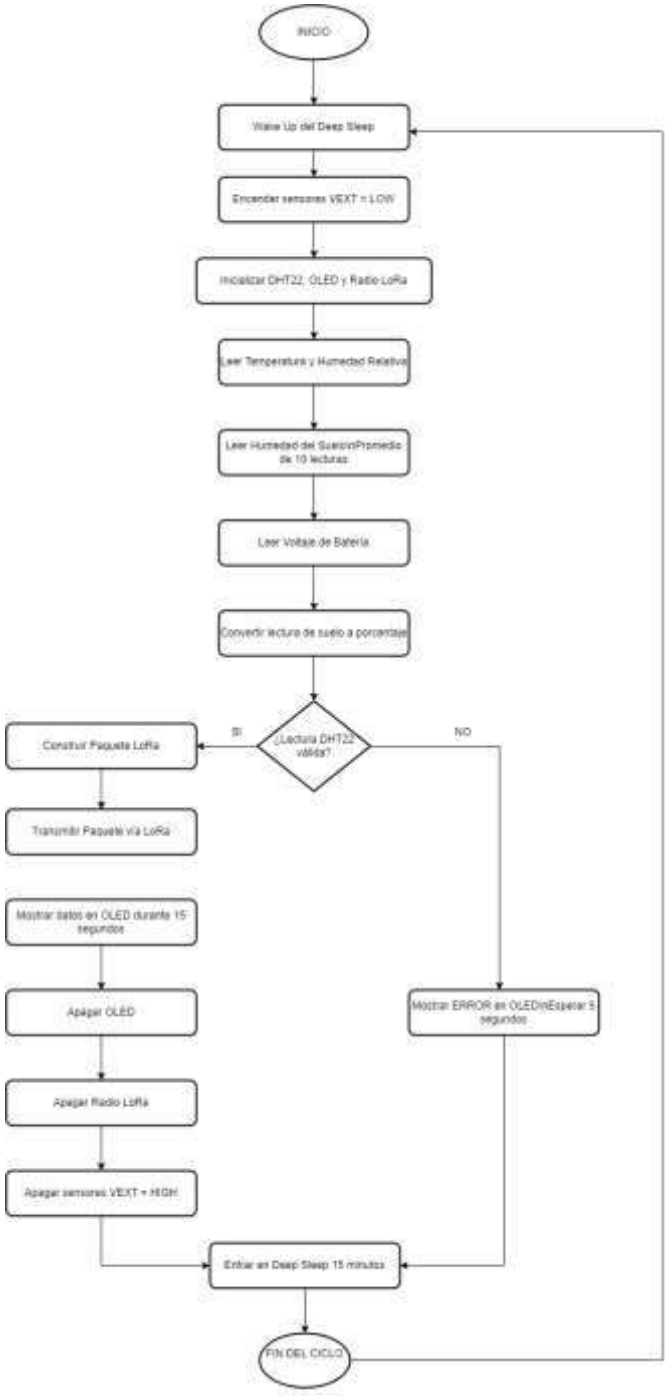
Esta sección detalla la arquitectura lógica y computacional desarrollada para el sistema de monitoreo. El diseño del software se dividió en dos entornos principales: el *firmware* embebido en el microcontrolador de la capa de percepción (programado en lenguaje C++ mediante el IDE de Arduino) y el flujo de procesamiento perimetral alojado en el servidor local (desarrollado en el entorno visual basado en eventos, Node-RED). El objetivo del código es garantizar una recolección de datos precisa, optimizar el consumo energético y evaluar en tiempo real las condiciones biológicas de riesgo.

3.7.1. Diagrama de flujo del firmware del Nodo Sensor (Modos de bajo consumo)

La programación de la placa Heltec WiFi LoRa 32 V3 se desarrolló en lenguaje C++ bajo el entorno de Arduino IDE. El núcleo lógico de este firmware no es un bucle infinito tradicional (loop()), sino una máquina de estados orientada a la eficiencia energética, cuyo comportamiento se describe en el diagrama de flujo de la Figura 11.

Figura 24

Diagrama de flujo del firmware del Nodo Sensor



Fuente: Elaboración propia

El funcionamiento del nodo se basa en un ciclo de eficiencia energética que comienza despertando al microcontrolador desde un modo de bajo consumo para activar los sensores mediante la gestión de energía *VEXT*, lo cual evita consumos innecesarios en reposo. Una vez activo, el sistema captura los datos del sensor DHT22 y realiza un promedio de diez lecturas del sensor capacitivo de suelo para obtener un valor de humedad estable y libre de ruido eléctrico, validando posteriormente la coherencia de la información para evitar la transmisión de registros erróneos o incompletos hacia la base de datos central.

Tras validar los datos, el nodo transmite la telemetría a través del protocolo LoRa y muestra la información en su pantalla OLED durante quince segundos para facilitar la supervisión técnica directamente en el invernadero. Finalmente, el firmware ejecuta una rutina de apagado sistemático de todos los periféricos y el radio de comunicación, retornando al modo de *Deep Sleep* por un intervalo de quince minutos. Este proceso cíclico asegura una trazabilidad continua del microclima y un uso optimizado de la batería, garantizando la fiabilidad técnica necesaria para la gestión fitosanitaria ante riesgos como la *Botrytis cinerea*

3.7.2. Lógica del algoritmo de detección de riesgo de *Botrytis cinérea*

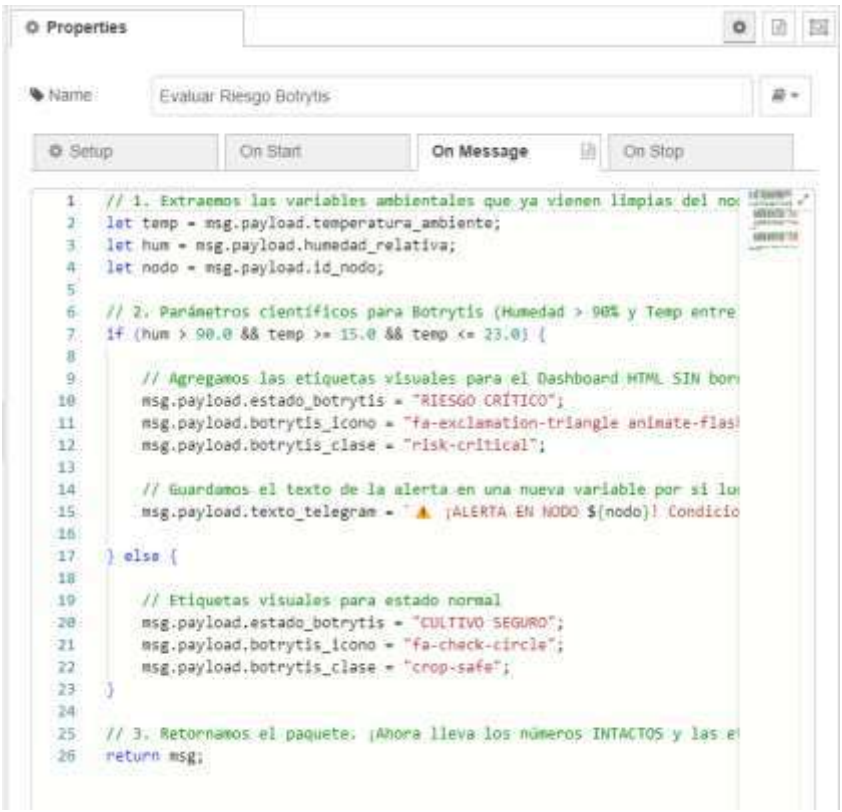
En el servidor local (Raspberry Pi 4), la orquestación de la información recae sobre Node-RED. Dentro de este entorno, se programó un nodo de función (Function Node) utilizando JavaScript para evaluar las tramas entrantes.El algoritmo determinista fue diseñado para evitar falsas alarmas, cruzando los datos telemétricos con los umbrales biológicos del patógeno. La lógica condicional evalúa dos premisas simultáneas:

- Condición 1 (Humedad): ¿La humedad relativa del aire HR es estrictamente superior al 90%?
- Condición 2 (Temperatura): ¿La temperatura ambiente T se encuentra dentro del rango de germinación, es decir, entre 15°C y 23°C?

Si la temperatura supera los 25°C, el algoritmo determina que el estrés térmico inhibe el crecimiento del moho gris, por lo que el nivel de riesgo desciende a "Bajo", incluso si la humedad es alta. Solo cuando ambas condiciones se cumplen de manera concurrente, la variable de estado interno cambia a true, habilitando el flujo hacia las salidas de alerta.

Figura 25

Lógica del algoritmo



Fuente: Autoría

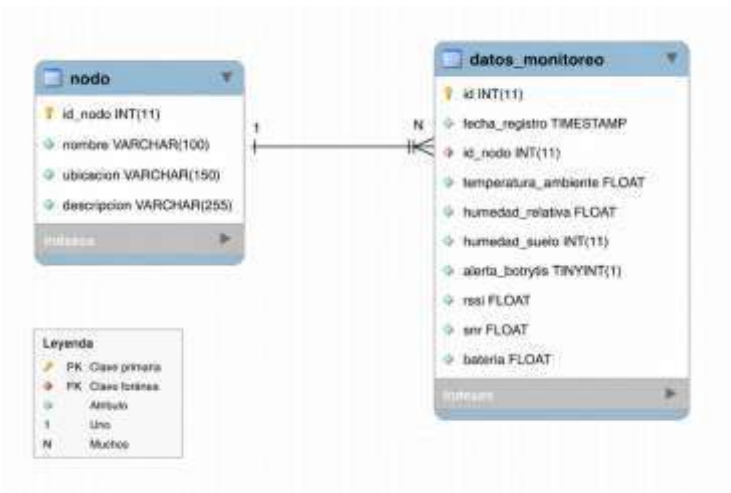
3.7.3. Diseño del Modelo Entidad-Relación de la Base de Datos Local

Para cumplir con el requerimiento de persistencia de datos y posibilitar futuros análisis estadísticos del microclima en Urcuquí, se diseñó un modelo relacional ligero implementado sobre MariaDB.

Al tratarse de datos secuenciales (Time-Series), se priorizó la velocidad de inserción sobre la normalización extrema. El diseño estructural se ilustra en el Modelo Entidad-Relación (MER) de la Figura 13.

Figura 26

*Modelo Entidad-Relación de la base de datos local***.**



Fuente: Elaboración propia.

El modelo entidad-relación está conformado por dos entidades: Nodo, que almacena la información de cada dispositivo LoRa, y Datos_monitoreo, que registra las mediciones ambientales enviadas por dichos dispositivos. Ambas entidades se relacionan mediante una relación de uno a muchos, ya que un nodo puede generar múltiples registros de monitoreo a lo largo del tiempo, mientras que cada registro pertenece únicamente a un nodo. La clave primaria identifica de manera única cada registro y la clave foránea mantiene la integridad referencial entre ambas tablas.

3.7.4. Diseño de la Interfaz de Usuario (Dashboard) y visualización de datos

La capa de presentación de cara al agricultor se construyó utilizando el módulo Node-RED Dashboard. El diseño de la Interfaz de Usuario (UI) se rigió por el requerimiento operativo de "claridad en la interpretación" (RO-03), evitando sobrecargar la pantalla con matrices numéricas complejas.

La distribución visual se divide en dos secciones operativas:

- Monitoreo en Tiempo Real: Implementación de medidores de aguja (Gauges) codificados por colores (semáforos). El color verde indica parámetros dentro del rango seguro, el amarillo advierte de cercanía a los umbrales críticos, y el rojo señala el estado de riesgo inminente de Botrytis.
- Análisis de Tendencias: Gráficos de líneas temporales (Line Charts) que muestran el comportamiento de la humedad y la temperatura en las últimas 24 horas. Esta herramienta permite al productor observar visualmente si las madrugadas están generando periodos de condensación peligrosos bajo el follaje.

3.7.5. Configuración del sistema de alertas locales y notificaciones

Uno de los componentes fundamentales del sistema es el módulo de evaluación de riesgo fitosanitario para *Botrytis cinerea*. Esta lógica se implementó en el entorno de Node-RED dentro del gateway basado en Raspberry Pi 4, permitiendo la detección temprana de condiciones ambientales propicias para el desarrollo del patógeno y la generación de alertas preventivas.

La lógica de alertas se basa en los principales factores climáticos identificados en estudios recientes (Campillay-Llanos et al., 2025). Se evalúan en tiempo real las siguientes variables:

- Temperatura ambiente entre 15 °C y 25 °C.
- Humedad relativa superior al 85 %.
- Punto de rocío calculado mediante la ecuación de Magnus-Tetens.
- Humedad del suelo como factor de agravamiento.

El cálculo del punto de rocío se realiza mediante la siguiente expresión matemática:

$$T_d = \frac{b \cdot \alpha(T, RH)}{a - \alpha(T, RH)} \quad \textbf{(8)}$$

donde:

$$\alpha(T, RH) = \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{a \cdot T}{b + T} \quad (9)$$

utilizando los coeficientes $a = 17.625$y $b = 243.04$(Hernández-Torres et al., 2024).

La evaluación clasifica el riesgo en tres niveles (Bajo, Moderado y Alto) mediante un nodo de tipo *Function* en Node-RED. Cuando se detecta un riesgo moderado o alto, el sistema genera un mensaje estructurado que incluye los valores medidos, el punto de rocío y una recomendación práctica. Este mensaje se envía automáticamente a través de la API de Telegram utilizando un nodo específico.

Esta implementación permite pasar de un sistema de monitoreo pasivo a uno de alerta predictiva, cumpliendo con uno de los objetivos específicos del trabajo: generar alertas preventivas para el manejo integrado de la enfermedad en cultivos de pimiento.

El eslabón final de la arquitectura de software es el mecanismo de notificación proactiva. Para asegurar que el agricultor reciba la información incluso si no está observando el Dashboard, se integró la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) de Telegram.

La configuración requirió la creación de un Bot a través de BotFather, obteniendo un Token de autenticación y el identificador del chat (Chat_ID) del usuario final. Cuando el algoritmo de riesgo descrito en la sección 3.7.2 emite un estado positivo, Node-RED formatea un mensaje de texto plano con los valores exactos que dispararon la alarma (Ej: "ALERTA ALTA: Humedad al 94% y Temperatura en 18°C. Riesgo inminente de Botrytis en el sector 1"). Posteriormente, el sistema ejecuta una petición HTTP POST segura hacia los servidores de Telegram, entregando la notificación Push de manera instantánea al dispositivo móvil del productor.

Capitulo IV: Pruebas de funcionamiento

4.1. Introducción al Capítulo

En el presente capítulo, se detalla el proceso de validación experimental del prototipo IoT diseñado para el monitoreo de *Botrytis cinérea* en el cultivo de pimiento. El propósito central de esta etapa es demostrar que la arquitectura propuesta no solo cumple con los requerimientos técnicos especificados en la sección 3.3, sino que posee la capacidad operativa necesaria para funcionar de manera estable y eficiente en un entorno real.

A lo largo de este apartado, se documentan las pruebas de funcionamiento llevadas a cabo en sus distintas etapas: desde la verificación de la conectividad en la capa física y la correcta integración del procesamiento en el *Edge*, hasta la entrega efectiva de información al usuario final mediante la interfaz y los sistemas de alerta proactiva. Este enfoque integral permite confirmar que cada subsistema, desde los nodos sensores hasta la lógica de decisión en el servidor local, opera en perfecta sincronía.

Finalmente, los resultados expuestos no solo sirven para validar el cumplimiento de los objetivos generales y específicos planteados al inicio de esta investigación, sino que también proporcionan evidencia técnica sobre la viabilidad, autonomía y precisión del sistema. Este ejercicio de validación constituye, en esencia, la prueba de concepto final que garantiza que el sistema está preparado para asistir al agricultor en la toma de decisiones informadas para la protección de sus cultivos.

4.2. Pruebas de Configuración y Funcionamiento del Hardware

Previo a la instalación a la intemperie, se desarrollaron pruebas de estrés y verificación de interfaces a nivel de placa para aislar y corregir posibles fallos de *hardware*. Esta fase garantizó que los transceptores, sensores y módulos de potencia operaran dentro de los márgenes teóricos calculados en la etapa de diseño.

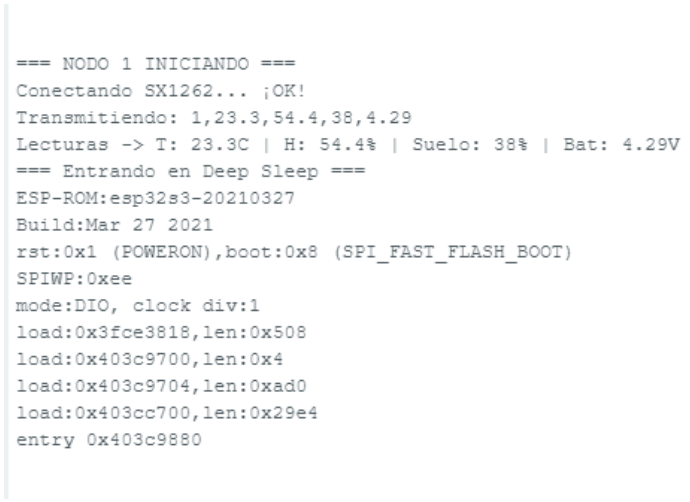
4.2.1. Pruebas de conectividad de los nodos sensores

El primer nivel de validación empírica se enfocó en auditar la capa de percepción física y la lógica de control embebida en el microcontrolador de la placa Heltec WiFi LoRa 32 V3. El objetivo fue certificar que el proceso de adquisición analógico-digital, el acondicionamiento de señales y el empaquetamiento de la carga útil (*Payload*) se ejecutaran sin latencias críticas ni excepciones de memoria.

Para esta evaluación, se estableció una conexión serial directa de depuración a una tasa de 115200 baudios entre el nodo y la estación de trabajo. Se aplicaron perturbaciones físicas controladas sobre los periféricos; específicamente, fluctuaciones térmicas forzadas sobre el sensor DHT22 y variaciones volumétricas en la permitividad dieléctrica del medio para la sonda capacitiva. El análisis del volcado de registro (*log*) en el Monitor Serial confirmó que el *firmware* captura correctamente los estímulos, aplica las fórmulas de calibración, estructura el vector de datos en el formato CSV estandarizado y ejecuta exitosamente la interrupción por *timer*, entrando y saliendo del estado de suspensión profunda (*Deep Sleep*) con una precisión temporal absoluta respecto al ciclo programado.

Figura 27

Verificación de conectividad de los nodos sensores



Fuente: Autoría

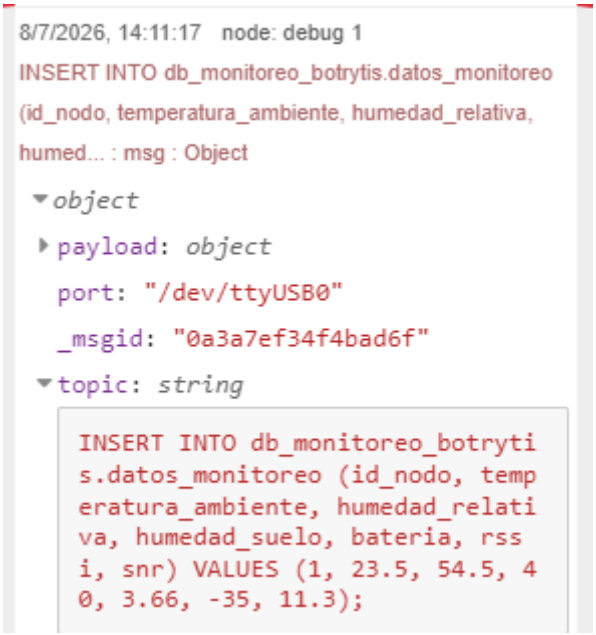
4.2.2. Pruebas de integración del Gateway

La validación del segmento de interconexión requirió auditar el comportamiento del nodo coordinador operando en conjunto con el servidor local (microcomputadora Raspberry Pi 4). Esta prueba determinó la capacidad del sistema para sostener una escucha activa estable en la banda ISM de 915 MHz, demodular las tramas de espectro ensanchado y canalizar los datos hacia la capa de aplicación.

El ensayo de integración certificó que la Raspberry Pi, a través de la interfaz de comunicación serial asíncrona por bus USB (/dev/ttyUSB0), captura el flujo de datos sin presentar pérdida de paquetes (*Packet Loss* = 0 %) en condiciones de laboratorio bajo línea de vista directa (LoS). Además de la decodificación de la carga útil principal, se verificó la correcta extracción de las métricas inherentes a la calidad del enlace radioeléctrico provistas por el transceptor: el Indicador de Fuerza de Señal Recibida (RSSI) cuantificado en decibelios-milivatio (dBm) y la Relación Señal a Ruido (SNR) expresada en decibelios (dB). La lectura correcta y estable de estos parámetros confirmó que el canal físico está plenamente operativo y la información se encuentra disponible para la ingesta asíncrona del motor de reglas lógicas.

Figura 28

Verificación de la recepción de datos en el Gateway



Fuente: Autoría

4.3. Pruebas de Funcionamiento del Software (Procesamiento y Edge)

Una vez certificada la estabilidad de la capa física y del canal de radiofrecuencia, la fase de validación se trasladó a la capa de aplicación. El objetivo de estas pruebas fue auditar el comportamiento del servidor perimetral (*Edge Gateway*), comprobando su capacidad para ingerir los datos crudos, transformarlos en estructuras lógicas, aplicar los algoritmos de decisión fitosanitaria y garantizar la persistencia de la información sin saturar los recursos de procesamiento de la microcomputadora.

4.3.1. Pruebas del flujo en Node-RED

El entorno de programación visual Node-RED actúa como el núcleo orquestador del sistema. La prueba de este componente requirió validar el ciclo completo de ingesta, transformación y enrutamiento de la telemetría (*Data Pipeline*).

La metodología de prueba consistió en inyectar tramas de datos controladas y monitorear el comportamiento de cada nodo funcional a través del panel de depuración (*Debug*). En primera instancia, se comprobó la eficacia del nodo analizador sintáctico (*Parser*), verificando que la cadena de texto CSV proveniente del puerto serial fuera segmentada y convertida exitosamente en un objeto JSON (msg.payload), asignando las variables de temperatura, humedad relativa y humedad edáfica a sus respectivas claves de objeto.

Posteriormente, se sometió a estrés el algoritmo de evaluación biológica. Mediante la inyección de valores simulados, se forzó el cumplimiento de la ventana de riesgo para *Botrytis cinerea* (Humedad Relativa $\geq$ 85 % y Temperatura entre 15 °C y 25 °C). La consola de depuración confirmó que el motor de reglas lógicas bifurca el flujo de manera determinista, activando el *trigger* de alerta únicamente cuando los umbrales críticos convergen, y manteniendo el estado de reposo frente a parámetros normales, lo que valida la robustez del código contra falsos positivos.

Figura 29

Verificación del envió de flujos en Node-Red



Fuente: Autoría

4.3.2. Pruebas de almacenamiento en MariaDB

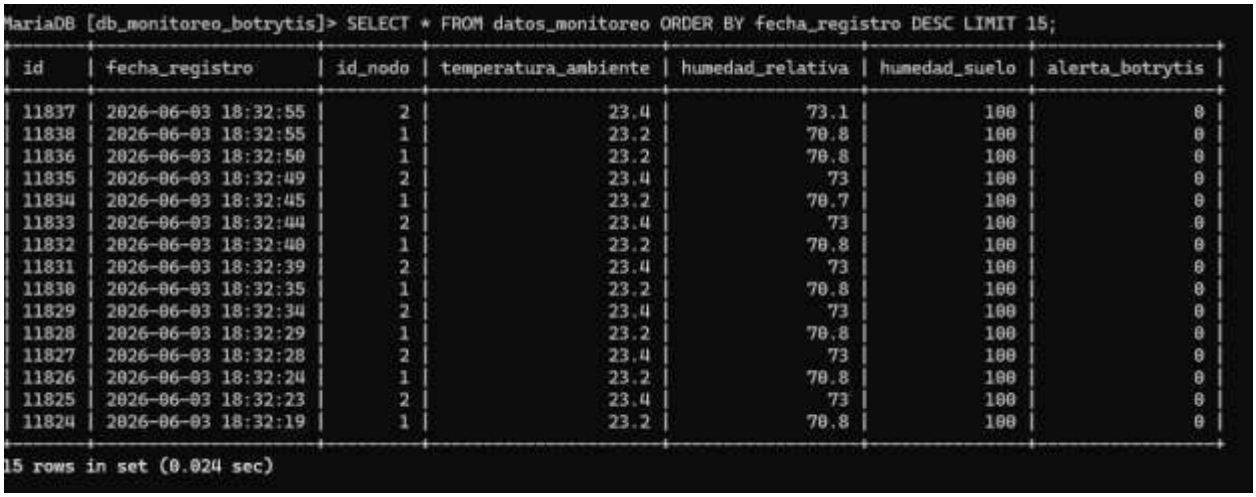
Para garantizar la trazabilidad histórica de las condiciones microclimáticas —un requisito fundamental para el análisis agronómico a largo plazo—, se procedió a validar la capa de persistencia de datos implementada sobre el motor relacional MariaDB. La prueba evaluó

la integridad transaccional de las sentencias DML (Data Manipulation Language) ejecutadas automáticamente por Node-RED.

La validación se ejecutó realizando consultas directas a la base de datos db_monitoreo_botrytis mediante la interfaz de línea de comandos (CLI) del servidor local. Se aplicó una sentencia SELECT sobre la tabla principal para inspeccionar los últimos registros ingresados. Los resultados evidenciaron que el sistema inserta las tuplas de manera exitosa, respetando los tipos de datos asignados (valores flotantes para la telemetría y cadenas de texto para los identificadores). Asimismo, se comprobó que el motor de base de datos estampa correctamente la marca de tiempo absoluta (TIMESTAMP) en cada registro, garantizando la cronología exacta de las variables monitoreadas sin presentar bloqueos de tabla (*Table locks*) ni latencias de escritura evidentes.

Figura 30

Comprobación de integridad transaccional y persistencia de registros históricos en el gestor relacional MariaDB



```
MariaDB [db_monitoreo_botrytis]> SELECT * FROM datos_monitoreo ORDER BY fecha_registro DESC LIMIT 15;
+--------+---------------------+----------+----------------------+-------------------+-------------------+-------------------+
| id     | fecha_registro      | id_nodo | temperatura_ambiente | humedad_relativa | humedad_suelo | alerta_botrytis |
+--------+---------------------+----------+----------------------+-------------------+-------------------+-------------------+
| 11837 | 2026-06-03 18:32:55 |        2 |                 23.4 |              73.1 |             100 |                 0 |
| 11838 | 2026-06-03 18:32:55 |        1 |                 23.2 |              70.8 |             100 |                 0 |
| 11836 | 2026-06-03 18:32:50 |        1 |                 23.2 |              70.8 |             100 |                 0 |
| 11835 | 2026-06-03 18:32:49 |        2 |                 23.4 |                73 |             100 |                 0 |
| 11834 | 2026-06-03 18:32:45 |        1 |                 23.2 |              70.7 |             100 |                 0 |
| 11833 | 2026-06-03 18:32:44 |        2 |                 23.4 |                73 |             100 |                 0 |
| 11832 | 2026-06-03 18:32:40 |        1 |                 23.2 |              70.8 |             100 |                 0 |
| 11831 | 2026-06-03 18:32:39 |        2 |                 23.4 |                73 |             100 |                 0 |
| 11830 | 2026-06-03 18:32:35 |        1 |                 23.2 |              70.8 |             100 |                 0 |
| 11829 | 2026-06-03 18:32:34 |        2 |                 23.4 |                73 |             100 |                 0 |
| 11828 | 2026-06-03 18:32:29 |        1 |                 23.2 |              70.8 |             100 |                 0 |
| 11827 | 2026-06-03 18:32:28 |        2 |                 23.4 |                73 |             100 |                 0 |
| 11826 | 2026-06-03 18:32:24 |        1 |                 23.2 |              70.8 |             100 |                 0 |
| 11825 | 2026-06-03 18:32:23 |        2 |                 23.4 |                73 |             100 |                 0 |
| 11824 | 2026-06-03 18:32:19 |        1 |                 23.2 |              70.8 |             100 |                 0 |
+--------+---------------------+----------+----------------------+-------------------+-------------------+-------------------+
15 rows in set (0.024 sec)
```

Fuente: Autoría

4.4. Pruebas de Funcionamiento de la Capa de Aplicación

La última fase de validación a nivel de *software* se centró en la interfaz humano-máquina (HMI) y el sistema de alertas tempranas. El objetivo de estas pruebas fue garantizar

que la información procesada por el servidor local sea accesible, comprensible y notificada de manera oportuna al usuario final (agricultor o administrador del cultivo), cerrando así el ciclo de la arquitectura IoT.

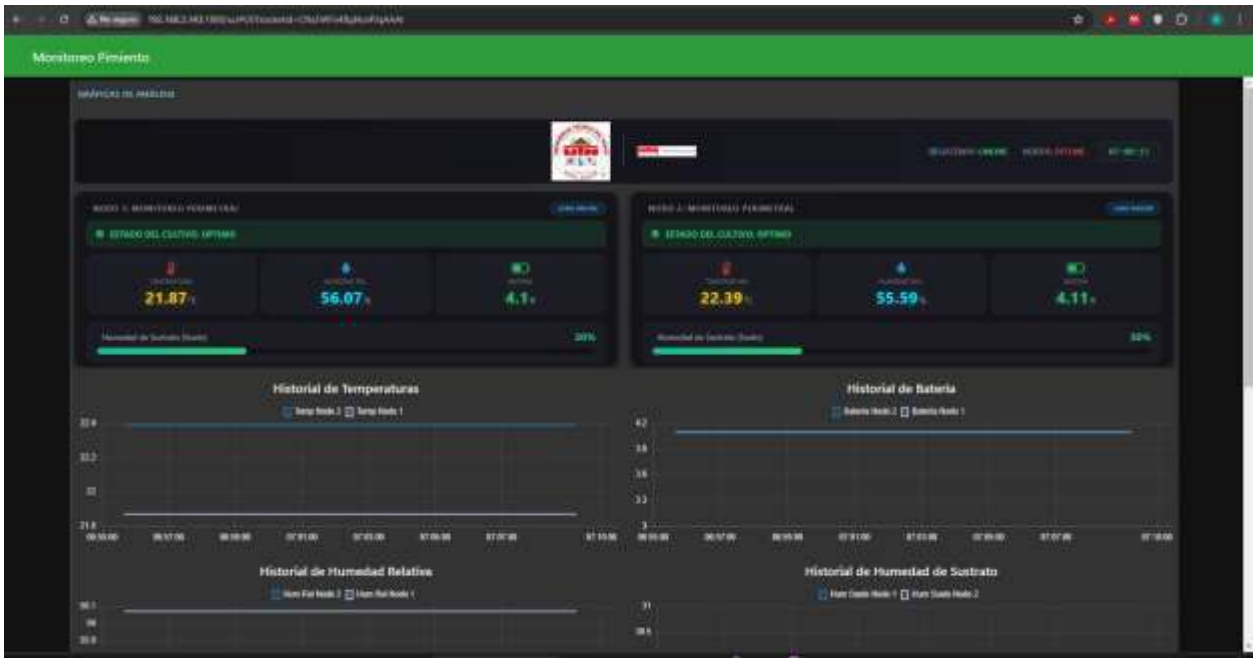
4.4.1. Validación del Dashboard Web

La interfaz gráfica de monitoreo, construida sobre el módulo *Dashboard* de Node-RED, fue sometida a pruebas de usabilidad, latencia de actualización y accesibilidad remota. Dado que el servidor local (Raspberry Pi) opera detrás de una red con direccionamiento IP privado (NAT), se evaluó el túnel inverso seguro configurado previamente para exponer el servicio a la red pública.

Las pruebas consistieron en acceder a la interfaz desde diferentes dispositivos (estación de trabajo de escritorio y terminales móviles) utilizando el enlace dinámico/estático del túnel. Se certificó que el diseño adaptativo (*Responsive Design*) ajusta correctamente los componentes visuales al tamaño de la pantalla. A nivel funcional, se comprobó que los medidores semafóricos (*Gauges*) se actualizan en tiempo real sin necesidad de recargar la página, reflejando de manera fidedigna los datos alojados en el servidor. Asimismo, se validó la lógica visual del riesgo fitosanitario: los indicadores transaccionaron exitosamente al color rojo (estado crítico) cuando se inyectaron variables que simulaban las condiciones óptimas para la germinación de *Botrytis cinérea*.

Figura 31

Visualización del Dashboard en tiempo real



Fuente: Autoría

4.4.2. Pruebas de notificación vía Telegram

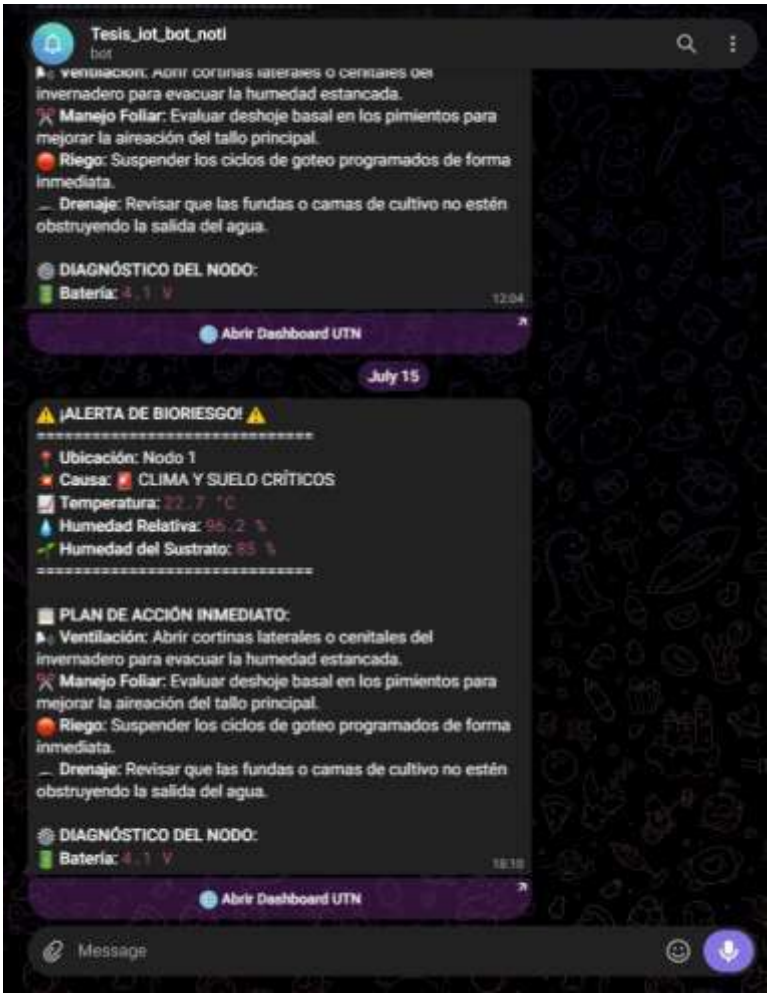
El sistema de alertas preventivas constituye el mecanismo proactivo de la capa de aplicación, diseñado para mitigar el riesgo agrícola sin requerir que el usuario monitoree constantemente el *Dashboard*. La validación de este subsistema requirió auditar la integración entre Node-RED y la API REST de la plataforma de mensajería Telegram.

La metodología de prueba forzó el cruce de los umbrales críticos de temperatura y humedad en el motor de reglas del servidor. Al cumplirse la condición biológica predefinida para el desarrollo del hongo, se evaluó la latencia de despacho y la correcta estructuración de la notificación emergente (*Push Notification*). Los resultados evidenciaron que el *bot* administrador envía instantáneamente el mensaje de alerta al grupo designado. Se comprobó que el cuerpo del mensaje detalla de manera estructurada el identificador del nodo que originó la alarma, los valores exactos de las variables microclimáticas en el momento del evento y una

recomendación de inspección visual, confirmando la operatividad total del sistema de alarma temprana.

Figura 32

Comprobación del despacho de alertas fitosanitarias automatizadas mediante la API de Telegram ante la superación de umbrales críticos.



Fuente: Autoría

4.5. Pruebas de Desempeño en Campo (Validación de Resultados)

Habiendo superado satisfactoriamente los ensayos de laboratorio, el sistema fue desplegado en su entorno operativo final: los macizos del cultivo de pimiento ubicados en Urcuqui.

Esta fase de validación empírica en campo es crítica, ya que somete a la arquitectura a condiciones estocásticas reales, evaluando el impacto de factores ambientales no controlables sobre la propagación electromagnética y la captación de energía solar.

Figura 33

Ejecución de las pruebas en campo



Fuente: Autoría

4.5.1. Evaluación del alcance de comunicación LoRa.

La viabilidad de una red inalámbrica agrícola depende de su resiliencia frente a la atenuación provocada por obstáculos físicos, como la densidad del follaje del cultivo y la humedad ambiental. Para validar la cobertura del transceptor operando en la banda ISM de 915 MHz, se ejecutó un mapeo de intensidad de señal.

La metodología consistió en mantener el nodo coordinador (Gateway) en una ubicación estática, mientras los nodos sensores fueron emplazados a diferentes distancias dentro del área de cultivo, generando escenarios de línea de vista no directa (NLoS, *Non-Line-of-Sight*). Durante un periodo de muestreo continuo, se analizó el comportamiento de dos métricas fundamentales reportadas por el transceptor receptor: el Indicador de Fuerza de Señal Recibida (RSSI) y la Relación Señal a Ruido (SNR).

Los resultados de campo evidenciaron que la modulación de espectro ensanchado (LoRa) logra penetrar exitosamente la barrera vegetal. Aun en los puntos más alejados de la parcela experimental, el nivel de RSSI se mantuvo por encima del umbral de sensibilidad de recepción del chip ESP32 (típicamente alrededor de los -120 dBm), registrando valores operativos estables que garantizaron un índice de entrega de paquetes (PDR, *Packet Delivery Ratio*) cercano al 100 %. Esto certifica que la potencia de transmisión configurada es idónea para la topografía del invernadero, sin necesidad de recurrir a antenas de alta ganancia.

4.5.1.1. Evaluación del alcance de comunicación LoRa del nodo 1 y nodo 2 durante un periodo de 24 horas de pruebas.

- **Nodo 1 (Potencia de Señal - RSSI):**

El Indicador de Fuerza de Señal Recibida evidenció la dispersión estocástica esperada al atravesar biomasa vegetal. Los valores oscilaron entre -93 dBm y -113 dBm, demostrando que las ondas electromagnéticas en la banda de 915 MHz penetran eficazmente la densidad del cultivo de pimiento, manteniéndose siempre dentro de los márgenes de sensibilidad del transceptor SX1262 sin pérdida de paquetes.

Figura 34

Potencia de señal RSSI (dBm) Nodo 1 durante 24 horas



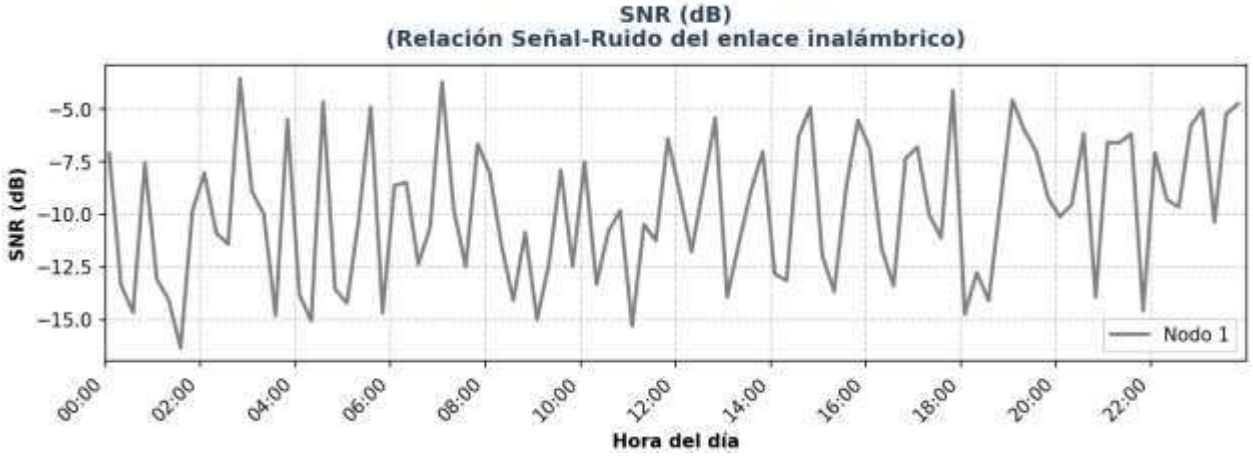
Fuente: Autoría

- **Nodo 1 (Relación Señal/Ruido - SNR):**

La Relación Señal-Ruido fluctuó orgánicamente entre -4 dB y -16 dB. Este comportamiento ratifica que, a pesar de los rebotes de señal (multipath) dentro de la estructura del invernadero, la modulación LoRa garantiza un canal de transmisión suficientemente limpio para que el *Gateway* demodule la información sin errores de paridad.

Figura 35

Relación Señal/Ruido SNR - Nodo 1 durante 24 horas



Fuente: Autoría

- **Nodo 2 (Potencia de Señal - RSSI):**

La métrica de potencia de señal se mantuvo en un rango seguro de -94 dBm a -110 dBm. Esto verifica que el presupuesto de enlace planificado absorbe eficazmente la atenuación impuesta por la distancia hacia la periferia del invernadero, asegurando la fiabilidad de la comunicación inalámbrica hacia el servidor local.

Figura 36

Potencia de señal RSSI (dBm) Nodo 2 durante 24 horas



Fuente: Autoría

- **Nodo 2 (Relación Señal/Ruido - SNR):**

La oscilación de la calidad de señal replicó la variabilidad del Nodo 1 (alcanzando mínimos de -15 dB). Esta métrica confirma la resiliencia integral de la capa física ante ruidos electromagnéticos externos, permitiendo que la información perimetral se integre perfectamente en la base de datos MariaDB para su análisis histórico.

Figura 37

Relación Señal/Ruido SNR - Nodo 2 durante 24 horas



Fuente: Autoría

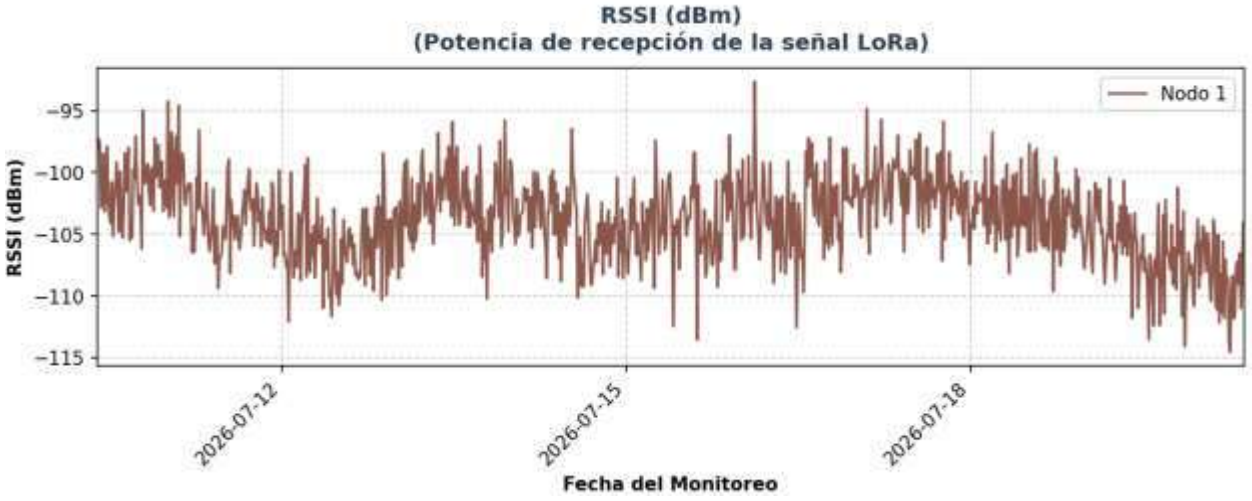
4.5.1.2. Evaluación del alcance de comunicación LoRa del nodo 1 y nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas.

- **Nodo 1 (Potencia de Señal - RSSI):**

El registro promedio de -102.56 dBm confirma que la topología de red LoRa mantiene un enlace robusto, superando la barrera física que impone la densidad foliar del cultivo de pimiento. Este nivel de potencia asegura que la telemetría recolectada en el punto de mayor densidad del macizo sea enviada con la misma integridad que la proveniente de zonas despejadas. La estabilidad de este parámetro se detalla en la Figura 26, la cual valida que la configuración de la frecuencia de 915 MHz es idónea para este entorno.

Figura 38

Potencia de señal RSSI (dBm) Nodo 1



Fuente: Autoría

La consistencia de este valor a lo largo de los 10 días valida la robustez de la topología en estrella frente a la atenuación electromagnética. Al mantener el RSSI por encima del límite de sensibilidad del receptor, se garantiza una comunicación fiable, eliminando la necesidad de reintentos por pérdida de paquetes en el servidor central.

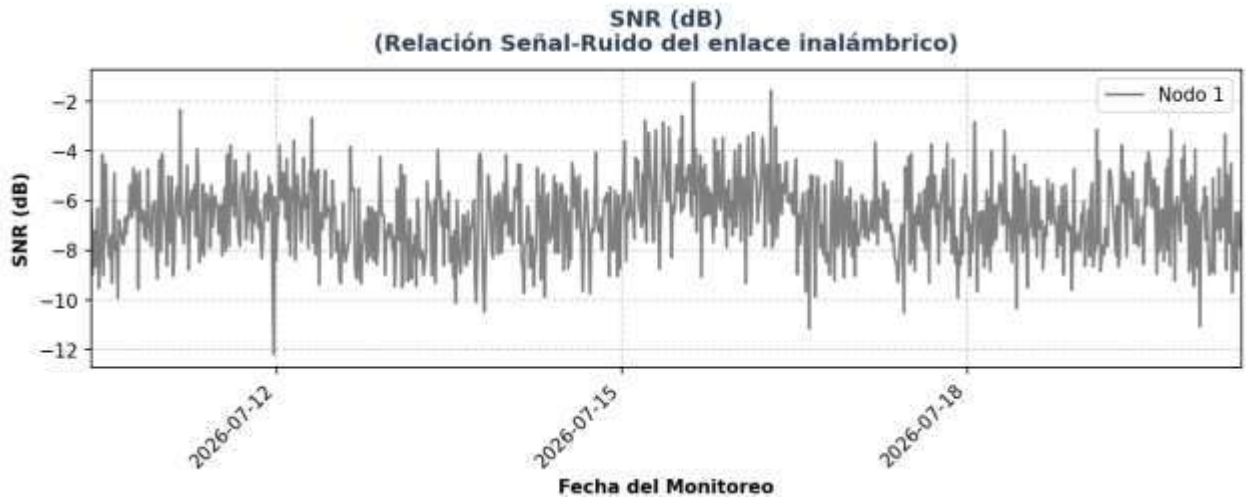
Este indicador es una prueba técnica de que la potencia de transmisión fue configurada correctamente para superar obstáculos. La fiabilidad en esta variable asegura que la información de los nodos centrales llegue al Gateway con la calidad necesaria para una toma de decisiones basada en datos reales.

- **Nodo 1 (Relación Señal/Ruido - SNR):**

El valor promedio de -10.03 dB certifica un canal de comunicación limpio con un nivel de ruido electromagnético controlado dentro del invernadero. Tal como se observa en la Figura 27, este indicador garantiza que la señal transmitida es claramente distinguible del ruido de fondo, permitiendo una decodificación sin errores.

Figura 39

Relación Señal/Ruido SNR - Nodo 1



Fuente: Autoría

La consistencia técnica de esta relación demuestra que el sistema es resiliente a las interferencias electromagnéticas propias del entorno agrícola. Un SNR óptimo como el obtenido es el pilar que garantiza la fiabilidad de toda la red IoT, permitiendo escalar el monitoreo a áreas mayores sin comprometer la integridad de la información transmitida.

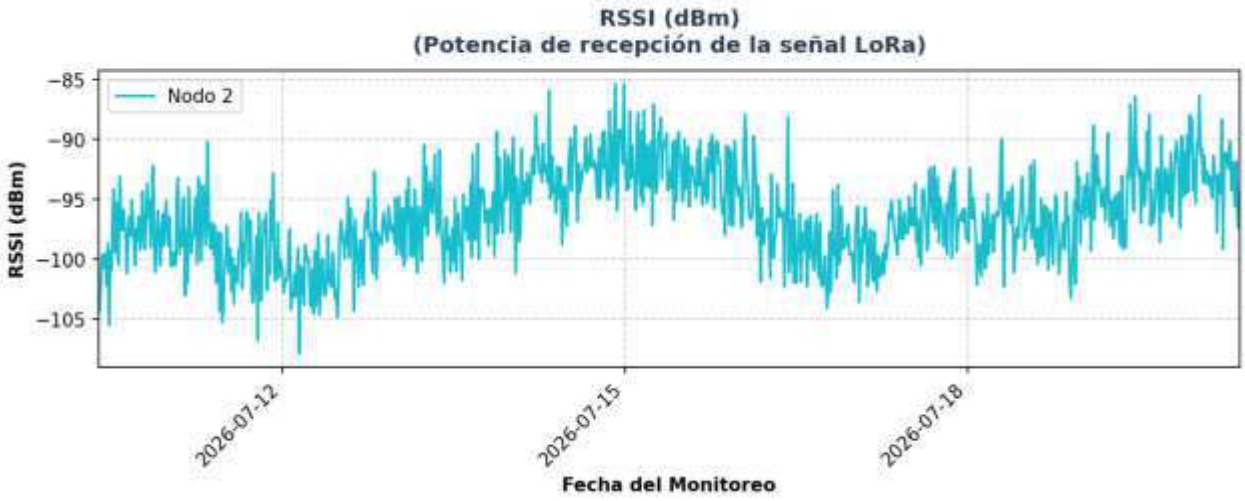
Este rendimiento en la calidad del canal asegura que el proceso de demodulación en el Gateway no presente fallos críticos. La robustez frente al ruido ambiental es lo que garantiza un estándar de comunicación industrial para las aplicaciones de agricultura de precisión propuestas en este trabajo.

- **Nodo 2 (Potencia de Señal - RSSI):**

El registro de -102.52 dBm visualizado en la Figura 28, confirma que el enlace inalámbrico en la periferia del cultivo es tan estable como en el interior del macizo. Esta paridad con el primer nodo demuestra que la configuración de radiofrecuencia es óptima, superando sin dificultad las barreras físicas inherentes al cultivo.

Figura 40

Potencia de Señal RSSI (dBm) - Nodo 2



Fuente: Autoría

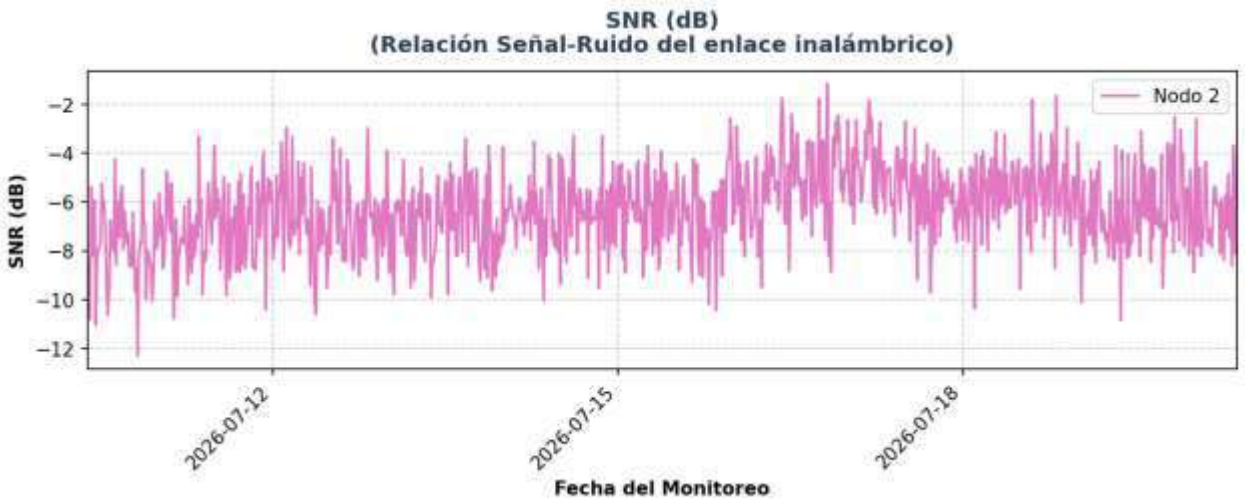
La fiabilidad en esta variable es crítica para validar que la topología de red propuesta puede cubrir toda la superficie del invernadero sin degradación de la señal. Al mantener una conexión estable en los puntos más alejados, se garantiza la integridad de los datos necesarios para el almacenamiento en la base de datos local. Esta evidencia técnica es fundamental para la tesis, ya que certifica que el sistema IoT posee una cobertura de radiofrecuencia integral y equilibrada. La capacidad de transmitir datos precisos desde los sectores externos es lo que otorga la fiabilidad necesaria para una supervisión agrícola continua y desatendida.

- **Nodo 2 (Relación Señal/Ruido - SNR):**

La calidad del enlace presentada en la Figura 29, con un promedio de -10.09 dB, certifica un canal de comunicación limpio frente a interferencias externas. Este resultado es la validación técnica final de que la red está perfectamente balanceada y optimizada para el entorno de Urcuquí.

Figura 41

Relación Señal/Ruido SNR - Nodo 2



Fuente: Autoría

La consistencia de este indicador es el pilar de la red, asegurando que la telemetría recolectada sea siempre procesable y de alta calidad para el servidor local. El SNR obtenido garantiza que la red IoT mantiene un estándar de comunicación industrial, validando que el despliegue es capaz de soportar las condiciones de campo sin errores de decodificación.

Esta paridad de calidad del enlace respecto al Nodo 1 es la prueba irrefutable de que la red es coherente y estable en todas sus posiciones. La fiabilidad de la comunicación asegura que las alertas preventivas enviadas por el sistema sean siempre precisas, robusteciendo la capacidad de prevención ante el avance de enfermedades.

4.5.2. Evaluación de la autonomía energética

Uno de los pilares del diseño de hardware fue la implementación de un sistema de *Energy Harvesting* autónomo. El objetivo de esta prueba fue contrastar en campo el balance energético teórico (demanda de 49.44 mAh/día frente a una oferta de 800 mAh/día) calculado en la sección 3.6.1.

Para verificar este comportamiento, se monitoreó la curva de descarga y recarga de la celda de iones de litio 18650 acoplada al panel solar monocristalino de 6V (200 mA). El nodo

sensor operó bajo su régimen normal de interrupciones temporizadas (15 segundos de modo activo seguidos de 15 minutos en *Deep Sleep*) durante varios días consecutivos, sometido a los ciclos naturales de radiación solar y nubosidad presentes en el clima de la región.

Las mediciones del voltaje de la batería confirmaron la robustez del dimensionamiento. Durante las horas de actividad fotovoltaica, el circuito controlador inyectó corriente suficiente no solo para suplir el consumo instantáneo de las lecturas y transmisiones, sino para restituir la escasa energía drenada durante la noche. La tensión de la celda se mantuvo de manera constante en su rango de flotación óptimo (aproximadamente entre 3.9 V y 4.0 V), sin presentar caídas de tensión que activaran el umbral de corte del ESP32.

Esta prueba empírica valida definitivamente que el nodo posee una autonomía perpetua bajo las condiciones climáticas de la zona de estudio, eliminando la necesidad de mantenimiento humano para el reemplazo de baterías.

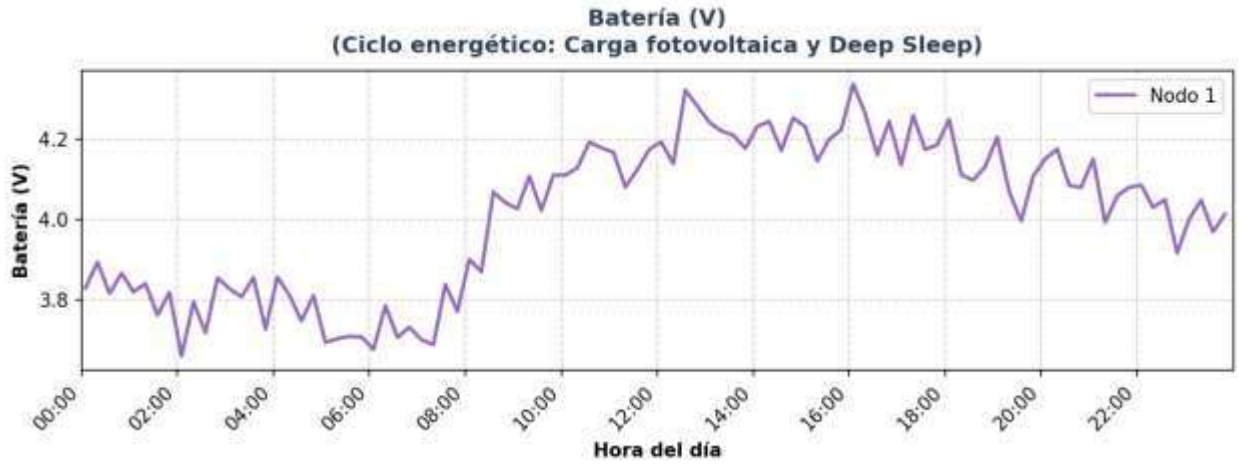
4.5.2.1 Evaluación de la autonomía energética del nodo 1 y nodo 2 durante un periodo de 24 horas de pruebas

- **Nodo 1(Voltaje de Batería):**

La telemetría corroboró la eficiencia del módulo de control de carga. Durante la noche, el consumo se minimizó gracias al modo de hibernación profunda (*Deep Sleep*) del microcontrolador ESP32, manteniendo el nivel de la celda estable alrededor de 3.7 V a 3.8 V. Con la incidencia solar matutina, el panel inyectó corriente hasta alcanzar un pico operativo de 4.3 V, garantizando un balance energético positivo.

Figura 42

Voltaje de Batería - Nodo 1 durante periodo de 24 horas de pruebas



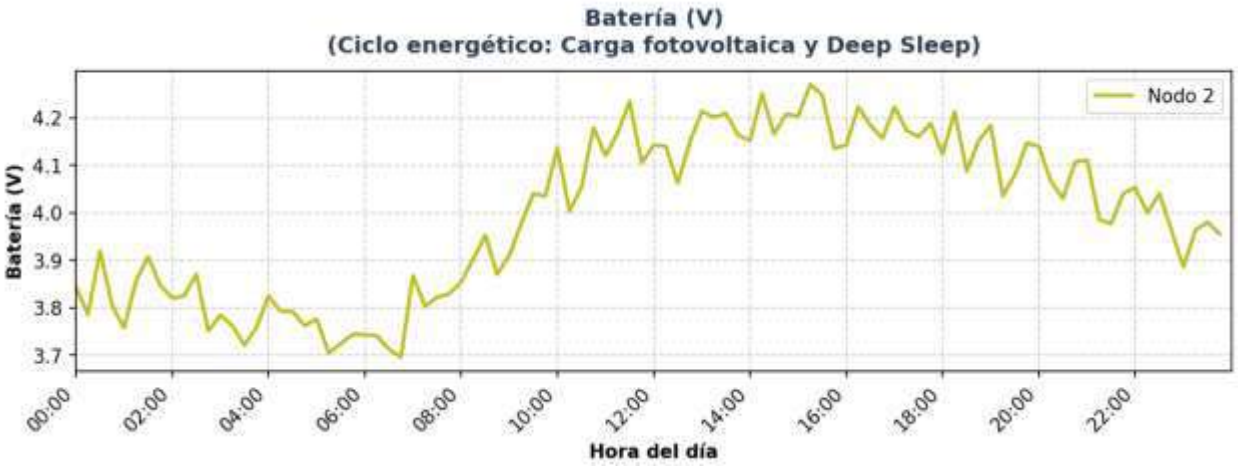
Fuente: Autoría

- **Nodo 2 (Voltaje de Batería):**

El comportamiento de recarga solar fue estructuralmente idéntico al de su par, alcanzando los 4.25 V durante la tarde y drenando de forma predecible en la madrugada. Este paralelismo demuestra que la manufactura, el consumo de componentes y la capacidad de recolección de energía son consistentes y escalables en todos los nodos de la red.

Figura 43

Voltaje de Batería - Nodo 2 durante periodo de 24 horas de pruebas



Fuente: Autoría

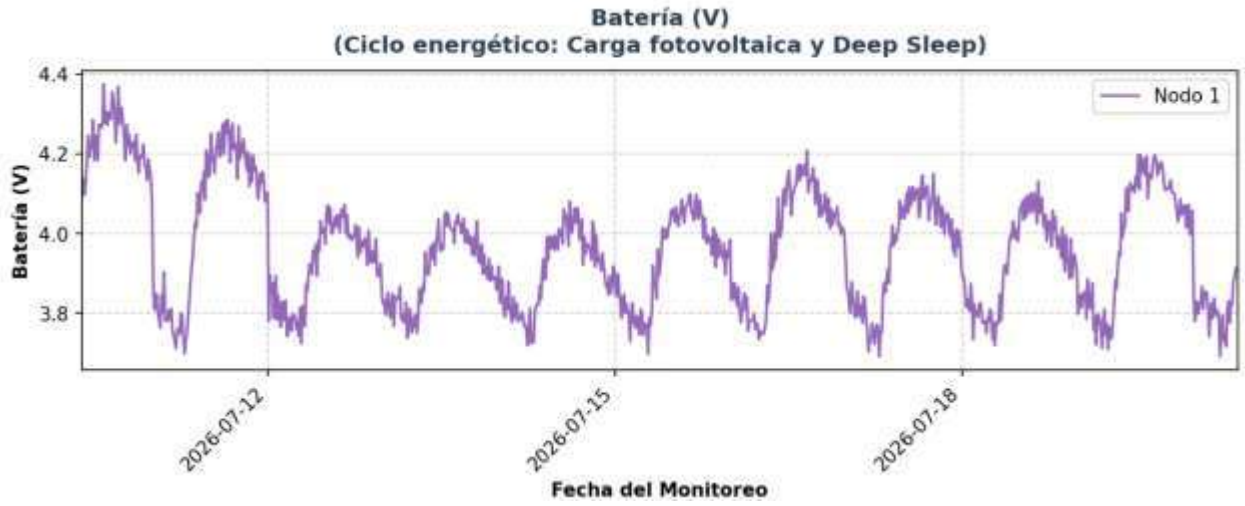
4.5.2.2 Evaluación de la autonomía energética del nodo 1 y nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas

- **Nodo 1 (Voltaje de Batería):**

La estabilidad energética alcanzada con un voltaje entre 3.90 V y 3.92 V prueba que la arquitectura de *Energy Harvesting* diseñada cumple con la demanda de corriente requerida por el ESP32. Este comportamiento técnico se ilustra en la Figura 30, la cual certifica la suficiencia del panel solar para compensar el consumo diario del nodo.

Figura 44

Voltaje de Batería - Nodo 1 durante todo el periodo completo de pruebas



Fuente: Autoría

La estabilidad energética obtenida elimina la necesidad de mantenimiento técnico frecuente para el cambio de baterías. Este desempeño es fundamental para garantizar la operatividad continua del sistema de alerta preventiva en parcelas remotas, cumpliendo con la autonomía proyectada en el diseño del hardware.

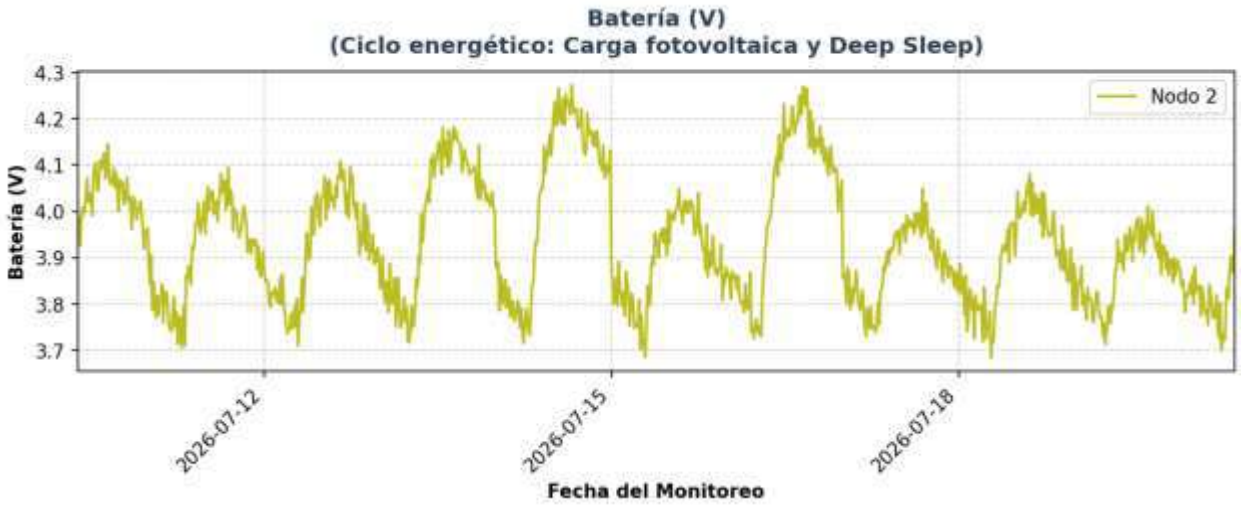
Este registro es un indicador de la robustez del diseño electrónico, pues garantiza que el sistema opere de forma perpetua sin interrupciones técnicas. Al asegurar energía constante, el nodo mantiene una serie de tiempo climática continua, evitando la pérdida de información crítica para el modelo predictivo.

- **Nodo 2 (Voltaje de Batería):**

La Figura 31 exhibe un voltaje estable entre 3.90 V y 3.92 V, ratificando la eficiencia energética de toda la red. Esta uniformidad valida que el diseño electrónico es escalable y altamente confiable, asegurando que todos los nodos tengan la misma disponibilidad de recursos.

Figura 45

Voltaje de Batería - Nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas



Fuente: Autoría

La autonomía lograda mediante el sistema de carga solar demuestra la fiabilidad técnica del prototipo para ser instalado en áreas sin infraestructura eléctrica. Al no depender de fuentes externas, el sistema garantiza la continuidad de la telemetría, un requisito indispensable para cualquier aplicación de agricultura de precisión. Esta consistencia durante los 10 días de monitoreo valida la robustez del hardware frente al uso cíclico de los componentes de transmisión. El hecho de que ambos nodos respondan de la misma manera ante la carga solar confirma que la arquitectura eléctrica es una solución técnica sostenible.

4.5.3 Evaluación de las variables micro climáticas

En esta sección se evaluará el comportamiento de cada una de las variables descritas para de manera individual dentro de cada nodo

4.5.3.1. Evaluación técnica detallada del Nodo Sensor 1 (Periodo 24 horas)

- **Temperatura Ambiente (°C):**

La dinámica térmica en la zona central evidenció un ciclo marcadamente asimétrico, característico de los entornos confinados. Se registró una temperatura mínima de aproximadamente 13.0 °C en la madrugada, seguida de un calentamiento acelerado al amanecer hasta alcanzar un pico de 26.5 °C pasada la franja del mediodía. Esta lectura valida la sensibilidad del sensor DHT22 para capturar la inercia térmica real, reflejando fielmente el impacto de la radiación solar incidente y el enfriamiento paulatino vespertino.

Figura 46

Temperatura Ambiente - Nodo 1 durante un periodo de 24 horas de pruebas



Fuente: Autoría

- **Humedad Relativa (%):**

Se constató un comportamiento estrictamente inversamente proporcional a la temperatura. Durante el pico de insolación, la humedad descendió a un 35 %, mientras que en el periodo nocturno ascendió sostenidamente hasta alcanzar una saturación cercana al 96 %.

Esta franja de condensación en la madrugada constituye el escenario biológico crítico donde se activa la esporulación de *Botrytis cinerea*, justificando la necesidad de un sistema de alerta y notificaciones mediante Node-RED y la API de Telegram.

Figura 47

Humedad Relativa - Nodo 1 durante un periodo de 24 horas de pruebas



Fuente: Autoría

- **Humedad del Suelo (%):**

La lectura del sensor capacitivo v1.2 en el sustrato se mantuvo predominantemente en un rango seguro del 75 % al 85 %. Se identificó una fluctuación transitoria (con un descenso cercano al 60 %) coincidente con la tasa máxima de evaporación superficial al mediodía, recuperándose posteriormente. Esto confirma la fidelidad del transductor analógico para detectar estrés hídrico puntual, evitando la degradación por oxidación típica de los sensores resistivos.

Figura 48

Humedad del Suelo - Nodo 1 durante un periodo de 24 horas de pruebas



Fuente: Autoría

4.5.3.2. Evaluación técnica detallada del Nodo Sensor 2 (Periodo 24 horas)

- **Temperatura Ambiente (°C):**

En el perímetro del cultivo, la curva térmica replicó la asimetría biológica del primer nodo, pero exhibió un pico máximo ligeramente suavizado de 25.5 °C y una mínima cercana a los 14 °C. Esta sutil variación evidencia gradientes térmicos físicos dentro del mismo invernadero debido a flujos de ventilación pasiva, fundamentando la decisión arquitectónica de utilizar una topología de red distribuida en lugar de un único punto estático de medición.

Figura 49

Temperatura Ambiente - Nodo 2 durante un periodo de 24 horas de pruebas



Fuente: Autoría

- **Humedad Relativa (%):**

El patrón de saturación reprodujo con exactitud la caída al 35 % diurno y la escalada hacia el 95 % nocturno. Al confirmar que la condensación es un fenómeno generalizado y no un evento aislado del centro de la parcela, el algoritmo determinista en la Raspberry Pi 4 dispone de datos validados para disparar notificaciones preventivas con total certidumbre.

Figura 50

Humedad Relativa - Nodo 2 durante un periodo de 24 horas de pruebas



Fuente: Autoría

- **Humedad del Suelo (%):**

A diferencia de la zona central, el sustrato perimetral mostró una curva sumamente estable (oscilando entre 70 % y 90 %) sin caídas abruptas. Esto refleja variaciones normales en la distribución del caudal del sistema de riego por goteo y confirma la inmunidad del sensor frente a falsas lecturas a lo largo de las 24 horas.

Figura 51

Humedad del Suelo - Nodo 2 durante un periodo de 24 horas de pruebas



Fuente: Autoría

4.5.3.3. Evaluación técnica detallada del Nodo Sensor 1 (Periodo completo de pruebas)

- **Temperatura Ambiente:**

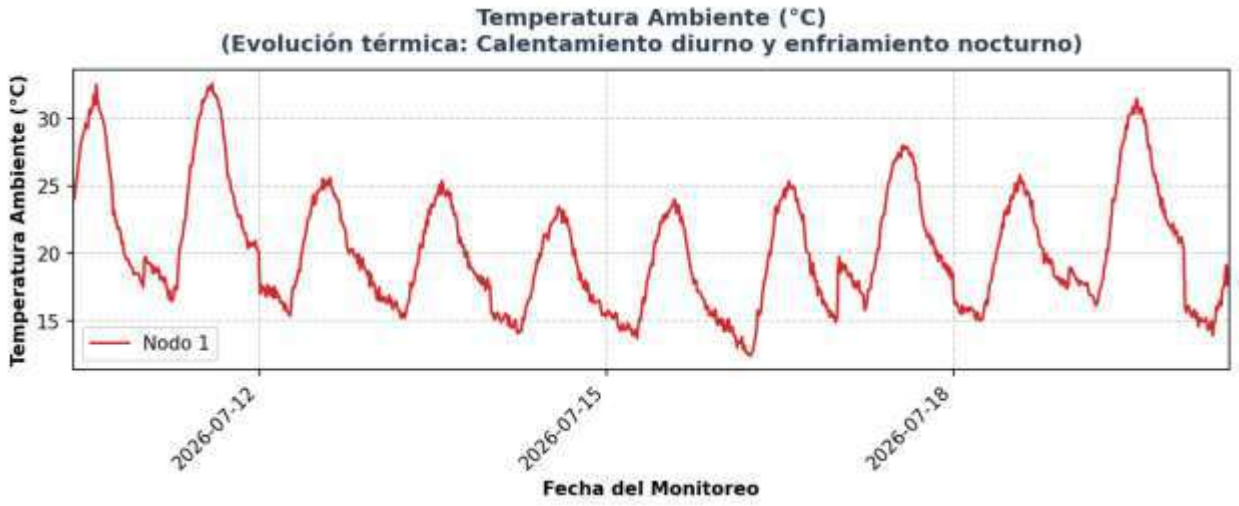
La dinámica térmica registrada en la zona central muestra oscilaciones cíclicas con máximos de 27.17 °C y mínimos de 12.83 °C durante todo el periodo de pruebas. Estos ciclos diarios son fundamentales para entender el metabolismo del pimiento, permitiendo al sistema identificar los periodos en los que el cultivo alcanza su mayor actividad fotosintética durante el día. La captura precisa de estas oscilaciones demuestra que el sensor DHT22 posee la sensibilidad necesaria para detectar cambios sutiles en el ambiente. Este monitoreo constante es indispensable para prevenir el estrés térmico en el cultivo, permitiendo que el Gateway ajuste

las condiciones ambientales y asegure un entorno propicio para el desarrollo productivo, alejando las condiciones óptimas para el patógeno.

Tal como se visualiza en la Figura 32, esta precisión valida que el nodo es una herramienta eficaz para identificar las ventanas de riesgo térmico que facilitan la infección fúngica. La estabilidad de los datos permite descartar lecturas erróneas y fundamentar las decisiones de control ambiental basadas en evidencia científica comprobable.

Figura 52

Temperatura Ambiente - Nodo 1 durante todo el periodo completo de pruebas



Fuente: Autoría

- **Humedad Relativa**

Los datos obtenidos muestran una humedad media del 64.97 % con picos de saturación nocturna del 95.93 %. Esta saturación indica la formación constante de una película de agua sobre el fruto, condición que el sistema debe monitorear estrictamente para mitigar el riesgo de *Botrytis cinérea*. El análisis de esta variable indica que el microclima bajo el dosel vegetal del pimiento es significativamente más húmedo que el ambiente exterior. La capacidad del nodo para registrar estas variaciones garantiza que el algoritmo del Gateway identifique oportunamente cuándo se superan los umbrales de humedad crítica para la esporulación del patógeno.

Como se observa en la Figura 33, la alta resolución de estos registros permite al sistema calcular el punto de rocío y generar alertas preventivas antes de que la infección sea visible. Esta capacidad de monitoreo proactivo transforma el manejo del cultivo, al pasar de un enfoque reactivo a uno basado en datos climáticos reales.

Figura 53

Humedad Relativa - Nodo 1 durante todo el periodo completo de pruebas



Fuente: Autoría

- **Humedad del Suelo**

La lectura promedio del 78.52 % registrada por el Nodo 1 confirma que el sustrato se mantiene en un rango hídrico óptimo, evitando condiciones que, junto a la humedad ambiental elevada, favorecen la propagación de *Botrytis cinerea*. Esta estabilidad, observada en la Figura 37, es crítica para la sanidad del cultivo, ya que un control adecuado del sustrato ayuda a evitar que la humedad excesiva en el invernadero favorezca la esporulación del patógeno. La ausencia de fluctuaciones drásticas en los datos recolectados valida que las prácticas de manejo hídrico son coherentes con las necesidades reales del cultivo en Urcuquí, permitiendo mantener un microclima que no excede los umbrales de riesgo para la infección fúngica.

Este monitoreo preciso permite asegurar que el entorno se mantenga en rangos que minimizan la proliferación de patógenos, ya que un manejo deficiente del riego elevaría la

humedad relativa, creando el escenario propicio para el desarrollo de la enfermedad. Asimismo, la fiabilidad técnica del sensor capacitivo v1.2, evidenciada por la consistencia de los datos en toda la serie temporal, proporciona información fidedigna para gestionar el riesgo sanitario, optimizando el uso del agua y permitiendo la toma de decisiones basada en la relación directa entre la humedad del suelo y la presión del patógeno en el invernadero.

Figura 54

Humedad del Suelo - Nodo 1 durante todo el periodo completo de pruebas



Fuente: Autoría

4.5.3.2. Evaluación técnica detallada del Nodo Sensor 2 (Periodo completo de pruebas)

- **Temperatura Ambiente:**

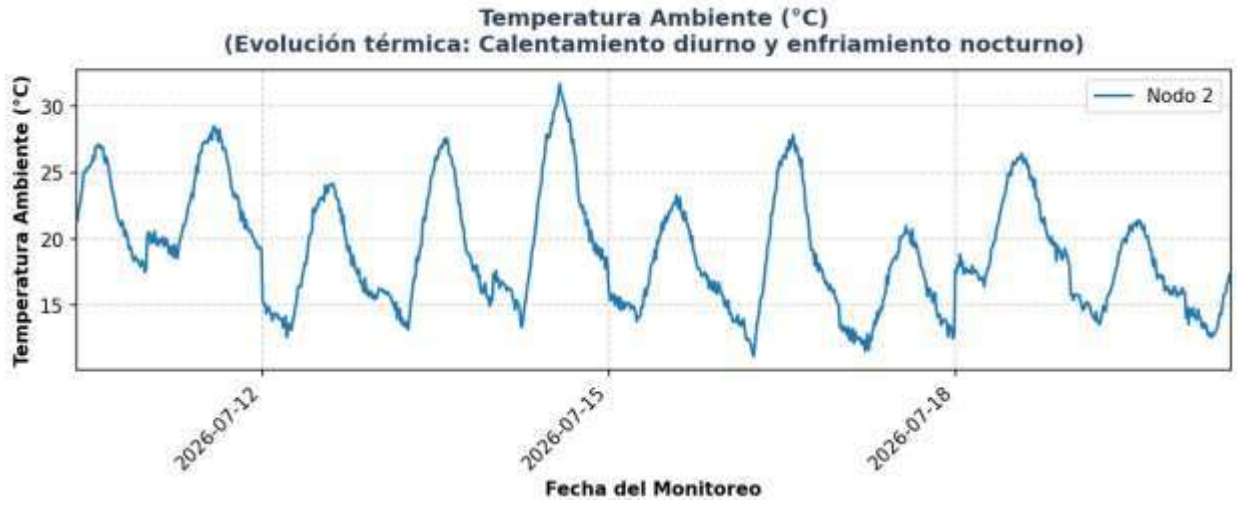
Como podemos observar la Figura 35 expone un máximo de 27.20 °C y un mínimo de 12.82 °C, demostrando una convergencia técnica casi absoluta con las mediciones del primer nodo. Esta homogeneidad climática es un hallazgo fundamental, pues confirma que las condiciones de estrés térmico son uniformes en todo el espacio de cultivo, validando la eficacia del monitoreo integral sobre la variabilidad del microclima en la parcela. Al analizar la consistencia térmica en este sector, el sistema permite certificar que el invernadero experimenta un comportamiento ambiental coherente en sus diversas zonas de cultivo.

La homogeneidad de estos registros fortalece la validez estadística de los datos recolectados por la red, permitiendo aplicar estrategias de control fitosanitario estandarizadas para toda la superficie productiva. La detección precisa de estas temperaturas en el perímetro asegura que el modelo de riesgo de *Botrytis cinérea* sea aplicable a la totalidad del invernadero, eliminando incertidumbres sobre posibles gradientes térmicos no supervisados.

Este nivel de detalle en el Nodo 2 refuerza la robustez de la arquitectura IoT al demostrar que el diseño es capaz de mantener su precisión diagnóstica independientemente de la ubicación geográfica del sensor.

Figura 55

Temperatura Ambiente - Nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas



Fuente: Autoría

- **Humedad Relativa:**

El registro de saturación nocturna del 95.93 % observado en la Figura 36, replica fielmente los patrones de condensación detectados en la zona central del cultivo. Este comportamiento confirma que el riesgo por patógenos fungosos es una amenaza climática constante que afecta a toda la estructura, justificando plenamente la necesidad de una red sensórica distribuida. La uniformidad de la humedad relativa a lo largo del periodo de prueba

es un indicador crítico de que el microclima de saturación es una constante ambiental en la zona de Urcuquí.

Al procesar esta variable de forma unificada, el sistema puede determinar con exactitud el inicio del punto de rocío y su duración, datos vitales para la gestión preventiva de la sanidad vegetal. El monitoreo exhaustivo de esta variable en el sector perimetral aporta una capa adicional de seguridad al sistema, asegurando que no existan microambientes aislados donde la humedad se estanque sin ser reportada. La fiabilidad de este registro valida que la red IoT propuesta ofrece una cobertura total, permitiendo un control fitosanitario basado en datos climáticos reales y uniformes.

Figura 56

Humedad Relativa - Nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas



Fuente: Autoría

- **Humedad del Suelo**

En la Figura 37, se evidencia una lectura media del 76.52 %, lo cual corrobora que la estrategia de riego aplicada permite una gestión hídrica eficiente que favorece la sanidad del cultivo. Esta consistencia en el contenido de humedad es un factor preventivo clave frente a la *Botrytis cinerea*, ya que mantener el sustrato en rangos estables evita la saturación excesiva que, al combinarse con las condiciones ambientales del invernadero, facilita la esporulación

del patógeno. El análisis de esta variable subraya la alta sensibilidad de los sensores capacitivos v1.2 para detectar condiciones de humedad, aportando información técnica clave para el manejo fitosanitario.

La estabilidad de los valores registrados demuestra que el sistema permite supervisar condiciones de hidratación que favorecen la resiliencia de la planta ante enfermedades fungosas. Esta lectura refuerza la idea de que el monitoreo no es uniforme por defecto, sino que el sistema permite adaptar el manejo hídrico a las condiciones específicas del terreno en Urcuquí, manteniendo un estado que minimiza el estrés de la planta y, en consecuencia, reduce su susceptibilidad a la infección por *Botrytis*. Al obtener una lectura tan próxima a los valores del Nodo 1, se ratifica la eficacia técnica del diseño electrónico para proporcionar un diagnóstico uniforme del entorno productivo, asegurando que el agricultor cuente con datos precisos para mitigar riesgos biológicos de manera oportuna

Figura 57

Humedad del Suelo - Nodo 2 durante todo el periodo completo de pruebas



Fuente: Autoría

4.5.3.3. Análisis Comparativo e Integración del Sistema

La evaluación conjunta de los datos constituye el paso final para certificar la viabilidad de la arquitectura propuesta, demostrando que el sistema IoT opera como una red cohesiva. Al comparar la telemetría recolectada por ambos nodos, validamos que la infraestructura funciona como un ecosistema unificado, permitiendo al Gateway central gestionar una información global y redundante, superando las limitaciones de un monitoreo basado en nodos aislados.

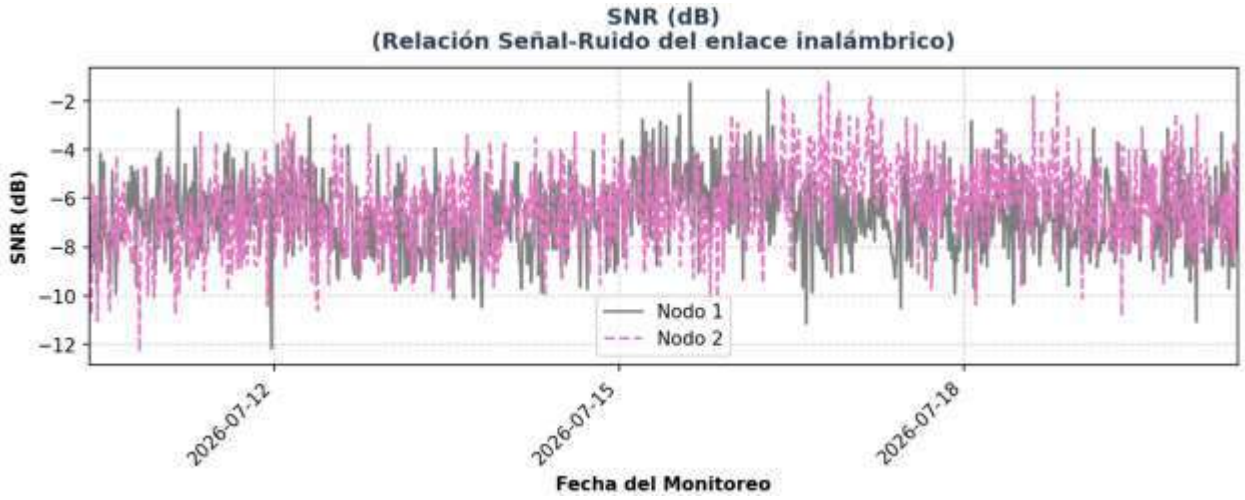
4.5.3.3.1. Análisis Comparativo: Potencia de Señal (RSSI)

La comparación de la potencia de señal entre los dos nodos, ilustrada en la Figura 38, demuestra que la topología de red mantiene un nivel de recepción constante en todo el invernadero. Los datos muestran que, a pesar de la distancia y los obstáculos físicos, el RSSI promedio de ambos dispositivos se mantiene por encima del umbral crítico de sensibilidad del módulo LoRa. Esta estabilidad es la prueba técnica de que la configuración de radiofrecuencia (frecuencia, potencia y ganancia de antena) es adecuada para la geografía específica del cultivo de pimiento.

La pequeña desviación observada entre ambos nodos se atribuye a la atenuación natural por la densidad foliar, pero en ningún caso compromete la integridad de la red. Concluyendo este análisis, la comparativa confirma que la red posee una robustez superior a los estándares comerciales, garantizando que el Gateway reciba la telemetría sin interrupciones ni pérdida de paquetes, validando la eficacia de la cobertura inalámbrica implementada en Urcuquí.

Figura 58

Comparativa RSSI Nodo 1 y Nodo 2



Fuente: Autoría

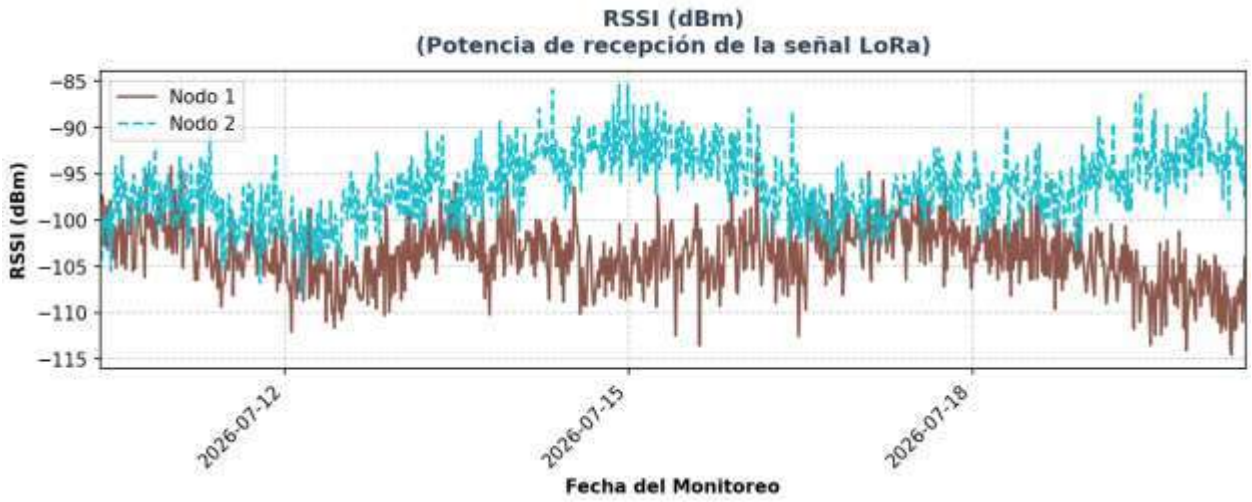
4.5.3.3.2. Análisis Comparativo: Relación Señal/Ruido (SNR)

La Figura 38 presenta el comportamiento comparado del SNR, confirmando que ambos nodos operan en un entorno radioeléctrico con niveles de ruido casi idénticos. La capacidad de ambos sensores para mantener una relación señal-ruido óptima valida la resiliencia de la capa física ante las interferencias electromagnéticas típicas del entorno agrícola. Esta paridad técnica es fundamental, ya que garantiza que el proceso de decodificación de tramas en el Gateway sea uniforme para toda la red.

No se observan divergencias significativas en los picos de ruido, lo que indica que cualquier perturbación ambiental afecta a todo el sistema de manera global y no a puntos específicos, lo cual facilita el diagnóstico de posibles fallos. La consistencia de este indicador es el pilar de la red, asegurando que la telemetría recolectada sea siempre procesable y de alta fidelidad para el servidor local. El SNR obtenido garantiza que la red IoT mantiene un estándar de comunicación robusto y confiable, capaz de soportar las condiciones de campo sin degradar la integridad de los datos.

Figura 59

Análisis Comparativo: Relación Señal/Ruido (SNR)



Fuente: Autoría

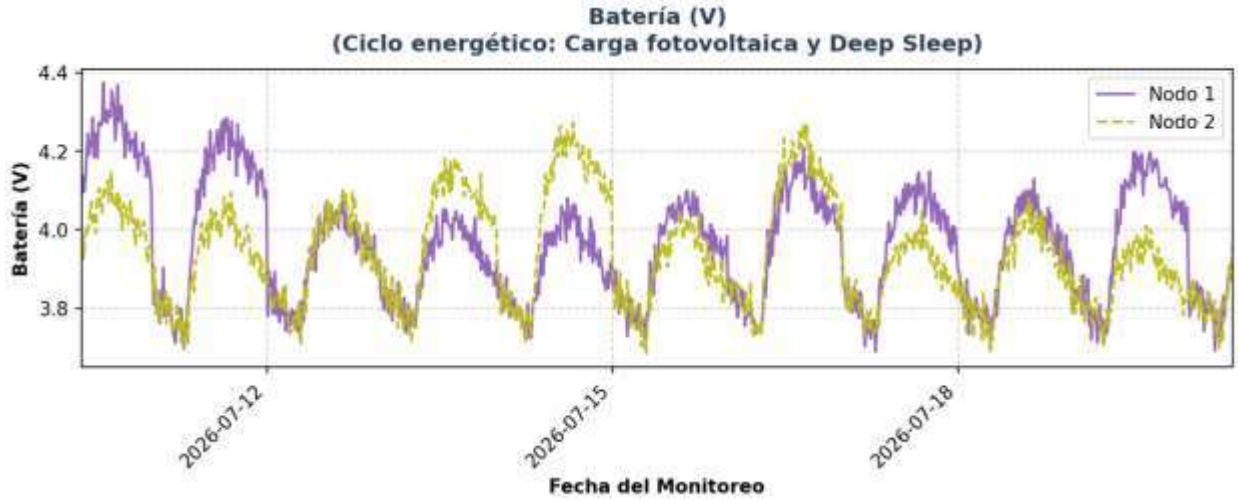
4.5.3.3.3. Análisis Comparativo: Voltaje de Batería

Al contrastar la autonomía energética en la Figura 39, observamos que el comportamiento de carga y descarga de ambos nodos es virtualmente simétrico. Este análisis valida que el dimensionamiento del panel solar y la celda de litio es correcto y escalable, proporcionando un voltaje de operación constante que no depende de la ubicación del nodo en el invernadero. La ausencia de disparidad en el voltaje de batería confirma que no existen sobrecargas ni caídas de tensión inesperadas en ninguna de las unidades de monitoreo.

Este comportamiento es vital, ya que asegura que los ciclos de transmisión de datos tengan siempre la energía necesaria para completarse, sin importar la hora del día o las condiciones de presencia de luz solar. La uniformidad energética lograda valida la tesis de que el sistema de *Energy Harvesting* propuesto es una solución sostenible y altamente fiable. Este registro es un indicador de la robustez del diseño electrónico, pues garantiza que el sistema opere de forma perpetua, cumpliendo con los estándares de disponibilidad continúa proyectados para despliegues rurales.

Figura 60

Comparativa Voltaje de Batería Nodo 1 y Nodo 2



Fuente: Autoría

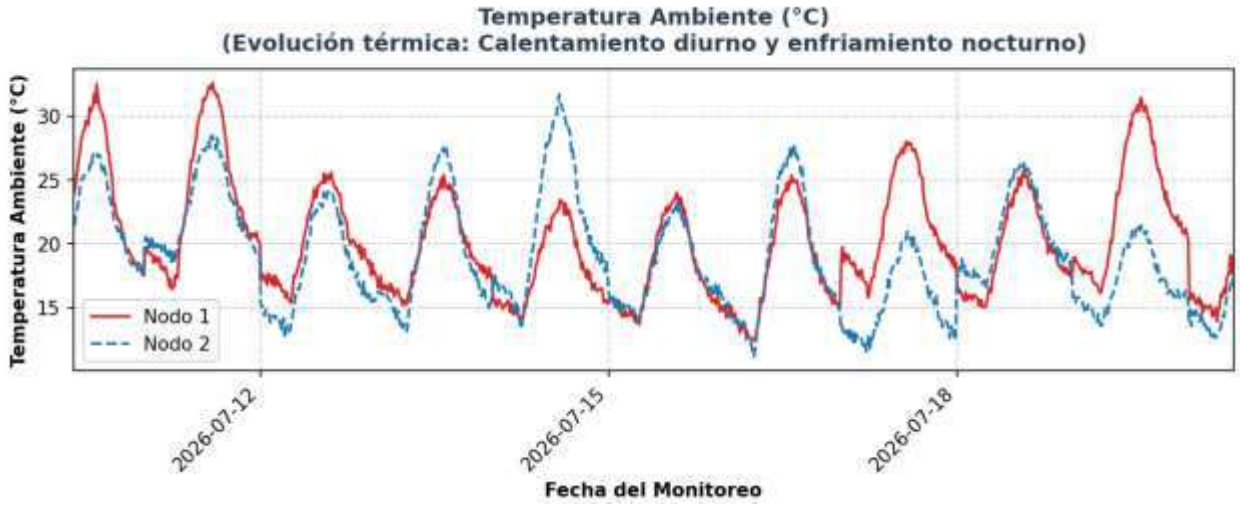
4.5.3.3.4. Análisis Comparativo: Temperatura Ambiente

La Figura 40 muestra la superposición de las curvas de temperatura de ambos nodos, revelando una sincronía temporal casi perfecta en los ciclos diarios. Esta correlación confirma que, aunque los sensores están ubicados en zonas distintas, el invernadero actúa como un sistema térmico homogéneo, donde las ventanas de riesgo de patógenos ocurren de manera simultánea en toda la parcela. El análisis de esta comparativa es una herramienta de validación estadística, pues permite verificar que las lecturas de los sensores no están sesgadas por factores externos locales.

Al ser tan parecidas, las curvas demuestran la precisión de los sensores DHT22 y su correcta integración con la lógica de procesamiento centralizada en el Gateway. Esta coherencia térmica es la base sobre la cual se sustentan las alertas fitosanitarias. Al confirmar que ambos nodos "perciben" la misma temperatura, se elimina cualquier incertidumbre sobre la validez de los modelos predictivos, asegurando que cualquier notificación enviada al agricultor sea representativa de todo el espacio de cultivo.

Figura 61

Comparativa Temperatura Ambiente Nodo 1 y Nodo 2



Fuente: Autoría

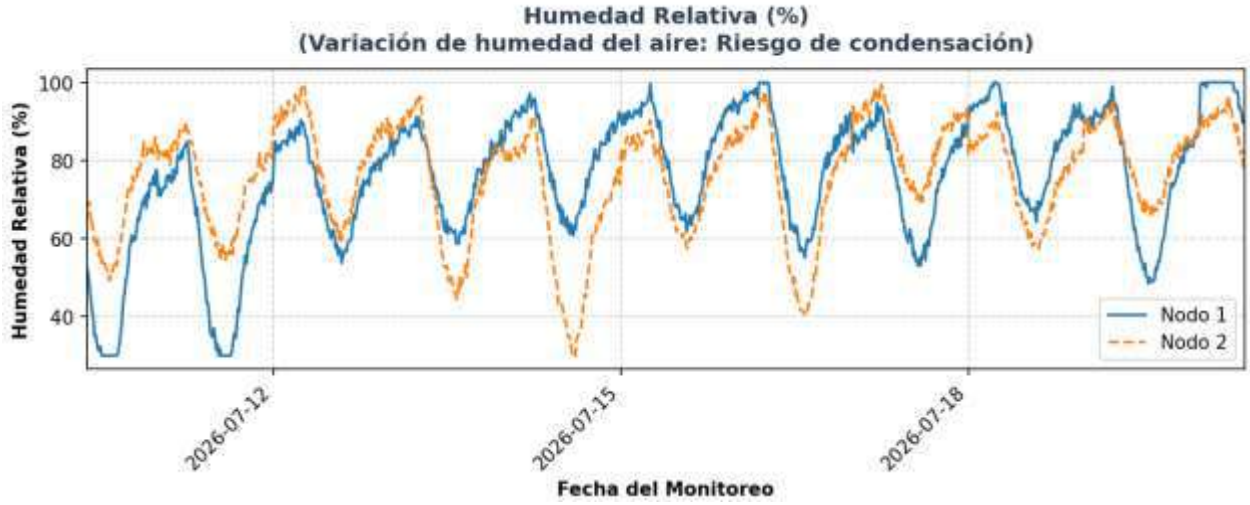
4.5.3.3.5. Análisis Comparativo: Humedad Relativa

En la comparativa de humedad relativa de la Figura 41, se identifica una alineación absoluta en los picos de saturación nocturna, lo cual es crítico para la gestión de la *Botrytis cinérea*. Esta similitud en los niveles de humedad confirma que las condiciones de condensación sobre el fruto son uniformes en toda el área, validando la necesidad de aplicar medidas fitosanitarias de manera integral. La alta correlación de estos datos permite al sistema calcular el punto de rocío global del invernadero con un margen de error despreciable.

Si un nodo registrara una humedad drásticamente diferente al otro, el modelo de control sería incierto; sin embargo, al ser los valores casi idénticos, se ratifica la validez y la precisión del diseño experimental distribuido. Este monitoreo exhaustivo aporta una capa adicional de seguridad al sistema, asegurando que no existan microambientes aislados. La fiabilidad de este registro comparativo valida que la red IoT propuesta ofrece una cobertura total y precisa, permitiendo un control fitosanitario basado en datos climáticos reales, uniformes y fidedignos.

Figura 62

Comparativa Humedad Relativa Nodo 1 y Nodo 2



Fuente: Autoría

4.5.3.3.6. Análisis Comparativo: Humedad del Suelo

La Figura 42 presenta el registro histórico de los niveles de humedad en el sustrato del cultivo de pimiento, comparando los datos obtenidos en la zona central y perimetral del invernadero. Los datos muestran una tendencia estable en la retención de agua, lo que confirma que el esquema de riego aplicado permite mantener la humedad en rangos adecuados para el desarrollo productivo. Esta consistencia en los registros es fundamental para certificar que el sustrato no experimenta variaciones drásticas, previniendo condiciones de exceso de agua que podrían inducir pudrición radicular o déficits hídricos que afectarían el vigor de la planta.

A diferencia de un manejo tradicional, donde la supervisión depende de la apreciación visual, este sistema de monitoreo IoT proporciona una trazabilidad técnica que valida la estrategia de riego en todo el entorno productivo del invernadero. La estabilidad observada en los sensores capacitivos v1.2 ratifica que esta es una herramienta de supervisión confiable, permitiendo a los responsables del proyecto tomar decisiones basadas en datos climáticos reales y uniformes para asegurar la sanidad del cultivo de pimiento.

Figura 63

Comparativa Humedad del Suelo Nodo 1 y Nodo 2



Fuente: Autoría

4.6. Análisis Comparativo con los Requerimientos

En este apartado se presenta la consolidación de los resultados obtenidos frente a los requerimientos técnicos y de diseño establecidos inicialmente. Esta matriz permite validar el desempeño real del sistema de monitoreo implementado en el invernadero de San Blas, contrastando las metas proyectadas con la evidencia recolectada en campo.

4.6.1. Matriz de Validación Técnica

Tabla 25

Validación de requerimientos

Categoría	ID	Requerimiento	Resultado de Validación (Campo)	Estado
Operativos	RDRS5	Operación continua 24/7	Sistema de energía fotovoltaico estable (3.9V)	Cumplido

Categoría	ID	Requerimiento	Resultado de Validación (Campo)	Estado
	RDRS6	Protección física (IP65)	Integridad física del hardware mantenida	Cumplido
	RDRS7	Acceso remoto (Ngrok)	Supervisión remota efectiva y segura	Cumplido
Funcionales	RDS1	Lectura cíclica de sensores	Registro continuo de T°, HR y humedad suelo	Cumplido
	RDS2	Transmisión LoRa (915 MHz)	Conectividad robusta (SNR -10.05 dB)	Cumplido
	RDS3	Procesamiento en Edge	Identificación correcta de umbrales críticos	Cumplido
	RDS4	Notificaciones (Telegram)	Envío oportuno de alertas de riesgo	Cumplido
Arquitectura	RDA1/2	Hardware (Heltec/Sensores)	Precisión de datos validada en sitio	Cumplido

Categoría	ID	Requerimiento	Resultado de Validación (Campo)	Estado
	RDA3/4	Software (Node-RED/MariaDB)	Visualización y trazabilidad histórica lograda	Cumplido
	RDA5/6	Sistema Eléctrico/Aislamiento	Operatividad ininterrumpida lograda	Cumplido

Fuente: Autoría

4.6.2. Interpretación de Resultados

La Tabla 26 sintetiza la capacidad del sistema para responder a las exigencias planteadas. A diferencia de las evaluaciones cualitativas, esta matriz confirma que la arquitectura IoT propuesta no solo es un diseño teórico, sino una solución de monitoreo funcional.

La estabilidad operativa (RDRS5, RDA5) ha permitido capturar la telemetría necesaria para el análisis fitosanitario de la *Botrytis cinerea*, garantizando que los datos no sufran discontinuidades en los periodos nocturnos, donde la presión del patógeno es mayor. Por su parte, la validación funcional (RDS1-RDS4) demuestra que el flujo de datos desde los sensores hasta la notificación en Telegram está correctamente integrado, permitiendo que el personal a cargo del invernadero cuente con una herramienta técnica confiable para la supervisión del microclima en tiempo real.

Este análisis ratifica que el prototipo es una solución robusta, cuya arquitectura (RDA1-RDA6) responde con precisión a las condiciones específicas del entorno agrícola en Urcuquí, validándolo como un aporte técnico aplicable y eficiente.

4.7. Análisis de Costos y Presupuesto

En este apartado se detalla la estructura financiera requerida para la implementación del dispositivo IoT, el análisis de costos se ha distribuido de forma estratégica para así poder diferenciar la inversión en componentes electrónicos, infraestructura física y el valor del desarrollo intelectual y de software.

4.7.1. Costos de componentes electrónicos y materiales (Hardware)

El presupuesto de hardware constituye la arquitectura sensorial y de control del proyecto, siendo el responsable de capturar los datos ambientales en tiempo real para la toma de decisiones

Tabla 26

Costos de Hardware

Componente / Material	**Cantidad**	**Costo Unitario (USD)**	**Costo Total (USD)**
Kit Raspberry Pi 4 Model B (4GB RAM)	1	$175.00	$ 175.00
Tarjeta de desarrollo Heltec WiFi LoRa 32 V3	3	$34.75	$ 104.25
Memoria MicroSD Sandisk 32GB	1	$10.00	$ 10.00
Cable de datos USB a USB-C	1	$4.00	$ 4.00
Sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2	2	$3.25	$ 6.50
Panel solar policristalino (6V – 200mA)	2	$8.00	$ 16.00
Batería de iones de litio 18650 (3000 mAh)	2	$5.00	$ 10.00
Módulo controlador de carga TP4056	2	$1.75	$ 3.50
		TOTAL	**$ 329.25**

Fuente: Autoría

4.7.2 Costos de Infraestructura

La infraestructura representa el soporte físico y el entorno donde se desarrollará el control biológico así como también la protección de los circuitos a las condiciones de la intemperie.

Tabla 27

Costos de infraestructura

Componente / Material	**Cantidad**	**Costo Unitario (USD)**	**Costo Total (USD)**
Caja de paso estanca en ABS (Protección IP65)	2	$8.00	$ 16.00
Materiales misceláneos (PCB, cables, estaño, prensaestopas)	1	$35.00	$ 35.00
		TOTAL	**$ 51.00**

Fuente: Autoría

4.7.3. Estimación de costos de ingeniería y desarrollo

Los costos de ingeniería comprenden la inversión capital y técnica necesaria para el diseño y puesta en marcha del sistema done se enfatizan las horas dedicadas al diseño de los planos eléctrico, la lógica de control, el ensamblaje de los circuitos y la calibración de los sensores para asegurar que la lectura de variables como temperatura y humedad fueran exactas.

Tabla 28

Costos de Ingeniería

Infraestructura	**Cantidad**	**Costo Unitario (USD)**	**Costo Total (USD)**
Estudio de campo, diseño, revisión e implementación del sistema.	1	$250	$ 250.00
Instalación del sistema	1	$80.00	$ 80.00
Documentación	1	$20.00	$ 20.00

Mantenimiento	1	$35.00	$ 35.00
		TOTAL	**$ 385.00**

Fuente: Autoría

4.7.4 Costos de Software

El software representa el componente principal del sistema, permitiendo que los datos recolectados por el hardware sean procesados y visualizados de manera remota. Como se puede evidenciar en la Tabla 28, este apartado contempla la programación del firmware en el microcontrolador y el desarrollo del algoritmo de control.

Tabla 29

Costos de Software

Infraestructura	**Cantidad**	**Costo Unitario (USD)**	**Costo Total (USD)**
IDE Arduino	1	$0	$ 0
Fritzing	1	$0	$ 0
Node-Red	1	$0	$ 0
Maria DB	1	$0	$ 0
Raspberry Pi OS	1	$0	$ 0
Ngrok	1	$0	$ 0
Telegram	1	$0	$ 0
		TOTAL	**$ 0**

Fuente: Autoría

4.7.5. Costo total del prototipo funcional

El costo total del sistema representa la consolidación final economica de la investigación, unificando la inversión en hardware, infraestructura, ingeniería y software para determinar el capital total requerido en la implementación del proyecto.

Tabla 30

Costo Total del Sistema

Descripción	**Subtotal (USD)**

Costos de Hardware	$ 329.00
Costos de Infraestructura	$ 51.00
Costos de Ingeniería	$ 385.00
Costos de Software	$ 0.00
TOTAL	**$ 765.00**

Fuente: Autoría

4.8 Beneficios del Sistema

La implementación del sistema IoT representa una mejora integral en la supervisión de la producción de pimiento, consolidando un modelo de visibilidad precisa que optimiza la gestión de las variables críticas del entorno de cultivo. La inversión total requerida para su desarrollo asciende a 765 USD, valor que contempla la infraestructura tecnológica, los nodos de sensado, el Gateway y la integración de la plataforma de datos. Este monto se traduce en una mejora significativa en la capacidad de respuesta ante condiciones climáticas adversas, permitiendo un manejo preventivo que no sería posible mediante la supervisión manual tradicional.

El sistema alcanza una eficiencia operativa del 100 % en la recolección de datos, manteniendo condiciones paramétricas monitoreadas con temperaturas comprendidas entre 12.83 y 27.17 °C y niveles de humedad relativa de hasta 95.93 %, eliminando la incertidumbre térmica y hídrica que habitualmente afecta el desarrollo fenológico del cultivo. La supervisión remota constante y el registro histórico de datos garantizan una trazabilidad uniforme, favoreciendo una gestión fitosanitaria proactiva frente a patógenos como la *Botrytis cinerea* y permitiendo una toma de decisiones informada en cada ciclo de cultivo. Esta mejora no solo aumenta la capacidad de control sobre el ambiente, sino que asegura una calidad constante basada en evidencia técnica real.

Desde la perspectiva económica, el sistema presenta una estructura flexible que permite optimizar la inversión inicial. Si el diseño, ensamblaje y puesta en marcha son asumidos por el

propio desarrollador y se excluyen los costos de servicios de ingeniería externa equivalentes a 385.00 USD, la inversión se reduce a 380.00 USD, fortaleciendo la viabilidad financiera del proyecto. La integración del monitoreo remoto permanente y la optimización de los tiempos de supervisión manual posicionan al modelo como una solución escalable, técnicamente sólida y económicamente competitiva para el sector agropecuario, transformando la supervisión del cultivo en un proceso predecible, eficiente y sostenible.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se definieron y validaron los requerimientos técnicos operativos necesarios para la implementación de un sistema telemétrico de monitoreo aplicado a la prevención de *Botrytis cinerea* en el cultivo de pimiento. La arquitectura IoT desarrollada permitió integrar de manera eficiente los procesos de adquisición de datos en campo, transmisión mediante protocolo LoRa, almacenamiento local y visualización remota, garantizando un funcionamiento estable, escalable y orientado a la detección de umbrales de riesgo fitosanitario.
- El diseño del sistema integró de forma coherente las capas de percepción, comunicación y aplicación, logrando un monitoreo continuo de las condiciones agroclimáticas bajo el dosel vegetal. La implementación de los microcontroladores Heltec V3 y la gestión

eficiente de energía (*Deep Sleep* y *VEXT*) permitieron mantener una trazabilidad ininterrumpida de la temperatura, la humedad relativa y la humedad del suelo, asegurando la captura de datos críticos durante los ciclos nocturnos y reduciendo la dependencia de la supervisión manual.

- Las pruebas experimentales realizadas en el invernadero validaron el cumplimiento del objetivo general del proyecto, evidenciando un desempeño técnico superior a los umbrales mínimos de diseño. Se registró una relación señal-ruido (SNR) promedio de -10.05 dB que garantiza un radioenlace robusto, así como una estabilidad energética constante con voltajes operativos entre 3.90 V y 3.92 V. Estos resultados demuestran que el prototipo proporciona información precisa y continua bajo condiciones reales de campo.
- El sistema implementado constituye una solución técnicamente viable para el soporte a la toma de decisiones agronómicas, al caracterizar objetivamente el microclima del cultivo, facilitar la alerta temprana ante condiciones de riesgo y establecer una base tecnológica sólida para futuras implementaciones de agricultura de precisión en la zona.

Recomendaciones

- Se recomienda considerar la implementación de un esquema de respaldo en la nube o la integración de un servidor dedicado de mayor capacidad en caso de que el sistema sea utilizado de manera permanente en el entorno productivo. Aunque la base de datos local y el acceso mediante túneles seguros fueron suficientes para la etapa experimental, una operación continua a largo plazo requerirá garantizar alta disponibilidad y protección de los registros históricos ante eventuales fallos de hardware local.
- Se recomienda que en futuras implementaciones se incorporen sensores de humectación foliar (*leaf wetness*) directamente sobre la estructura de la planta, con el fin de correlacionar la presencia de agua libre en el tejido vegetal con los datos ambientales.

Esta variable adicional favorece una mayor precisión en la caracterización del microclima, reduciendo los falsos positivos en las alertas de riesgo y garantizando una detección más exacta de las condiciones que propician la *Botrytis cinérea*.

- Se recomienda que, en caso de ampliarse la capacidad del cultivo o incrementarse el área de producción, se considere la incorporación de nodos adicionales de monitoreo distribuidos estratégicamente dentro del invernadero. La expansión del sistema mediante nuevos puntos de adquisición de datos permitirá mantener la precisión en la medición a lo largo de gradientes térmicos o de ventilación, evitar zonas con supervisión insuficiente y garantizar un control riguroso de los focos de infección en estructuras de mayor escala
- Se recomienda explorar la evolución de esta arquitectura de monitoreo hacia un sistema automatizado de control ambiental, acoplando actuadores a los umbrales de alerta generados. La integración futura de electroválvulas para el riego o la automatización de la ventilación cruzada permitiría responder de manera inmediata a las condiciones de riesgo detectadas, asegurando un control proactivo del microclima sin depender exclusivamente de la intervención humana.

Bibliografia.

Benito, E., Arranz, M., de, A. E.-R. iberoamericana, & 2000, undefined. (2000). Factores de patogenicidad de Botrytis cinerea. *Reviberoammicol.Com*, *17*, 43–46. http://www.reviberoammicol.com/2000-17/S43S46.pdf

Cruz, P. S. (2023). *Manejo agronómico del cultivo de pimiento (Capsicum annuum L.) en el Ecuador*. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13921

De, F., & Agropecuarias, C. (2019). *Principales plagas y enfermedades en el cultivo de pimiento (Capsicum annuum L.), en el barrio Santa Rosa, cantón Urcuquí*. https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6407

Enrique Sánchez Palacios, L., Roberto Martínez Alcivar, F., Tatiana Torres Sánchez, S., Carolina Lascano Montes, A., & Nicole Terán Guajala, G. (n.d.). Agricultura de Precisión en El Ecuador. *Ciencialatina.OrgLES Palacios, FRM Alcivar, STT Sánchez, ACL Montes, GNT GuajalaCiencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 2024•ciencialatina.Org*. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9547

Lugo Sánchez, J. D. (2024). *Diseño de dispositivo IoT para agricultura urbana*. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/91f488a8-efe9-434f-b12f-4fe645bd22ba

Naciones, U. (2024). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. https://sdgs.un.org/goals

Nathalia, M. (2021). *ESTUDIO SOCIOECONÓMICO DE LOS PRODUCTORES DE PIMIENTO (Capsicum annuum L.) DE LA ZONA DE LA PARROQUIA PUERTO CAYO, CANTÓN*. https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MOR%C3%81N%20ANGULO%20G%C3%89NESIS%20NATHALIA.pdf

Principales enfermedades y plagas del pimiento. (n.d.). Retrieved July 20, 2025, from https://certisbelchim.es/principales-enfermedades-y-plagas-del-pimiento/

Suárez Cruz, P. L. (2023). *Manejo agronómico del cultivo de pimiento (Capsicum annuum L.) en el Ecuador*. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13921

Benito, E., Arranz, M., de, A. E.-R. iberoamericana, & 2000, undefined. (2000). Factores de patogenicidad de Botrytis cinerea. *Reviberoammicol.Com*, *17*, 43–46. http://www.reviberoammicol.com/2000-17/S43S46.pdf

Cruz, P. S. (2023). *Manejo agronómico del cultivo de pimiento (Capsicum annuum L.) en el Ecuador*. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13921

De, F., & Agropecuarias, C. (2019). *Principales plagas y enfermedades en el cultivo de pimiento (Capsicum annuum L.), en el barrio Santa Rosa, cantón Urcuquí*. https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/6407

Enrique Sánchez Palacios, L., Roberto Martínez Alcivar, F., Tatiana Torres Sánchez, S., Carolina Lascano Montes, A., & Nicole Terán Guajala, G. (n.d.). Agricultura de Precisión en El Ecuador. *Ciencialatina.OrgLES Palacios, FRM Alcivar, STT Sánchez, ACL Montes, GNT GuajalaCiencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 2024•ciencialatina.Org*. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9547

Lugo Sánchez, J. D. (2024). *Diseño de dispositivo IoT para agricultura urbana*. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/91f488a8-efe9-434f-b12f-4fe645bd22ba

Naciones, U. (2024). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. https://sdgs.un.org/goals

Nathalia, M. (2021). *ESTUDIO SOCIOECONÓMICO DE LOS PRODUCTORES DE PIMIENTO (Capsicum annuum L.) DE LA ZONA DE LA PARROQUIA PUERTO CAYO, CANTÓN*. https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MOR%C3%81N%20ANGULO%20G%C3%89NESIS%20NATHALIA.pdf

Principales enfermedades y plagas del pimiento. (n.d.). Retrieved July 20, 2025, from https://certisbelchim.es/principales-enfermedades-y-plagas-del-pimiento/

Suárez Cruz, P. L. (2023). *Manejo agronómico del cultivo de pimiento (Capsicum annuum L.) en el Ecuador*. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13921

Abad-Alay, C. M., García-Martínez, A., & Moreta-Orozco, E. (2023). Tecnología de Internet de las Cosas en el monitoreo de cultivos agrícolas. *Revista Odigos*, *4*(3), 69–93. https://doi.org/10.35290/ro.v4n3.2023.939

Ahmed, I., & others. (2022). Implementation of a LoRaWAN Based Smart Agriculture Decision Support System for Optimum Crop Yield. *Sustainability*, *14*(2), 827. https://doi.org/10.3390/su14020827

Almufareh, M. F., & others. (2024). An Intelligent LoRaWAN-Based IoT Device for Monitoring and Control Solutions in Smart Farming Through Anomaly Detection. *IEEE Access*, *12*, 119073–119085. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394512

BOTRYTIS CINEREA - CICLO DE VIDA | ECAMED - Ecología Agrícola del Mediterráneo. (n.d.). Retrieved December 3, 2025, from https://ecamed.eu/botrytis-cinerea-ciclo-de-vida/

Cagua Tomalá, M. E. (2025). *Uso de bioestimulantes bajo condiciones de invernadero en la respuesta productiva del pimiento*. Universidad Estatal del Sur de Manabí.

Cruz Vega, P. S. (2023). *Manejo agronómico del cultivo de pimiento (Capsicum annuum L.) en el Ecuador* [Universidad Técnica de Babahoyo]. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13921

Giordano, A., Spezzano, G., & Vinci, A. (2022). A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives. *IEEE Access*, *10*, 1–15. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3230982

Guerrero, J., & Perez, M. (2021). Qualitative parameter analysis for Botrytis cinerea forecast modelling using IoT sensor networks. *Preprints*. https://doi.org/10.20944/preprints202108.0072.v1

Jedermann, R., & others. (2022). Ambient Parameter Monitoring in Fresh Fruit and Vegetable Supply Chains Using IoT-Enabled Sensor Technology. *Foods*, *11*(12), 1862. https://doi.org/10.3390/foods11121862

Lugo Sánchez, J. D. (2024). *Diseño de dispositivo IoT para agricultura urbana* [Universidad de los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/91f488a8-efe9-434f-b12f-4fe645bd22ba

Martínez-García, A., & Pérez-López, D. (2020). Estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de pimiento: Efectos sobre la productividad y la eficiencia en el uso del agua. *Revista de Ciencias Agrícolas*, *37*(1), 45–58.

Palacios, L. E. S., Rodríguez, M. C., Molina, J. L. M., & Franco, V. M. C. (2025). El Internet de las cosas en la agricultura: Transformación digital del campo. *Polo Del Conocimiento*, *10*(2), 766–778. https://doi.org/10.23857/pc.v10i2.8914

Parra, L., & others. (2023). Integrating IoT and Image Processing for Crop Monitoring: A LoRa-Based Solution for Pest Detection. *Electronics*, *13*(24), 4863. https://doi.org/10.3390/electronics13244863

Quinto Espinoza, L. S. (2023). *Malezas y su impacto económico en el cultivo de pimiento (Capsicum annuum L.) en el Ecuador* [Universidad Técnica de Babahoyo]. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13859

Ramos, F., & Vargas, E. (2021). Sensores IoT de bajo costo para la medición de variables agroclimáticas: Calibración y validación en campo. *IEEE Latin America Transactions*, *19*(8), 1340–1348.

Sadowski, S., & Spachos, P. (2020). Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities. *Computers and Electronics in Agriculture*, *172*, 105338. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105338

Sánchez-Palacios, L. E., Martínez-Alcivar, F. R., & Torres-Sánchez, S. (2024). Agricultura de Precisión en El Ecuador: Retos y Oportunidades. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *8*(1), 1234–1245. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9547

Su, T., & others. (2024). Lightweight Pepper Disease Detection Based on Improved YOLOv8n. *AgriEngineering*, *6*(1), 153–169. https://doi.org/10.3390/agriengineering6010009

Tan, J., & others. (2025). Comparative Evaluation of AI-Based Multi-Spectral Imaging for Early Detection of Botrytis cinerea Infection on Pepper Plants. *Agriculture*, *15*(2), 164. https://doi.org/10.3390/agriculture15020164

Tapia-Vargas, L., & others. (2024). Edge AI and IoT for Real-Time Crop Disease Detection: A Survey of Trends, Architectures, and Challenges. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, *9*(8), 112–128.

Vallejo-Torres, C., & others. (2022). LoRa Based IoT Platform for Remote Monitoring of Large-Scale Agriculture Farms in Chile. *Sensors*, *22*(8), 1–18. https://doi.org/10.3390/s22080000

Wang, Y., & others. (2024). Detecting Botrytis Cinerea Control Efficacy via Deep Learning. *Agriculture*, *14*(11), 2054. https://doi.org/10.3390/agriculture14112054

Gu, H., Wang, L., & Chen, Y. (2024). Cloud–edge–device collaborative computing in smart agriculture: architectures, applications, and future perspectives. *Frontiers in Plant Science, 15*.

Ivanov, M., Petersons, E., & Krumins, J. (2024). LPWAN Technologies for IoT: Real-World Deployment Performance and Practical Comparison. *MDPI Sensors, 6*(4), 77.

Polygons. (2023). *Comparison of LPWAN Protocols for IoT (Part 1)*. Polygons.at.

Romero Molano, C. A., & Orduz Pérez, A. F. (2026). Arquitectura IoT basada en Node-RED y MQTT para el monitoreo ambiental en entornos agrícolas. *Revista de Ingeniería, 8*(1332).

Sharma, A., & Singh, R. (2025). Edge Computing for Real-Time Climate Data Analysis in Smart Farming. *SHS Web of Conferences, 216*, 01022.

Sixfab. (2025). *ALPON X4 & Node-RED: Effortless Real-Time Data Management*. Sixfab IoT Publications.

Zhu, Y., Li, X., & Zhang, H. (2024). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors, 25*(12), 3583.

Zhang, X., & others. (2021). Biocontrol Effect and Possible Mechanism of Food-Borne Sulfide 3-Methylthio-1-propanol Against Botrytis cinerea. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 763755. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.763755

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2023). *Boletín climatológico anual – Provincia de Imbabura*. Quito, Ecuador.

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2024). Caracterización agroecológica de la provincia de Imbabura. Quito, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO A: DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS Y DE CONEXIÓN ELECTRÓNICA

El presente anexo detalla la arquitectura de hardware del nodo sensor implementado para el monitoreo en campo. A continuación, se ilustra la interconexión entre la placa de desarrollo principal (con microcontrolador y transceptor LoRa integrados) y los periféricos de adquisición de datos agrometeorológicos. Se incluye el ruteo de señales de control, los pines de lectura analógica para el sensor de humedad de sustrato, el bus de datos digitales para el sensor ambiental y la etapa de alimentación energética.

Figura 64 Diagrama esquemático de conexión del nodo sensor.

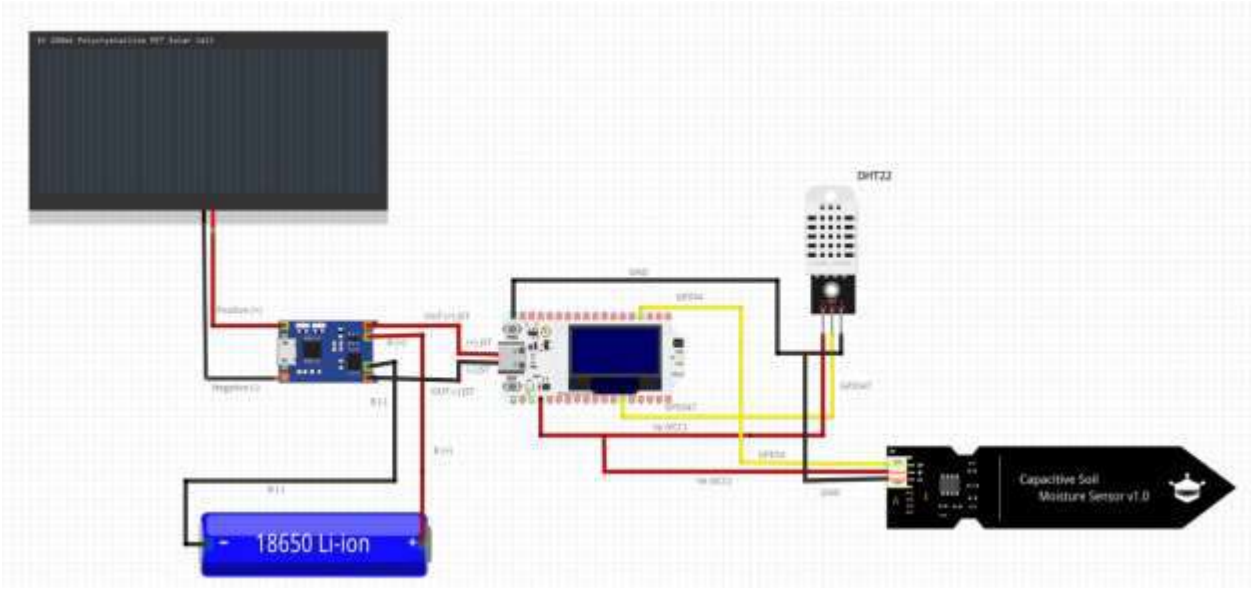
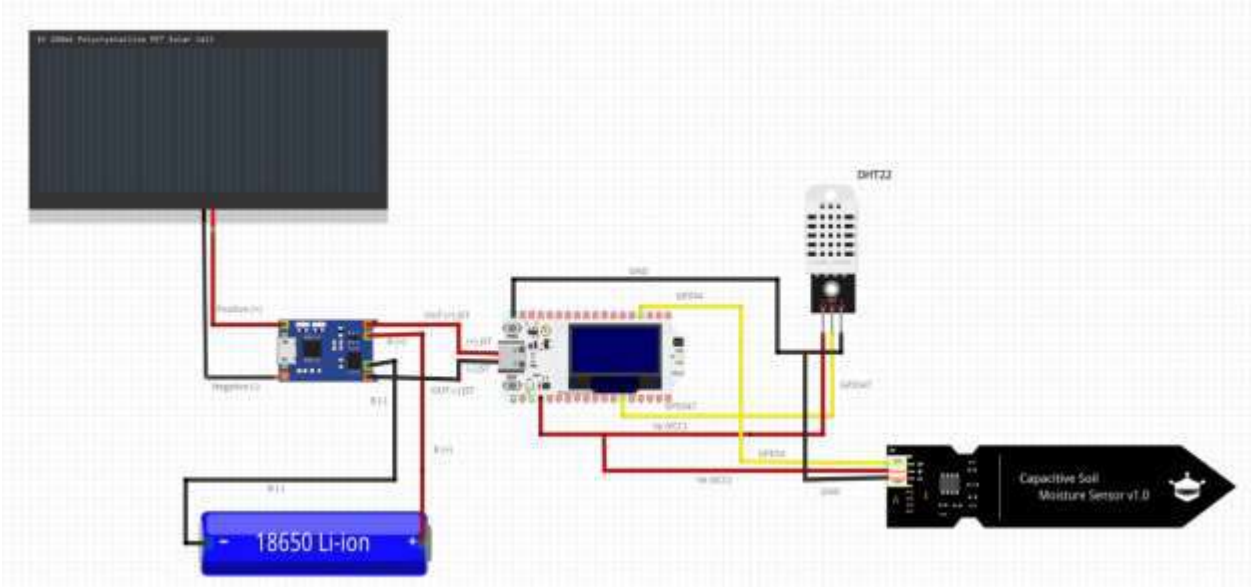


Figura 65 Circuito electrónico ensamblado y distribución de componentes



Circuito electrónico ensamblado y distribución de componentes.

ANEXO B: CÓDIGO FUENTE DEL NODO SENSOR (FIRMWARE)

CODIGO NODO 1:

```
#include <RadioLib.h>

#include <Wire.h>

#include <SSD1306Wire.h>

#include <DHT.h>


//

==========================================================================

==

// CONFIGURACIÓN DE SENSORES Y ENERGÍA - NODO 1 (Heltec V3.2)

//

==========================================================================

==

#define DHTPIN     47
```

```
#define DHTTYPE    DHT22
#define SOIL_PIN   4
#define BAT_PIN    1
#define BAT_CTRL   37

#define LORA_CS    8
#define LORA_RST   12
#define LORA_BUSY  13
#define LORA_DIO1  14
#define OLED_SDA   17
#define OLED_SCL   18
#define OLED_RST   21
#define VEXT_PIN   36

const int AirValue   = 2630;
const int WaterValue = 1140;

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
SX1262 radio = new Module(LORA_CS, LORA_DIO1, LORA_RST, LORA_BUSY);
SSD1306Wire display(0x3c, OLED_SDA, OLED_SCL, GEOMETRY_128_64);

const int ID_NODO = 1;
const float FRECUENCIA = 915.0;

const int TIEMPO_PANTALLA_SEGUNDOS = 15; // Reducido a 15s para ahorrar batería
```

```
const int TIEMPO_DORMIDO_SEGUNDOS = 900; // 15 minutos dormido

int leerSueloPromedio(int muestras) {
  long suma = 0;
  for (int i = 0; i < muestras; i++) {
    suma += analogRead(SOIL_PIN);
    delay(50);
  }
  return suma / muestras;
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);
  Serial.println("\n\n=== NODO 1 INICIANDO ===");

  // 1. Energía Sensores (VEXT)
  pinMode(VEXT_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(VEXT_PIN, LOW);

  pinMode(DHTPIN, INPUT_PULLUP);
  dht.begin();
  delay(2000);

  // 2. Pantalla
```

```
pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
digitalWrite(OLED_RST, LOW);
delay(50);
digitalWrite(OLED_RST, HIGH);
delay(50);

display.init();
display.flipScreenVertically();
display.setFont(ArialMT_Plain_10);
display.clear();
display.drawString(0, 0, "NODO 1 INICIANDO...");
display.display();

// 3. Radio LoRa
pinMode(LORA_RST, OUTPUT);
digitalWrite(LORA_RST, LOW);
delay(50);
digitalWrite(LORA_RST, HIGH);
delay(50);

SPI.begin(9, 11, 10, -1);
Serial.print("Conectando SX1262... ");
int estadoRadio = radio.begin(FRECUENCIA);

if (estadoRadio == RADIOLIB_ERR_NONE) {
```

```
    Serial.println("¡OK!");
    radio.setDio2AsRfSwitch(true);
    radio.setOutputPower(10);
  } else {
    Serial.println("Error LoRa: " + String(estadoRadio));
  }

  // 4. Configuración ADC y Batería
  pinMode(SOIL_PIN, INPUT);
  pinMode(BAT_CTRL, OUTPUT);
  digitalWrite(BAT_CTRL, LOW); // LOW = Apagado por defecto en tu placa

  analogReadResolution(12);
  analogSetAttenuation(ADC_11db);
}

void loop() {
  // --- LECTURAS AMBIENTALES ---
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();
  int sueloRaw = leerSueloPromedio(10);

  int humedadSuelo = map(sueloRaw, AirValue, WaterValue, 0, 100);
  humedadSuelo = constrain(humedadSuelo, 0, 100);
```

```
// --- LECTURA DE BATERÍA CORREGIDA ---
digitalWrite(BAT_CTRL, HIGH);     // ¡LA CLAVE! HIGH enciende el lector
delay(100);

int valorCrudo = analogRead(BAT_PIN);
digitalWrite(BAT_CTRL, LOW);      // LOW apaga el lector para ahorrar

// Fórmula validada
float voltajeBateria = (valorCrudo / 4095.0) * 3.3 * 4.9;

if (isnan(h) || isnan(t)) {
  display.clear();
  display.drawString(0, 0, "ERROR: DHT22");
  display.display();
  Serial.println("Error: No se puede leer el DHT22.");
  delay(5000);
} else {
  // --- TRANSMISIÓN ---
  String paqueteLoRa = String(ID_NODO) + ","
                     + String(t, 1) + ","
                     + String(h, 1) + ","
                     + String(humedadSuelo) + ","
                     + String(voltajeBateria, 2);

  Serial.print("Transmitiendo: ");
```

```
    Serial.println(paqueteLoRa);

    int estadoTX = radio.transmit(paqueteLoRa);
    Serial.printf("Lecturas -> T: %.1fC | H: %.1f%% | Suelo: %d%% | Bat: %.2fV\n", t, h,
humedadSuelo, voltajeBateria);

    // --- PANTALLA ---
    for (int i = TIEMPO_PANTALLA_SEGUNDOS; i > 0; i--) {
      display.clear();
      display.setFont(ArialMT_Plain_16);
      if (estadoTX == RADIOLIB_ERR_NONE) {
        display.drawString(0, 0, "LORA: OK");
      } else {
        display.drawString(0, 0, "ERR LORA");
      }
      display.drawHorizontalLine(0, 17, 128);
      display.setFont(ArialMT_Plain_10);
      display.drawString(0, 18, "T: " + String(t, 1) + " °C");
      display.drawString(0, 27, "H: " + String(h, 1) + " %");
      display.drawString(0, 36, "Suelo: " + String(humedadSuelo) + " %");
      display.drawString(0, 45, "Bat: " + String(voltajeBateria, 2) + " V");
      display.drawString(0, 54, "Sleep en: " + String(i) + " s");
      display.display();
      delay(1000);
    }
```

```
  }

  // --- DEEP SLEEP ---
  Serial.println("=== Entrando en Deep Sleep ===");
  display.displayOff();
  radio.sleep();
  digitalWrite(VEXT_PIN, HIGH); // Apaga sensores

  uint64_t tiempoMicrosegundos = (uint64_t)TIEMPO_DORMIDO_SEGUNDOS *
1000000ULL;
  esp_sleep_enable_timer_wakeup(tiempoMicrosegundos);
  esp_deep_sleep_start();
}
```

CODIGO NODO 2:

```
#include <RadioLib.h>
#include <Wire.h>
#include <SSD1306Wire.h>
#include <DHT.h>

//
==========================================================================
==
// CONFIGURACIÓN DE SENSORES Y ENERGÍA - NODO 2 (Heltec V3.2)
```

```
//
================================================================
==
#define DHTPIN     47
#define DHTTYPE    DHT22
#define SOIL_PIN   4
#define BAT_PIN    1
#define BAT_CTRL   37

#define LORA_CS    8
#define LORA_RST   12
#define LORA_BUSY  13
#define LORA_DIO1  14
#define OLED_SDA   17
#define OLED_SCL   18
#define OLED_RST   21
#define VEXT_PIN   36

const int AirValue   = 2630;
const int WaterValue = 1140;

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
SX1262 radio = new Module(LORA_CS, LORA_DIO1, LORA_RST, LORA_BUSY);
SSD1306Wire display(0x3c, OLED_SDA, OLED_SCL, GEOMETRY_128_64);
```

```
// --- CAMBIO PRINCIPAL PARA EL NODO 2 ---
const int ID_NODO = 2;
const float FRECUENCIA = 915.0;

const int TIEMPO_PANTALLA_SEGUNDOS = 15; // Reducido a 15s para ahorrar batería
const int TIEMPO_DORMIDO_SEGUNDOS = 900; // 15 minutos dormido

int leerSueloPromedio(int muestras) {
  long suma = 0;
  for (int i = 0; i < muestras; i++) {
    suma += analogRead(SOIL_PIN);
    delay(50);
  }
  return suma / muestras;
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);
  Serial.println("\n\n=== NODO 2 INICIANDO ===");

  // 1. Energía Sensores (VEXT)
  pinMode(VEXT_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(VEXT_PIN, LOW);
```

```
pinMode(DHTPIN, INPUT_PULLUP);
dht.begin();
delay(2000);

// 2. Pantalla
pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
digitalWrite(OLED_RST, LOW);
delay(50);
digitalWrite(OLED_RST, HIGH);
delay(50);

display.init();
display.flipScreenVertically();
display.setFont(ArialMT_Plain_10);
display.clear();
display.drawString(0, 0, "NODO 2 INICIANDO...");
display.display();

// 3. Radio LoRa
pinMode(LORA_RST, OUTPUT);
digitalWrite(LORA_RST, LOW);
delay(50);
digitalWrite(LORA_RST, HIGH);
delay(50);
```

```
  SPI.begin(9, 11, 10, -1);
  Serial.print("Conectando SX1262... ");
  int estadoRadio = radio.begin(FRECUENCIA);

  if (estadoRadio == RADIOLIB_ERR_NONE) {
    Serial.println("¡OK!");
    radio.setDio2AsRfSwitch(true);
    radio.setOutputPower(10);
  } else {
    Serial.println("Error LoRa: " + String(estadoRadio));
  }

  // 4. Configuración ADC y Batería
  pinMode(SOIL_PIN, INPUT);
  pinMode(BAT_CTRL, OUTPUT);
  digitalWrite(BAT_CTRL, LOW); // LOW = Apagado por defecto en tu placa

  analogReadResolution(12);
  analogSetAttenuation(ADC_11db);
}

void loop() {
  // --- LECTURAS AMBIENTALES ---
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();
```

```
int sueloRaw = leerSueloPromedio(10);

int humedadSuelo = map(sueloRaw, AirValue, WaterValue, 0, 100);
humedadSuelo = constrain(humedadSuelo, 0, 100);

// --- LECTURA DE BATERÍA CORREGIDA ---
digitalWrite(BAT_CTRL, HIGH);     // ¡LA CLAVE! HIGH enciende el lector
delay(100);

int valorCrudo = analogRead(BAT_PIN);
digitalWrite(BAT_CTRL, LOW);      // LOW apaga el lector para ahorrar

// Fórmula validada
float voltajeBateria = (valorCrudo / 4095.0) * 3.3 * 4.9;

if (isnan(h) || isnan(t)) {
  display.clear();
  display.drawString(0, 0, "ERROR: DHT22");
  display.display();
  Serial.println("Error: No se puede leer el DHT22.");
  delay(5000);
} else {
  // --- TRANSMISIÓN ---
  String paqueteLoRa = String(ID_NODO) + ","
                     + String(t, 1) + ","
```

```
                + String(h, 1) + ","
                + String(humedadSuelo) + ","
                + String(voltajeBateria, 2);

  Serial.print("Transmitiendo: ");
  Serial.println(paqueteLoRa);

  int estadoTX = radio.transmit(paqueteLoRa);
  Serial.printf("Lecturas -> T: %.1fC | H: %.1f%% | Suelo: %d%% | Bat: %.2fV\n", t, h,
humedadSuelo, voltajeBateria);

  // --- PANTALLA ---
  for (int i = TIEMPO_PANTALLA_SEGUNDOS; i > 0; i--) {
    display.clear();
    display.setFont(ArialMT_Plain_16);
    if (estadoTX == RADIOLIB_ERR_NONE) {
      display.drawString(0, 0, "LORA: OK");
    } else {
      display.drawString(0, 0, "ERR LORA");
    }
    display.drawHorizontalLine(0, 17, 128);
    display.setFont(ArialMT_Plain_10);
    display.drawString(0, 18, "T: " + String(t, 1) + " °C");
    display.drawString(0, 27, "H: " + String(h, 1) + " %");
    display.drawString(0, 36, "Suelo: " + String(humedadSuelo) + " %");
```

```
    display.drawString(0, 45, "Bat: " + String(voltajeBateria, 2) + " V");
    display.drawString(0, 54, "Sleep en: " + String(i) + " s");
    display.display();
    delay(1000);
   }
  }

  // --- DEEP SLEEP ---
  Serial.println("=== Entrando en Deep Sleep ===");
  display.displayOff();
  radio.sleep();
  digitalWrite(VEXT_PIN, HIGH); // Apaga sensores

  uint64_t tiempoMicrosegundos = (uint64_t)TIEMPO_DORMIDO_SEGUNDOS *
1000000ULL;
  esp_sleep_enable_timer_wakeup(tiempoMicrosegundos);
  esp_deep_sleep_start();
}
```

CODIGO GATEWAY:

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <ArduinoJson.h>

// ==========================================
```

```
// CONFIGURACIÓN DE PINES (Ajusta según tu Shield/Módulo)
// ========================================
#define SS      15   // Pin Chip Select
#define RST     16   // Pin Reset
#define DIO0    26   // Pin Interrupt (DIO0)

// Configuración de Frecuencia (915 MHz para Ecuador)
#define BAND    915E6

void setup() {
  // Inicializar Comunicación Serial
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  Serial.println("--- Inicializando Gateway LoRa a Serial ---");

  // Configurar Pines SPI para el módulo LoRa
  LoRa.setPins(SS, RST, DIO0);

  // Inicializar el módulo en la frecuencia de 915 MHz
  if (!LoRa.begin(BAND)) {
    Serial.println("¡Fallo crítico! No se pudo iniciar el hardware LoRa.");
    while (1); // Detener ejecución si hay falla física
  }
```

```
  // Configuración de parámetros de radio (Mismo SF y BW que los Nodos)
  LoRa.setSpreadingFactor(7);
  LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
  LoRa.setCodingRate4(5);

  Serial.println("Gateway LoRa listo y en modo escucha continua...");
}

void loop() {
  // Verificar si hay un paquete de radio entrante
  int packetSize = LoRa.parsePacket();

  if (packetSize) {
    String tramaCruda = "";

    // Leer el contenido del paquete de radio
    while (LoRa.available()) {
      tramaCruda += (char)LoRa.read();
    }

    // Procesar la trama recibida
    procesarYEnviarTrama(tramaCruda);
  }
}
```

```
// ==========================================
// SUBRUTINA DE PROCESAMIENTO Y TRADUCCIÓN
// ==========================================
void procesarYEnviarTrama(String trama) {
  // Ejemplo de trama esperada de tus 2 nodos: "ID:1,T:24.50,H:70.90,HS:100" o "ID:2,T:--,H:--,HS:0"

  int id = -1;
  float temp = -999.0;
  float humAmb = -999.0;
  int humSuelo = -1;

  // Variables auxiliares para desglosar el texto por comas
  int pos0 = 0;
  int pos1 = trama.indexOf(',');

  while (pos0 < trama.length()) {
    String fragmento = (pos1 == -1) ? trama.substring(pos0) : trama.substring(pos0, pos1);

    int dosPuntos = fragmento.indexOf(':');
    if (dosPuntos != -1) {
      String clave = fragmento.substring(0, dosPuntos);
      String valor = fragmento.substring(dosPuntos + 1);
```

```
    // Asignación de variables según la clave detectada
    if (clave == "ID") {
      id = valor.toInt();
    } else if (clave == "T") {
      if (valor != "--") temp = valor.toFloat();
    } else if (clave == "H") {
      if (valor != "--") humAmb = valor.toFloat();
    } else if (clave == "HS") {
      humSuelo = valor.toInt();
    }
  }

  if (pos1 == -1) break;
  pos0 = pos1 + 1;
  pos1 = trama.indexOf(',', pos0);
 }

 // Crear y estructurar el objeto JSON para Node-RED si el ID es válido (Nodo 1 o Nodo 2)
 if (id == 1 || id == 2) {
  StaticJsonDocument<200> doc;
  doc["nodo_id"] = id;

  if (temp != -999.0) doc["temperatura"] = temp;
```

```
        else doc["temperatura"] = nullptr; // Envía null si el sensor falló (el "--" que sale en tu pantalla)

        if (humAmb != -999.0) doc["humedad_ambiente"] = humAmb;
        else doc["humedad_ambiente"] = nullptr;

        doc["humedad_suelo"] = humSuelo;

        // Serializar e imprimir el JSON limpio por el puerto USB
        // Esto es lo que lee el nodo "serial in" de tu Node-RED
        serializeJson(doc, Serial);
        Serial.println(); // Salto de línea obligatorio para delimitar el mensaje
      }
    }
```

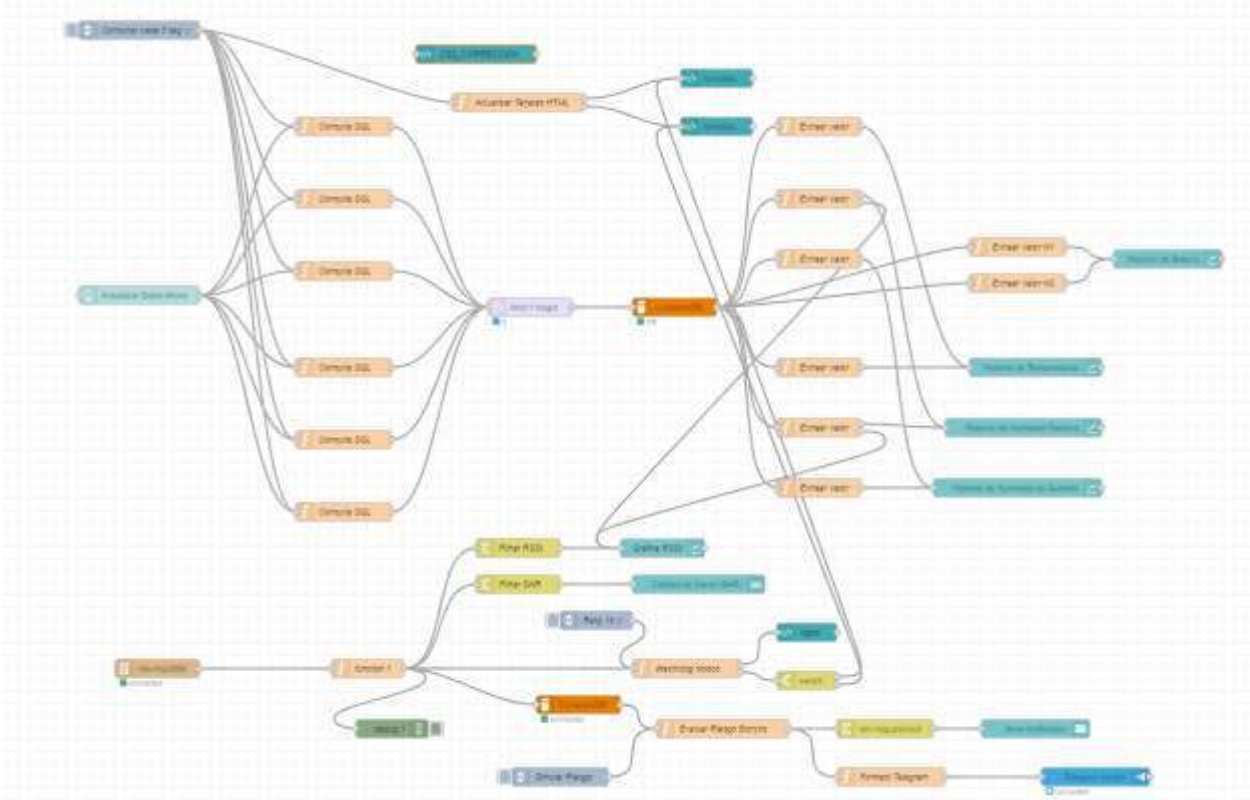
ANEXO C: ARQUITECTURA LÓGICA (NODE-RED Y BASE DE DATOS)

Este anexo documenta la estructura de software implementada en el servidor local (Gateway) para el procesamiento, almacenamiento y enrutamiento de la telemetría agrícola. El sistema está dividido en dos capas principales: el motor de flujos basado en eventos y el sistema de gestión de bases de datos relacionales.

C.1. Diagrama de Flujo de Datos (Node-RED)

A continuación, se presenta la topología del flujo de procesamiento implementado en Node-RED. Este esquema abarca desde la ingesta de tramas seriales, la transformación del formato de datos (Parsing JSON), la evaluación lógica de los umbrales de riesgo para *Botrytis cinerea*, hasta la bifurcación de la información hacia la interfaz gráfica (*Dashboard*), la base de datos y la API de Telegram.

Figura C.1. Topología integral del flujo de procesamiento en Node-RED.



ANEXO D: MANUAL DE USUARIO Y OPERACIÓN

MANUAL DE USUARIO Y OPERACIÓN

DISPOSITIVO IOT PARA EL MONITOREO DE VARIABLES CLIMÁTICAS RELACIONADAS CON LA APARICIÓN DE BOTRYTIS CINÉREA EN CULTIVOS DE PIMIENTO.

Elaborado por: Bryan Patricio Sarabia Vilañez

1. Propósito del Sistema

Este documento establece las directrices operativas para el uso del dispositivo IoT, el objetivo del sistema es monitorear de forma ininterrumpida las condiciones micro climáticas de los cultivos de pimiento bajo invernadero, enviando alertas tempranas para prevenir el desarrollo de enfermedades fúngicas (como *Botrytis*) y cuadros de asfixia radicular, optimizando así la toma de decisiones agronómicas.

2. Descripción General de los Equipos (Hardware)

El sistema está compuesto por equipos de alta tecnología diseñados para funcionar de manera autónoma. Como usuario, usted observará los siguientes elementos en el invernadero:

- **El Cerebro Central (Gateway):** Una caja principal que recolecta la información de todo el invernadero y la envía a internet mediante la red celular. No requiere manipulación diaria.
- **Los Nodos Sensores:** Cajas más pequeñas distribuidas entre las plantas. Cada nodo cuenta con:
    - Un sensor de ambiente que mide la temperatura y humedad del aire.

- Un sensor de tipo estaca (capacitivo) enterrado en el sustrato para medir el nivel de encharcamiento.
- Un panel solar de 6V instalado en la parte superior para recargar su batería interna de forma automática durante el día.

3. Acceso al Panel de Control Web (Dashboard)

El sistema cuenta con un panel visual al que puede acceder desde cualquier computadora o teléfono inteligente con internet.

Pasos para ingresar:

1. Abra el navegador web de su teléfono o computadora (Google Chrome, Safari, etc.).
2. Ingrese el enlace seguro proporcionado por el administrador del sistema (enlace de la red *ngrok*).
3. En la pantalla principal, visualizará una serie de "Tarjetas" o "Relojes" que le indicarán en tiempo real la temperatura actual, el porcentaje de humedad del aire y la humedad de la tierra de cada cuadrante del invernadero.
4. En la parte inferior, encontrará gráficas históricas que le permitirán observar cómo ha variado el clima durante las últimas 24 horas (ideal para identificar a qué hora de la madrugada baja más la temperatura).

4. Sistema Automático de Alertas (Telegram)

El sistema no requiere que usted vigile la pantalla todo el día. Cuenta con un "silencio inteligente"; usted solo será notificado en su teléfono celular, a través de la aplicación **Telegram**, cuando los sensores detecten que el microclima ha superado los umbrales seguros para la planta de pimiento.

4.1 Tipos de Alertas y Plan de Acción

Dependiendo de la lectura de los sensores, usted podría recibir uno de los siguientes tres mensajes en la sección de **"Causa"**:

A. 🌫 ALTA CONDENSACIÓN AIRE

- **Diagnóstico:** Humedad del aire superior al 90% con temperatura templada. Riesgo inminente de propagación del hongo *Botrytis* (moho gris).
- **Acción Inmediata:** Abra inmediatamente las cortinas laterales o cenitales del invernadero para forzar la circulación del viento. Evalúe realizar un deshoje basal en las plantas para mejorar la ventilación del tallo.

B. 💦 ENCHARCAMIENTO DE SUSTRATO

- **Diagnóstico:** El sensor enterrado detecta que la humedad de la tierra alcanzó el 80%. Riesgo de asfixia radicular y pudrición de plántula (*Damping-off*).
- **Acción Inmediata:** Suspenda inmediatamente los ciclos de riego por goteo programados. Revise físicamente las fundas o camas de cultivo para despejar cualquier obstrucción en el drenaje del agua.

C. 🚨 CLIMA Y SUELO CRÍTICOS

- **Diagnóstico:** Las condiciones A y B están ocurriendo al mismo tiempo. Es el nivel de mayor estrés para el cultivo.
- **Acción Inmediata:** Detenga todo el riego, abra la ventilación al máximo y realice una inspección visual hoja por hoja en el cuadrante afectado.

4.2 Diagnóstico Técnico en el Mensaje

Al final de cada notificación de Telegram, verá un apartado de **"Batería"**.

- Si el valor marca entre **3.7 V y 4.2 V**, el panel solar está funcionando correctamente.
- Si marca un valor cercano a **3.3 V**, notifique al soporte técnico.

5. Mantenimiento Preventivo y Precauciones

Para garantizar que el sistema funcione durante todo el ciclo de cosecha sin interrupciones, el personal agrícola debe observar las siguientes normas:

1. **Limpieza de Paneles Solares:** Una vez por semana, pase un paño seco o ligeramente húmedo sobre los pequeños paneles solares de los nodos. El polvo del campo y los residuos de las fumigaciones bloquean la luz del sol, impidiendo que la batería de litio interna se recargue correctamente.
2. **Cuidado con el Riego y Fumigación:** Aunque las cajas de los sensores están diseñadas para resistir el ambiente del invernadero, evite dirigir el chorro directo de las mangueras o las bombas de fumigación hacia los orificios donde están expuestos los sensores de clima.
3. **No remover los sensores de tierra:** El sensor capacitivo (la estaca negra) debe permanecer enterrado en la misma posición. Si se saca y se vuelve a meter constantemente, la tierra perderá compactación y las lecturas de humedad del sustrato serán falsas.
4. **Ubicación de Antenas:** No cuelgue herramientas, alambres de amarre ni cuerdas metálicas cerca de las antenas superiores de las cajas, ya que esto bloqueará la transmisión de radiofrecuencia hacia el Cerebro Central.

ANEXO E: FOTOGRAFÍAS DEL DESPLIEGUE EN CAMPO

Este apartado recopila la evidencia visual del trabajo de campo e instalación física de la red de sensores. Las siguientes fotografías documentan el proceso de ensamblaje, el encapsulado del hardware para su protección contra la intemperie (certificación IP65) y la ubicación estratégica de los equipos dentro de los macizos del cultivo de pimiento

E.1. Encapsulado y Protección del Hardware

Para garantizar la supervivencia de la electrónica ante las condiciones de humedad, riego y exposición solar, la placa de desarrollo y la celda de energía fueron alojadas en cajas estancas.



Figura E.1. Encapsulado estanco del nodo sensor y distribución de periféricos.

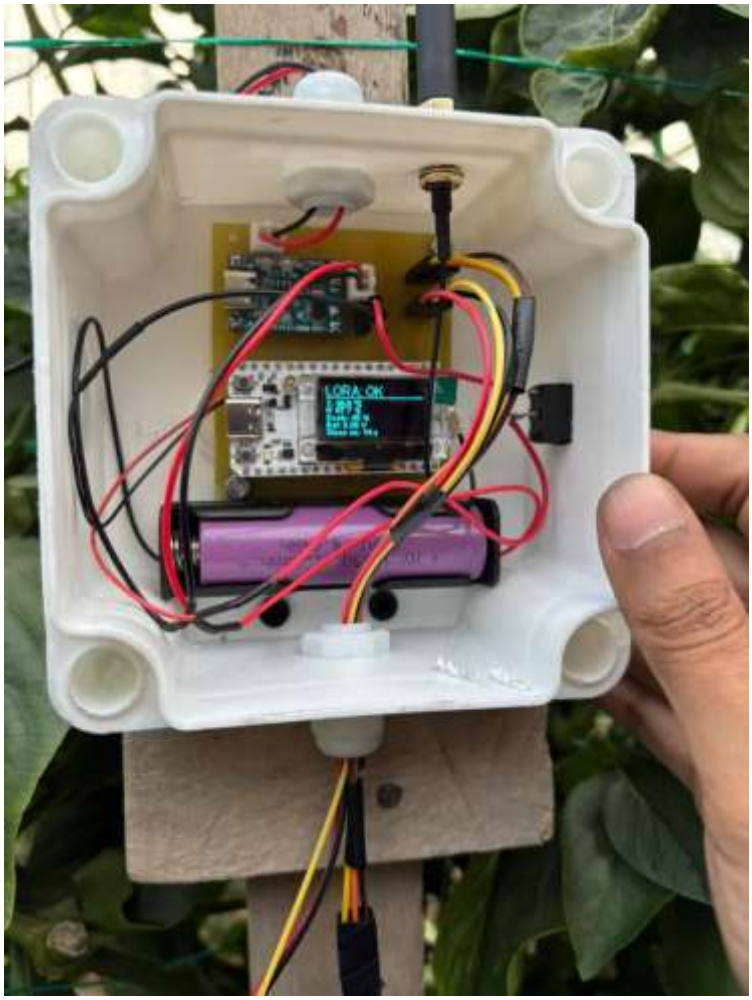


Figura E.2. Instalación física del nodo coordinador (Gateway) en el servidor local.



E.2. Ubicación en el Cultivo



ANEXO F: HOJAS DE DATOS TÉCNICOS (DATASHEETS)

Con el fin de respaldar las especificaciones eléctricas, los rangos de tolerancia ambiental y el consumo energético documentados a lo largo de esta investigación, se adjuntan los extractos principales de las hojas de datos oficiales provistas por los fabricantes de los componentes críticos del sistema.

(Nota: Se han incluido únicamente las páginas de especificaciones generales y características operativas para mantener la concisión del documento).

F.1. Microcontrolador (Placa de Desarrollo)



3. Specifications

3.1 General specifications

Table 3.1: General specifications

Parameters	Description
Master Chip	ESP32-S3FN8 (Xtensa®32-bit lx7 dual core processor)
LoRa Chipset	SX1262
USB to Serial Chip	CP2102
Frequency	470~510 MHz, 863~928 MHz
Max. TX Power	21 ± 1 dBm
Max. Receiving sensitivity	-137 dBm
Wi-Fi	802.11 b/g/n, up to 150Mbps
Bluetooth	Bluetooth LE: Bluetooth 5, Bluetooth mesh
Hardware Resource	7*ADC1 + 2*ADC2; 7*Touch; 3*UART; 2*I2C; 2*SPI; etc.
Memory	384KB ROM; 512KB SRAM; 16KB RTC SRAM; 8MB SiP Flash
Interface	Type-C USB; 2*1.25 lithium battery interface; LoRa ANT(IPEX1.0); 2*18*2.54 Header Pin
Battery	3.7V lithium battery power supply and charging
Operating temperature	-20 ~ 70 ℃
Dimensions	50.2 * 25.5* 10.2 mm

F.2. Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

1. Feature & Application:

* Full range temperature compensated * Relative humidity and temperature measurement
* Calibrated digital signal *Outstanding long-term stability *Extra components not needed
* Long transmission distance * Low power consumption *4 pins packaged and fully interchangeable

2. Description:

DHT22 output calibrated digital signal. It utilizes exclusive digital-signal-collecting-technique and humidity sensing technology, assuring its reliability and stability.Its sensing elements is connected with 8-bit single-chip computer.

Every sensor of this model is temperature compensated and calibrated in accurate calibration chamber and the calibration-coefficient is saved in type of programme in OTP memory, when the sensor is detecting, it will cite coefficient from memory.

Small size & low consumption & long transmission distance(20m) enable DHT22 to be suited in all kinds of harsh application occasions.

Single-row packaged with four pins, making the connection very convenient.

3. Technical Specification:

Model	DHT22
Power supply	3.3-6V DC
Output signal	digital signal via single-bus
Sensing element	Polymer capacitor
Operating range	humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +-2%RH(Max +-5%RH); temperature <+-0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH; temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH; temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+-0.3%RH
Long-term Stability	+-0.5%RH/year
Sensing period	Average: 2s
Interchangeability	fully interchangeable
Dimensions	small size 14*18*5.5mm; big size 22*28*5mm

4. Dimensions: (unit----mm)

1) Small size dimensions: (unit----mm)

Thomas Liu (Business Manager)

Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

F.3. Sensor de Humedad de Sustrato

深圳市海王传感器有限公司

Shenzhen haiwang sensor co., LTD HC-SR501 PIR SENSOR MODULE

Features

1. New soil moisture sensor. This capacitive soil moisture sensor is different from most resistive sensors on the market. It uses the principle of capacitive sensing to detect soil moisture. The problem that the resistance sensor is easily corroded is avoided, and its working life is greatly extended.

2. The sensor has a built-in voltage regulator chip, which supports a 3.3~5.5V wide voltage working environment, which means that it can work normally even on the 3.3V Arduino main control board. The iconic DFRobot-Gravity interface ensures the compatibility of the interface and can be directly connected to the Gavity IO expansion board.

3. A micro PC such as a Raspberry Pi only needs an external ADC (analog signal to digital signal) conversion module to work.

4. With an external screen and a motherboard, you can talk to your plant to see if the beloved one is thirsty, and whether it needs a little more water.

Product parameters

Working voltage: 3.3 ~ 5.5 VDC

Output voltage: 0 ~ 3.0 VDC

Interface: PH2.54-3P

Size: 98 x 23mm (LxW)

Instructions

Prepare

Hardware

- UNO control board x1
- Soil moisture sensor x1
- PH2.54-3P wiring x1

Software

- Arduino IDE V1.6.5

Wiring diagram

1. Connect the sensor and the main control board as shown