# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**TEMA:**

"DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONTROL DE HUMEDAD EN EL CULTIVO DE AGUACATE EN LA QUINTA LA JOYA – PIMAMPIRO."

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

**Línea de investigación:** Producción industrial y tecnología sostenible


**AUTOR:**

Ramiro Aldair Ajala Quelal

**DIRECTOR:**

Msc. Luis Edilberto Suárez Zambrano


**Ibarra – Ecuador 2026**

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
# DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

## AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A 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:** | AJALA QUELAL RAMIRO ALDAIR |

| DATOS DE LA OBRA | |
|---|---|
| **TÍTULO:** | "DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONTROL DE HUMEDAD EN EL CULTIVO DE AGUACATE EN LA QUINTA LA JOYA – PIMAMPIRO." |
| **AUTOR (ES):** | AJALA QUELAL RAMIRO ALDAIR |
| **FECHA: DD/MM/AAAA** | 01/07/2026 |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO | |
| **PROGRAMA:** | ■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO** |
| **TITULO POR EL QUE OPTA:** | INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES |
| **ASESOR /DIRECTOR:** | MSC. LUIS EDILBERTO SUÁREZ ZAMBRANO<br>MSC. HENRY PATRICIO FARINANGO ENDARA |

### 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta 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 el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 1 días del mes de julio de 2026.

**EL AUTOR:**

(Firma)…… Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
RAMIRO ALDAIR AJALA QUELAL
……
Ramiro Aldair Ajala Quelal

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCAS APLICADAS**

# CERTIFICACIÓN

Ibarra, 01 de julio de 2026

MSC. LUIS EDILBERTO SUÁREZ ZAMBRANO

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:
LUIS EDILBERTO SUAREZ ZAMBRANO

*MSc. Luis Edilberto Suárez Zambrano*
*C.C.: 1002304291*




**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

# DEDICATORIA

*Dedico este trabajo, con profunda gratitud y cariño, a mis padres, por su esfuerzo, ejemplo, apoyo y amor incondicional que me han brindado durante toda mi vida. Gracias por creer en mí, enseñarme que la dedicación y la perseverancia son y serán siempre el camino para alcanzar nuestros sueños. A mi hermano y hermana, por su confianza, compresión y palabras de aliento que han sido fuente de inspiración y fortaleza para culminar esta etapa.*

*A mi amigo José por su amistad incondiciconal y apoyo incluso antes de la vida universitaria.*

*Ajala Quelal Ramiro Aldair*




**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

## AGRADECIMIENTO

*A mis padres Ramiro y Sonia por ser el pilar fundamental de mi vida, a mis hermanos Brad y Azul por acompañarme en cada desafío con palabras de aliento y confianza. Este logro también es de ustedes.*

*A la Universidad Técnica del Norte, a la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas y a la carrera de Telecomunicaciones por los conocimientos brindados a lo largo de estos años.*

*Mi sincero agradecimiento al MSc. Luis Suárez director del presente trabajo de titulación quién ha sido un mentor desde los primeros niveles de carrera, sus conocimientos junto con su experiencia y orientación fueron esenciales en la culminación de esta investigación. De la misma manera agradezco al MSc. Henry Farinango asesor del presente trabajo por su valiosa guía y conocimiento.*

*Finalmente a quienes formaron parte de mi vida universitaria y en especial a J.M.M.A quién me motivo en mis últimos pasos de vida universitaria y se convirtió en alguien muy importante.*

*Ajala Quelal Ramiro Aldair*




**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación contempla el diseño de un sistema de monitoreo de temperatura y control de humedad en el cultivo de aguacate en la "Quinta la Joya" - Pimampiro mediante una red de largo alcance LoRa operando en la frecuencia de 915 MHz, arquitectura IoT, lógica difusa y la implementación de un sistema de riego adaptado a los requerimientos del predio. El principal objetivo de ese proyecto fue optimizar la eficiencia del consumo del agua en el predio manteniendo los niveles de humedad adecuados para el desarrollo del cultivo.

La metodología en cascada (Waterfall) permitió en la fase de investigación previa analizar la disponibilidad hídrica del predio, así como las características y necesidades del cultivo, en la fase de diseño del sistema se definió los requerimientos de hardware y software planteando la arquitectura compuesta por dos Nodos que integran sensores de temperatura/humedad ambientales y humedad del suelo, un Nodo Actuador que integra electroválvulas así como sensores de caudal y el Gateway bajo la placa de desarrollo ESP32 LoRa V3, la arquitectura plantea un modelo Cloud-Edge mediante la plataforma en la nube Thinger.io y la plataforma Node-RED instalada localmente que procesa las 44 reglas de lógica difusa.

Finalmente la integración del sistema juntamente con las pruebas de funcionamiento evaluación y análisis permitieron evidenciar que el sistema presenta una red de comunicación estable, siendo una solución robusta en la toma de decisiones y eficiencia hídrica que mejora

significativamente el desarrollo del cultivo mediante técnicas de mitigación oportunas y que se adaptan al entorno agrícola.

**Palabras clave:** LoRa, Lógica Difusa, Internet de las Cosas, Cultivo de Aguacate, Node-RED, Thinger.io, Sistema de Control de Humedad.




**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

## ABSTRACT

This thesis project involves the design of a temperature monitoring and humidity control system for avocado cultivation at “Quinta la Joya” - Pimampiro, using a long-range LoRa network operating at 915 MHz, IoT architecture, fuzzy logic, and the implementation of an irrigation system adapted to the farm's requirements. The main objective of this project was to optimize water consumption efficiency on the farm while maintaining adequate humidity levels for crop development.

The Waterfall methodology allowed for the analysis of the property's water availability, as well as the crop's characteristics and needs, during the preliminary research phase. In the system design phase, the hardware and software requirements were defined, resulting in an architecture composed of two Nodes that integrate ambient temperature/humidity and soil moisture sensors, an Actuator Node that integrates solenoid valves and flow sensors, and the Gateway based on the ESP32 LoRa V3 development board. The architecture proposes a Cloud-Edge model using the Thinger.io cloud platform and the locally installed Node-RED platform, which processes the 44 fuzzy logic rules.

Finally, system integration, along with functional testing, evaluation, and analysis, demonstrated that the system has a stable communication network, making it a robust solution for decision-making and water efficiency. This significantly improves crop development through timely mitigation techniques adapted to the agricultural environment.

**Keywords:** LoRa, Fuzzy Logic, Internet of Things, Avocado Cultivation, Node-RED, Thinger.io, Humidity Control System.

# ÍNDICE 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 ..... 8

Capítulo II: Fundamentación Teórica ..... 11

2.1. Cultivos de Aguacate en la zona norte del País. ..... 11

2.2. Ciclos de desarrollo del cultivo de aguacate. ..... 11

2.2.1. Requerimientos ambientes y condiciones climáticas óptimas para el cultivo de aguacate. ..... 12

2.2.2. Requerimientos agronómicos y condiciones de crecimiento. ..... 13

2.3. Factores ambientales en el crecimiento y rendimiento del aguacate. ..... 14

2.3.1. Niveles de Humedad óptimos para la producción de aguacate. ..... 14

2.3.2. Variables ambientales para censar en el cultivo de aguacate. ..... 15

2.3.3. Importancia de medir los niveles de temperatura y humedad en el cultivo de aguacate. ..... 15

2.4. Tecnologías de sensores ..... 15

2.4.1. Tipos de sensores para monitoreo de temperatura y humedad. .....16

2.4.2. Tecnologías inalámbricas para la transmisión de datos en entornos agrícolas remotos. .....17

2.4.3. Aplicaciones de las WSN.....17

2.4.4. Características de redes LPWAN, con Zigbee, Wi-Fi y Bluetooth para aplicaciones agrícolas. .....18

2.5. Agricultura de precisión e IoT. .....19

2.5.1. IoT aplicado a la agricultura de precisión. .....19

2.6. Automatización y control inteligente. .....20

2.6.1 Lógica difusa aplicada a sistemas de automatización. .....20

2.6.2. Fuzzificación. .....21

**2.7. Sistemas de riego.** .....21

2.7.1. Sistemas de riego convencionales. .....22

2.7.2 Problemas con los sistemas de riego convencionales. .....22

2.7.3. Sistemas de riego de precisión. .....23

2.8. Tecnologías asociadas a la gestión de los sistemas de control de riego. .....23

2.8.1. Tecnologías para la agricultura de precisión .....24

2.8.2. Monitoreo de Humedad en la agricultura de precisión. .....24

2.9. Norma ISO/IEC/IEEE 29148.....25

**Capítulo III: Diseño e Implementación** .....26

3.1. Metodología .....26

3.2. Fase de Investigación Previa y Análisis.....28

3.2.1. Situación Actual....28
3.3. Fase de Diseño del Sistema....34
3.3.1. Nomenclatura de requerimientos....34
3.3.2. Determinación de Stakeholders....35
3.3.3. Requerimientos de Stakeholders....36
3.3.4. Requerimientos funcionales del sistema....37
3.3.5. Requerimientos de Arquitectura del Sistema....39
3.4. Selección de Hardware y Software....41
3.4.1. Selección de Hardware....41
3.4.1.1. Selección de Sensores....42
3.4.1.2. Selección de Electroválvula....46
3.4.1.3. Selección de Nodos y Gateway....47
3.4.1.4. Selección de la Unidad Central de Procesamiento....48
3.4.2. Selección de Tecnología Inalámbrica de Largo Alcance....50
3.4.3. Selección de fuente de alimentación....52
3.4.4. Selección de Software....56
3.4.4.1. Selección de software para programar los Nodos y Gateway....56
3.4.4.2. Selección de Software en la Unidad Central de Procesamiento....57
3.4.4.2. Software para establecer reglas de Lógica Difusa....58
3.4.4.3. Software de Almacenamiento Local de Datos....58
3.4.4.4. Selección de Plataforma de Visualización....59

3.5. Diseño del Enlace Inalámbrico de Red LoRa ..... 60

3.5.1. Topología ..... 61

3.5.2. Parámetros del Enlace LoRa ..... 62

3.5.3 Pérdidas en el Enlace Inalámbrico usando en Modelo de Propagación Okumura-Hata ..... 65

3.5.4. Simulación del Enlace Inalámbrico LoRa ..... 68

3.5.4.1. Enlace Nodo 1 – Gateway ..... 71

3.5.4.2. Enlace Nodo 2 – Gateway ..... 72

3.5.4.3. Enlace Nodo 3 – Gateway ..... 73

3.5.5. Validación del espectro de la tecnología de comunicación LoRa ..... 75

3.6. Diseño del Sistema con Lógica Difusa ..... 77

3.6.1 Definición del Universo de Discurso y variables lingüísticas ..... 77

3.6.2 Distribución Borrosa ..... 78

3.6.3 Funciones de Pertenencia o Membrecía ..... 79

3.6.4 Funciones de Pertenencia en Fuzzy Logic Designer ..... 81

3.6.4.1 Función Temperatura (TMP) ..... 82

3.6.4.2 Función Humedad Ambiente (HA) ..... 83

3.6.4.3 Función Humedad del Suelo (HS) ..... 84

3.6.4. Función Tiempo de Riego (WR) ..... 86

3.6.5 Reglas Borrosas ..... 87

3.6.6 Proceso de Inferencia Difusa (Mamdani) ..... 90

3.6.7 Agregación ..... 90

3.6.8 Desfusificación .....91

3.7. Diseño y construcción del Sistema de Monitoreo y Control de Humedad .....91

3.7.1. Arquitectura del Sistema .....92

3.7.2. Diseño y Funcionamiento del Nodo Sensor 1 .....93

3.7.2.1. Diagrama de conexión del Nodo Sensor 1 .....93

3.7.2.2. Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 1 .....94

3.7.2.3. Lectura y Calibración de Sensores del Nodo 1 .....96

3.7.2.4. Programación del Nodo Sensor 1 .....99

3.7.3. Diseño y Funcionamiento del Nodo Sensor 2 .....104

3.7.3.1. Diagrama de conexión del Nodo Sensor 2 .....104

3.7.3.2 Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 2 .....106

3.7.3.3 Lectura y Calibración de Sensores del Nodo 2 .....107

3.7.3.4 Programación del Nodo Sensor 2 .....107

3.7.4 Diseño y Funcionamiento del Nodo Actuador .....112

3.7.4.1 Diagrama de Conexión del Nodo Actuador .....112

3.7.4.2 Diagrama de Flujo del Nodo Actuador .....114

3.7.4.3 Lectura y Calibración de Sensores del Nodo Actuador .....116

3.7.4.4 Programación del Nodo Actuador .....118

3.7.5 Diseño y Funcionamiento del Gateway .....124

3.7.5.1 Diagrama de Conexión del Gateway .....125

3.7.5.2 Diagrama de Flujo del Gateway .....125

3.7.5.3 Programación del Gateway ..... 127

3.7.5.4. Conexión Local hacia Node-Red ..... 133

3.7.5.5 Conexión hacia la plataforma en la nube Thinger.io ..... 151

3.8 Implementación de los Nodos sensores y Gateway ..... 159

3.8.1 Implementación del Gateway ..... 159

3.8.2 Implementación del Nodo Sensor 1 ..... 160

3.8.3 Implementación del Nodo Sensor 2 ..... 162

3.8.4 Implementación del Nodo Actuador ..... 164

Capítulo IV: Pruebas de Funcionamiento, Evaluación y Análisis ..... 167

4.1 Pruebas de comunicación inalámbrica LoRa ..... 168

4.1.1 Alcance efectivo de transmisión LoRa ..... 168

4.1.2 Calidad del Enlace ..... 171

4.1.3 Pruebas de Latencia y Jitter ..... 173

4.2 Pruebas de adquisición y precisión de sensores ..... 177

4.2.1 Evaluación del sensor de temperatura y humedad ambiental ..... 177

4.2.2 Verificación del sensor de humedad del suelo ..... 179

4.2.3 Validación de los sensores de caudal ..... 180

4.3 Pruebas del sistema de riego automatizado ..... 184

4.3.1 Activación automática mediante lógica difusa ..... 184

4.3.2 Respuesta del sistema ante condiciones normales y críticas ..... 185

4.3.3 Funcionamiento del control manual remoto ..... 196

4.3.4 Pruebas de Riego Manual .....203

4.3.5 Evaluación del consumo y eficiencia del uso del agua.....205

4.4 Evaluación de la plataforma IoT y monitoreo remoto .....210

4.4.1 Visualización de datos en tiempo real .....210

4.4.2 Registro y almacenamiento histórico de información .....211

4.4.3 Generación de notificaciones del sistema .....214

4.4.4 Acceso Remoto al monitoreo del sistema.....215

4.5 Análisis e interpretación de resultados .....217

4.5.1 Evaluación del desempeño general del sistema .....217

4.5.2 Confiabilidad de la comunicación y monitoreo .....219

4.5.3 Observaciones agronómicas del cultivo.....220

4.5.4 Comparación con métodos tradicionales .....223

4.6 Costo del Sistema.....224

4.6.1 Costo de Hardware.....225

4.6.2 Costo de Infraestructura.....225

4.6.3 Costo de Software .....226

4.6.4 Costo Total.....227

fi4.7 Análisis Costo-Beneficio.....228

Conclusiones.....230

Recomendaciones .....232

Bibliografía .....233

Anexo ..... 240

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Metodología Waterfall.....5

Figura 2 Arquitectura Genérica .....7

Figura 3 Etapas de desarrollo del cultivo de aguacate.....12

Figura 4 Estructura esquemática de un sensor.....16

Figura 5 Metodología en cascada .....27

Figura 6 Área de cultivo de Aguacate.....30

Figura 7 Datos topográficos del predio.....31

Figura 8 Ubicación de los nodos sensores, nodo actuador y Gateway .....33

Figura 9 Sensor DHT11 de Temperatura.....43

Figura 10 Sensor capacitivo de humedad en suelo HW-390 .....44

Figura 11 Sensor de Caudal YF-S201 .....45

Figura 12 Solenoide ZE-4F180.....47

Figura 13 Heltec ESP32 LoRa V3 .....48

Figura 14 Mini CPU Core i3.....50

Figura 15 Topología en Estrella de la Red LoRa.....64

Figura 16 Configuración de propiedades de Red iniciales en Radio Mobile .....69

Figura 17 Configuración de Topología.....70

Figura 18 Configuración de parámetros del fabricante Heltec .....71

Figura 19 Simulación del Enlace Inalámbrico Nodo 1 - Gateway .....72

Figura 20 Simulación del Enlace Inalámbrico Nodo 2 - Gateway .....73

Figura 21 Simulación del Enlace Inalámbrico Nodo 3 - Gateway .....74

Figura 22 Topología Simulada en Google Earth .....75

Figura 23 Espectro de la comunicación inalámbrica LoRa .....76

Figura 24 Distribución Borrosa para el sistema IoT.....79

Figura 25 Funciones de pertenencia de la Temperatura Ambiente [TMP] en Fuzzy Logic Designer ..... 83

Figura 26 Funciones de pertenencia de la Humedad Ambiente (HA) en Fuzzy Logic Designer ..... 84

Figura 27 Funciones de pertenencia de la Humedad del Suelo (HS) en Fuzzy Logic Designer ..... 85

Figura 28 Funciones de pertenencia del Tiempo de Riego (WR) en Fuzzy Logic Designer ..... 86

Figura 29 Arquitectura del sistema ..... 92

Figura 30 Diagrama de conexiones del Nodo Sensor 1 ..... 93

Figura 31 Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 1 ..... 95

Figura 32 Toma de datos del sensor DHT11 ..... 96

Figura 33 Toma de datos del sensor de humedad del suelo HW-390 ..... 98

Figura 34 Valores de calibración para el sensor de humedad de suelo HW-390 ..... 98

Figura 35 Librerías incluidas en el código del Nodo Sensor 1 ..... 100

Figura 36 Declaración de variables y constantes ..... 100

Figura 37 Configuración de parámetros de capa física LoRa del Nodo Sensor 1 ..... 101

Figura 38 Ciclo principal de transmisión del Nodo 1 ..... 102

Figura 39 Void Loop del Nodo Sensor 1 ..... 103

Figura 40 Configuración de Light Sleep del Nodo 1 ..... 104

Figura 41 Diagrama de conexiones del Nodo Sensor 2 ..... 105

Figura 42 Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 2 ..... 107

Figura 43 Librerías de programación y constantes del Nodo Sensor 2 ..... 109

Figura 44 Configuración de parámetros de capa física LoRa del Nodo Sensor 2 ..... 109

Figura 45 Ciclo principal de transmisión del Nodo 2 ..... 110

Figura 46 Ciclo principal de transmisión del Nodo 2 ..... 111
Figura 47 Configuración de Light Sleep del Nodo 2 ..... 112
Figura 48 Diagrama de conexiones del Nodo Actuador ..... 113
Figura 49 Diagrama de Flujo del Nodo Actuador ..... 115
Figura 50 Factor de calibración del Sensor YF-S201 ..... 116
Figura 51 Medición del sensor YF-S201 ..... 117
Figura 52 Declaración de variables del Nodo Actuador ..... 119
Figura 53 Variables de caudal definidas del Nodo Actuador ..... 120
Figura 54 Definición de Pines de Salida del Nodo Actuador ..... 120
Figura 55 Control de riego basado en temporización ..... 121
Figura 56 Estructura y rutinas de la medición de caudal ..... 122
Figura 57 Rutinas de recepción del Nodo Actuador ..... 123
Figura 58 Rutina de transmisión final del Nodo Actuador ..... 124
Figura 59 Diagrama de Conexión del Gateway ..... 125
Figura 60 Diagrama de Flujo del Gateway ..... 127
Figura 61 Librerías de programación para el Gateway ..... 128
Figura 62 Funciones y credenciales de conexión en el Gateway ..... 129
Figura 63 Callback MQTT de Rx y validación de comando de riego ..... 130
Figura 64 Tópicos de Publicación generados en el Gateway ..... 131
Figura 65 Formato de envío de datos de sensores hacia Thinger.io ..... 132
Figura 66 Gestión de comunicación y eventos del Gateway ..... 133
Figura 67 Flujo de procesamiento del sistema en Node-RED ..... 134
Figura 68 Parámetros del Servidor MQTT en Node-RED ..... 135
Figura 69 Configuración mqtt in de las variables de entrada ..... 136
Figura 70 Toma de variables y Funciones de Pertenencia en Node-RED ..... 137

Figura 71 Implementación en código de las Funciones de Pertenencia .....138
Figura 72 Codificación de la Base de datos de las reglas borrosas .....139
Figura 73 Proceso de Inferencia Difusa en Node-RED .....140
Figura 74 Proceso de Defuzzificación y mensaje de control MQTT hacia el Gateway .....141
Figura 75 Implementación del Control Horario en Node-RED .....142
Figura 76 Estructura de Validación del Payload .....143
Figura 77 Bloqueo Temporal para Prevención de Riegos Repetitivos .....144
Figura 78 Estructura lógica del periodo de bloqueo y confirmación de comando de riego .....144
Figura 79 Filtrado de tópicos para registro de variables en InfluxDB .....145
Figura 80 Creación de la base de datos en InfluxDB .....146
Figura 81 Generación de permisos y Token de la base de datos .....146
Figura 82 Configuración del nodo influxdb out .....147
Figura 83 Credenciales de configuración del servidor de InfluxDB .....148
Figura 84 Registro de datos en InfluxDB .....148
Figura 85 Creación del Bot en Telegram para notificaciones del Sistema .....149
Figura 86 Integración del código para alertas en Telegram .....150
Figura 87 Configuración de credenciales del Bot .....151
Figura 88 Sección para agregar dispositivo en Thinger.io .....152
Figura 89 Parámetros del Gateway en Thinger.io .....152
Figura 90 Interfaz de monitoreo del Gateway en Thinger.io .....153
Figura 91 Verificación de recursos y salidas del Gateway en la API de Thinger.io 154
Figura 92 Consulta al Gateway mediante API REST .....155
Figura 93 Creación de Widget tipo Gauge en Thinger.io .....156

Figura 94 Configuración del origen de datos del Widget ..... 156
Figura 95 Dashboard del Sistema en Thinger.io ..... 157
Figura 96 Dashboard del Nodo 2 ..... 158
Figura 97 Dashboard para el monitoreo Local ..... 158
Figura 98 Implementación física Gateway ..... 159
Figura 99 Instalación en campo del Gateway ..... 160
Figura 100 Implementación física del Nodo Sensor 1 ..... 161
Figura 101 Instalación en campo del Nodo Sensor 1 ..... 162
Figura 102 Implementación física del Nodo Sensor 2 ..... 163
Figura 103 Instalación en campo del Nodo Sensor 2 ..... 164
Figura 104 Implementación física del Nodo Actuador ..... 165
Figura 105 Adaptación del Nodo Actuador al sistema de Riego ..... 166
Figura 106 Extracción de paquetes y estadísticas en el Gateway ..... 169
Figura 107 Ubicaciones del nodo a diferentes distancias ..... 169
Figura 108 Porcentaje de Pérdida de Paquetes vs. Distancia ..... 171
Figura 109 RSSI y SNR en función de la Distancia ..... 173
Figura 110 Implementación del timestamp ..... 174
Figura 111 Construcción del Payload con marca de tiempo ..... 174
Figura 112 Extracción del Timestamp en el Gateway ..... 175
Figura 113 Evolución de Latencia y Jitter respecto a la Distancia ..... 176
Figura 114 Registro visual del consumo total en cada ciclo de prueba ..... 182
Figura 115 Estabilización del Caudal en función del Tiempo ..... 184
Figura 116 Switch de control de encendido y apagado de electroválvulas ..... 197
Figura 117 Variables ambientales y tiempo de riego calculado ..... 201
Figura 118 Dashboard de monitoreo ..... 201

Figura 119 Disminución a cero de los medidores de caudal .....202
Figura 120 Logs de Bloqueo del Riego .....202
Figura 121 Registros del consumo de agua del modo manual en InfluxDB .....205
Figura 122 Consumo total de agua por semanas – Modo Automático .....206
Figura 123 Consumo total de agua – Modo Manual.....209
Figura 124 Dashboard de monitoreo en tiempo real.....210
Figura 125 Dashboard de monitoreo y control del agua.....211
Figura 126 Registro en la base de datos de Thinger.io del Nodo Sensor 1 .....212
Figura 127 Base de datos y Registros del Nodo Actuador .....213
Figura 128 Registro histórico de datos de manera local.....213
Figura 129 Notificaciones del Sistema en modo Difuso .....214
Figura 130 Notificaciones del Sistema en modo Manual .....215
Figura 131 Acceso al Dashboard desde el Navegador Web .....216
Figura 132 Monitoreo del Sistema desde un dispositivo móvil.....216
Figura 133 Estadísticas de conectividad del sistema .....220
Figura 134 Comparación del estado de Floración en el cultivo.....221
Figura 135 Estabilización de los niveles de humedad en el cultivo .....222
Figura 136 Humedad visiblemente óptima en el cultivo .....223

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros óptimos para el cultivo de aguacate ..... 13

Tabla 2 Características de tecnologías de transmisión inalámbrica ..... 18

Tabla 3 Nomenclatura de Requerimientos ..... 34

Tabla 4 Prioridad de Requisitos ..... 35

Tabla 5 Lista de los Stakeholders ..... 35

Tabla 6 Requerimientos de Stakeholders ..... 36

Tabla 7 Requerimientos funcionales del Sistema ..... 38

Tabla 8 Requerimientos de Arquitectura ..... 40

Tabla 9 Elección de sensor de temperatura ..... 42

Tabla 10 Elección del Sensor de Humedad de Suelo ..... 43

Tabla 11 Selección del sensor de Caudal ..... 45

Tabla 12 Selección de Electroválvula ..... 46

Tabla 13 Selección de Microcontrolador para Nodos y Gateway ..... 47

Tabla 14 Selección del Procesador ..... 49

Tabla 15 Comparación de características de Tecnologías LPWAN ..... 50

Tabla 16 Selección de la Tecnología Inalámbrica de Largo Alcance ..... 51

Tabla 17 Consumo eléctrico del Nodo Sensor 1 ..... 53

Tabla 18 Consumo eléctrico del Nodo Sensor 2 ..... 55

Tabla 19 Selección de Software para programar Nodos y Gateway ..... 57

Tabla 20 Selección de la Base de Datos Local ..... 59

Tabla 21 Selección de Plataforma de Visualización ..... 60

Tabla 22 Coordenadas de los Nodos componentes de la Topología ..... 61

Tabla 23 Parámetros del Enlace LoRa ..... 63

Tabla 24 Cálculo de pérdidas con el modelo Okumura-Hata ..... 67

Tabla 25 Valores de Frecuencia ingresados en el analizador de espectro Keysight N9322C ..... 76

Tabla 26 Universo de Discurso ..... 77

Tabla 27 Funciones de pertenencia del Sistema Difuso ..... 80

Tabla 28 Base de reglas del sistema de inferencia difusa (Modelo de Mamdani) ..... 87

Tabla 29 Pines de conexión del Nodo Sensor 1 ..... 94

Tabla 30 Librerías para programar el Nodo Sensor 1 ..... 99

Tabla 31 Pines de conexión del Nodo Sensor 2 ..... 106

Tabla 32 Librerías de programación del Nodo Sensor 2 ..... 108

Tabla 33 Pines de conexión del Nodo Actuador ..... 114

Tabla 34 Librerías de programación del Gateway ..... 128

Tabla 35 Resultados experimentales de la pérdida de paquetes ..... 170

Tabla 36 Resultados experimentales del RSSI y SNR ..... 172

Tabla 37 Resultados de Latencia y Jitter ..... 175

Tabla 38 Resultados de la Validación de la Temperatura Ambiental ..... 178

Tabla 39 Resultados de la Validación de la Humedad Ambiental ..... 178

Tabla 40 Resultados de la Validación del sensor de Humedad del Suelo ..... 180

Tabla 41 Resultados de ciclos repetitivos de riego ..... 181

Tabla 42 Caudal registrado durante prueba de 5 minutos ..... 182

Tabla 43 Registro de pruebas del sistema de riego automatizado ..... 185

Tabla 44 Horarios de medición por día ..... 186

Tabla 45 Variables ambientales y salida del sistema – Día 1 ..... 187

Tabla 46 Reglas difusas activadas – Día 1 ..... 188

Tabla 47 Variables ambientales y salida del sistema – Día 2 ..... 189

Tabla 48 Reglas difusas activadas – Día 2 ..... 190
Tabla 49 Variables ambientales y salida del sistema – Día 3 ..... 191
Tabla 50 Reglas difusas activadas – Día 3 ..... 191
Tabla 51 Variables ambientales y salida del sistema – Día 4 ..... 192
Tabla 52 Reglas difusas activadas – Día 4 ..... 193
Tabla 53 Variables ambientales y salida del sistema – Día 5 ..... 193
Tabla 54 Reglas difusas activadas – Día 5 ..... 194
Tabla 55 Variables ambientales y salida del sistema – Día 6 ..... 195
Tabla 56 Reglas difusas activadas – Día 6 ..... 195
Tabla 57 Resultados de pruebas de activación manual remota ..... 198
Tabla 58 Resultados de pruebas de desactivación manual remota ..... 199
Tabla 59 Condiciones de pruebas del riego manual ..... 203
Tabla 60 Consumo de agua de las pruebas de riego manuales ..... 204
Tabla 61 Consumo del agua en modo manual y automático por evento ..... 206
Tabla 62 Eficiencia del consumo de agua - Modo Automático ..... 208
Tabla 63 Eficiencia del consumo de agua - Modo Manual ..... 209
Tabla 64 Volumen de Agua Total consumida por el Sistema ..... 223
Tabla 65 Costo de Hardware ..... 225
Tabla 66 Costos de Infraestructura ..... 225
Tabla 67 Costo de Software ..... 226
Tabla 68 Costo total del Sistema ..... 227

# Capítulo I: Antecedentes

## 1.1. Tema

DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONTROL DE HUMEDAD EN EL CULTIVO DE AGUACATE EN LA QUINTA LA JOYA – PIMAMPIRO.

## 1.2. Problema

Según el (Ministerio del Ambiente, 2021) la sequía es un fenómeno natural de desarrollo lento, originado por la ausencia total o parcial de lluvias. La sequía es uno de los peores enemigos de la humanidad, porque afecta gravemente y a los seres vivos, por la falta de agua entre los efectos que más impacto tiene este fenómeno es que: provoca la pérdida de cultivos, falta de alimentos y agua para consumo de los seres vivos, enfermedades, muerte de animales y plantas. Entre las medidas de prevención figuran: el cuidado del agua de reserva, protección de la vegetación y reforestación con plantas nativas, uso de buenos sistemas de regadío, que permitan la mejor utilización de las aguas.

En el caso de Ecuador, la problemática de la sequía no es ajena a la realidad presentada a nivel mundial. Por la relación estrecha que tiene el sistema climático en el desarrollo económico, social y agroproductivo del país, la sequía se ha convertido en sinónimo de desastres, recesión financiera y pobreza, siendo el sector agroproductivo, el sector hidroeléctrico y el sector de agua y saneamiento los más afectados. (Ministerio del Ambiente, 2021)

Con el cambio climático que se ha venido dando en los últimos años, las zonas del norte de país son propensas a pasar largos periodos de tiempo en la estación de verano, si bien la provincia de Imbabura no está en riesgo de sequía extremo, existen zonas como en la que se

enfoca este proyecto donde el recurso hídrico se debe manejar con precaución ya que la extensión de terreno que se maneja es relativamente amplia y el recurso hídrico proporcionado no abastece a cubrir las necesidades hídricas de toda la extensión, como es el caso del cultivo de aguacate en la Quinta La Joya de Pimampiro.

Según el INEC en sus informes estadísticos del 2023, señala que la producción de aguacate fue de 26524 Toneladas métricas en ese año, correspondiendo a Imbabura una producción de 3891 Tm. Además, muestra cifras de la superficie en hectáreas, plantadas y cosechadas, entorno a estos datos se evidencia que la superficie de aguacate cosechada a nivel nacional es de 4550 ha, correspondiendo a Imbabura 489 ha que representa el 10.75% del total de plantación para cosecha a nivel nacional. Imbabura en números de producción en ventas tiene un valor de 3875 Tm, el cual representa el 14.79% de total nacional. (INEC & ESPAC, 2023)

En los que respecta al cantón Pimampiro, la producción agrícola de este fruto representa uno de los varios productos permanentes, liderando en superficie sembrada y cosechada, esta última con un valor de 175.50 ha. (GAD Municipal Pimampiro, 2014)

De acuerdo con el (GAD Municipal Pimampiro, 2014), en su Actualización del Plan de Desarrollo de Ordenamiento Territorial 2014-2027, el clima en el cantón San pedro de Pimampiro se presenta en tres tipos, lo que hace que su tierra sea apta para la diversificación de la producción, en este sentido, la zona de enfoque de este proyecto por su ubicación, presenta un clima Ecuatorial Mesotérmico Seco, donde los rangos de precipitación son de 250 a 500 mm al año lo que conlleva un déficit hídrico tanto en tema de precipitaciones como en abastecimiento y disponibilidad del recurso. Por otra parte, en el cantón Pimampiro no existe infraestructura adecuada para el riego, lo cual no permite incorporar más hectáreas productivas, pese a tener abundantes fuentes hídricas; solo el 8%, de las hectáreas productivas tiene acceso al riego. El 95% de hectáreas que poseen riego utilizan el sistema por gravedad que tiene una

eficiencia de uso de agua del 20%, mientras que el uso de nuevas tecnologías es muy bajo como es el riego por goteo de 4,1% que tiene una eficiencia de uso de agua del 90%.

El aguacate (Persea americana Mill.) es una especie frutal altamente susceptible al déficit hídrico, esto dificulta el manejo del riego para los productores. Cuando el riego es inadecuado, los árboles sufren reducción de crecimiento, pérdida de frutos y daños a las raíces. Para controlar este fenómeno es indispensable evaluar las variables de temperatura y humedad en árboles de aguacate y las consideraciones para elegir un indicador de mitigación. (Celedón et al., 2012)

De acuerdo con (BioScience, 2024), el problema radica en que la falta de agua durante períodos críticos del ciclo de crecimiento puede resultar en una baja fecundidad de las flores y una menor formación y desarrollo de frutos. Esto reduce tanto el rendimiento del cultivo, como la calidad comercial del aguacate, causando oscurecimiento enzimático y decoloración del mesocarpio, lo que reduce su vida útil en postcosecha.

Un nivel de humedad favorable para el cultivo de aguacate oscila entre el 60% y el 80%. Se puede cultivar con un 40% de humedad o menos, siempre que las demás condiciones de cultivo sean aceptables, pero existe posible riesgo de estrés hídrico, mayor susceptibilidad a las plagas y la caída de flores y frutos. (EOS Data Analytics, 2023)

Árbol de problemas:

Los cambios de temperatura y humedad en el cultivo de aguacate es un problema central que afecta la producción y calidad de los cultivos. Este fenómeno se manifiesta cuando las plantas no reciben la cantidad adecuada de agua para satisfacer sus necesidades fisiológicas, lo que puede deberse a factores como la escasez de lluvias, la mala gestión del riego o la sequedad del suelo.

Para mitigar este problema, se requiere una gestión eficiente del agua, el desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles y la implementación de sistemas de riego automatizados utilizando tecnología inalámbrica para su gestión.

## 1.3. Objetivos

### *1.3.1. Objetivo General*

Diseñar e implementar un prototipo utilizando Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de temperatura y control de humedad en el cultivo de aguacate en la Quinta La Joya - Pimampiro.

### *1.3.2. Objetivos Específicos*

- Investigar los antecedentes, causas y soluciones técnicas respecto de las variaciones de temperatura y humedad en el cultivo de aguacate para poder tomar acciones de mitigación, empleando tecnologías IoT y lógica difusa.
- Analizar la topografía de la zona de enfoque del proyecto para establecer parámetros de cuantificación respecto de la solución tecnológica a implementar.
- Establecer los requerimientos específicos del sistema, diseñar un sistema integral para el monitoreo de temperatura y control humedad tomando en cuenta el análisis previo.
- Implementar un prototipo del sistema para el monitoreo de temperatura y control humedad en el cultivo de aguacate mediante el estudio previo de diseño para poder evaluar su funcionamiento y eficacia en el control de la humedad.

## 1.4. Alcance

El proyecto de investigación tiene como ubicación específica el cantón de Pimampiro, y pretende dar solución al control de humedad en el cultivo de aguacate en la Quinta La Joya, en este sentido, se va a realizar un análisis y recopilación del marco teórico necesario para la realización del sistema de gestión del monitoreo de humedad y temperatura, mediante

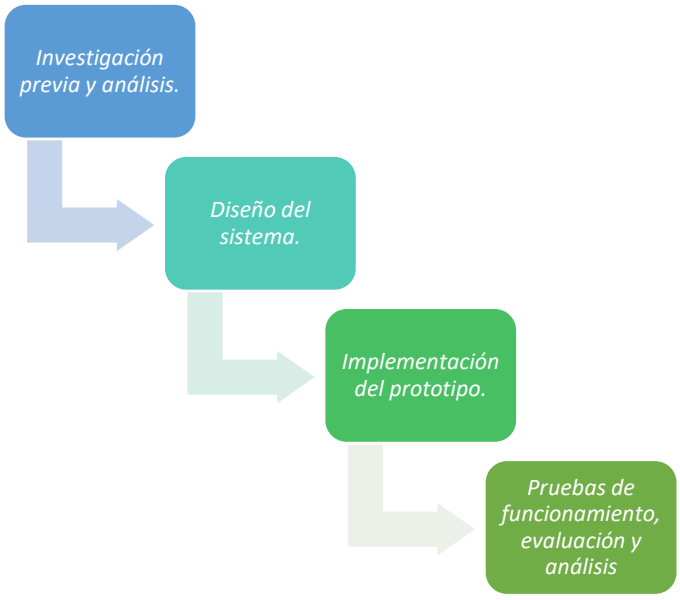
tecnologías de IoT de bajo costo con lo que se tomará datos de sensores de humedad que servirá como retroalimentación para el control del riego por goteo en las electroválvulas instaladas en el cultivo, todo esto mediante un entorno centralizado de gestión donde se monitorea la humedad y la temperatura. Los datos recolectados dentro del proceso serán mostrados a los administradores del cultivo en una aplicación Web, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y mejora en la producción en función de los parámetros medidos.

Se va a implementar un prototipo consistente en el monitoreo de una pequeña parte del cultivo que será cubierto con dos nodos sensores de humedad y temperatura. Los datos recolectados serán enviados de forma inalámbrica a una base de datos centralizada lo cual servirá como retroalimentación para el control de las electroválvulas que manejan el suministro de agua de riego.

La metodología para utilizar se basa en un modelo de cascada (Waterfall) que se desarrolla en 4 fases principales:

**Figura 1**

*Metodología Waterfall*



*Nota: En la figura presentada se muestra la metodología a emplear que consiste en 4 fases principales aplicadas al proceso de desarrollo del proyecto.*

**Fase 1: Investigación previa y análisis.**

En esta fase se realiza una investigación de los antecedentes y los fundamentos teóricos acerca del cultivo de aguacate en la Quinta La Joya – Pimampiro, y como la temperatura y la humedad en el suelo afectan a la producción. Además, se evaluarán los requerimientos respecto a humedad para un escenario óptimo que permita seleccionar el tipo de sensores, plataformas informáticas, dispositivos de control, medios de comunicación, parámetros de calibración y el sistema de gestión centralizado.

Esta etapa se centra en un estudio minucioso y recopilación de información óptima y de calidad, permitiendo dar un punto de partida clave en cuanto al conocimiento necesario en el área tecnológica como en el área orientada al control y monitoreo de la humedad y temperatura respectivamente, permitiendo tener una visión amplia del tema y fomentar las bases para el diseño y la implementación del sistema automatizado.

**Fase 2: Diseño del sistema.**

Una vez definidos los fundamentos teóricos y requerimientos de la Fase 1, lo siguiente es diseñar el sistema de monitoreo y control y un prototipo del sistema, que se va a implementar en una sección específica del predio para lo que se considera los elementos, materiales, sensores, dispositivos inalámbricos, electroválvulas, disponibilidad del agua de riego, sistemas de distribución del agua y topografía del suelo.

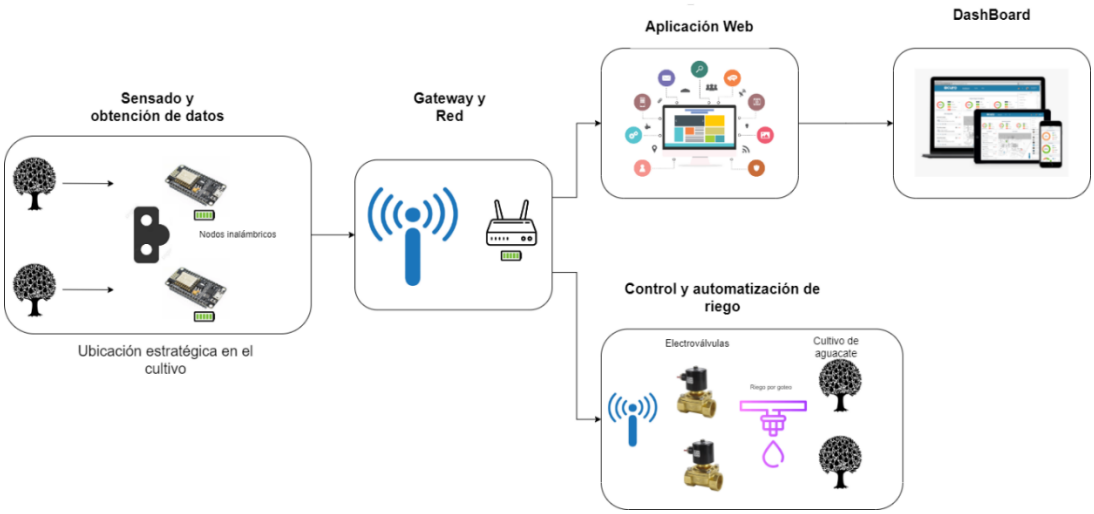
La fase de diseño del sistema para el control de los niveles de humedad y temperatura en el cultivo de aguacate implica la selección y ubicación estratégica de sensores inalámbricos de humedad en el suelo y temperatura, los cuales capturan datos relevantes. Estos sensores se integran a un Gateway central que actúa como punto de concentración y transmisión de información. A través de una conexión inalámbrica, los datos recopilados por los sensores se

transmiten a una base de datos centralizada, que luego de ser procesados se obtendrá información que será mostrada en una interfaz web al administrador para monitorear en tiempo real los niveles de humedad y temperatura en diferentes áreas del cultivo y a su vez tener un control automático retroalimentado de las electroválvulas que controlan el riego.

Para la automatización del control de humedad, se instalarán electroválvulas en la toma principal de distribución de agua de riego. Estas electroválvulas se controlan de manera automática y remota a través de la interfaz web (Dashboard) en función de los datos de humedad, temperatura recopilados por los sensores y de la lógica difusa. De esta manera, se ajusta el suministro de agua de riego de forma precisa y eficiente, optimizando el uso de recursos hídricos y manteniendo el nivel de humedad óptimo en el cultivo de aguacate. A continuación, se presenta una arquitectura genérica del sistema a deseñar e implementar, tomando en cuenta los requerimientos anteriormente mencionados.

**Figura 2**

*Arquitectura Genérica*




*Nota: La figura presenta una breve descripción del sistema a diseñar e implementar.*

**Fase 3: Implementación del prototipo.**

La implementación del sistema prototipo en el cultivo de aguacate en la Quinta La Joya consistiría en la instalación de los dispositivos componentes del sistema diseñado en la fase anterior, incluyendo el Gateway, nodos inalámbricos y sensores de humedad del suelo, además de las electroválvulas que serán controladas en función del porcentaje de humedad en suelo y temperatura y de los ciclos de riego cada cierto periodo de tiempo, seguido de esto se configura la red para establecer comunicación inalámbrica entre los nodos y una estación base central lo que permitirá desarrollar la infraestructura de software para recopilar, transmitir, almacenar y analizar los datos tomados por los sensores.

**Fase 4: Pruebas de funcionamiento, evaluación y análisis.**

Pruebas exhaustivas y ajustes para garantizar el funcionamiento y la precisión del sistema, además, la capacitación del propietario y/o personal operativo y documentación detallada para la operación y mantenimiento continuo del sistema.

Adicionalmente, se evaluará la eficiencia del sistema, en base a parámetros como el agua consumida. La implementación exitosa de este sistema permitirá monitorear y gestionar de manera eficaz y eficiente la humedad en el cultivo de aguacate mediante un sistema de control de riego automatizado, lo que potencialmente mejora el rendimiento y la calidad de la producción en la Quinta La Joya.

## 1.5. Justificación

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 12 de las Naciones Unidas se centra en garantizar modalidades de producción y consumo responsables. En el contexto específico de Ecuador, este objetivo es fundamental para abordar los desafíos relacionados con la gestión responsable de los recursos naturales, en particular, el agua, un recurso vital para la agricultura y la seguridad alimentaria. (Las Naciones Unidas en Ecuador, 2024)

El cultivo de aguacate en Pimampiro, provincia de Imbabura, Ecuador, es una actividad agrícola de gran importancia económica a nivel local y regional. Sin embargo, enfrenta desafíos significativos debido a la sequía o poca disponibilidad del recurso hídrico, que puede tener un impacto negativo en la productividad y la sostenibilidad a largo plazo de este cultivo.

La Actualización del Plan de Desarrollo de Ordenamiento Territorial 2014-2027 del cantón San Pedro de Pimampiro, señala que la producción de este fruto representa uno de los 6 principales productos permanentes importantes en el cantón Pimampiro colocándose en segundo lugar con 175.50 ha para la cosecha, lo que proporciona una fuente de ingresos sustentable para los productores de dicho fruto. (GAD Municipal Pimampiro, 2014)

En el cantón Pimampiro, la falta de infraestructura para el riego limita la expansión de la agricultura, a pesar de la disponibilidad de recursos hídricos. Apenas el 8% de las tierras agrícolas pueden ser irrigadas. La mayoría de las hectáreas con acceso al riego emplean métodos tradicionales como el riego por gravedad, con una eficiencia del 20% en el uso del agua. Solo un pequeño porcentaje, el 4,1%, utiliza tecnologías modernas como el riego por goteo, que tiene una eficiencia mucho mayor del 90%.

La implementación de un sistema de monitoreo de temperatura y control de humedad basado en tecnología de sensores inalámbricos representa una solución innovadora y sostenible para abordar este problema. Esta tecnología permite recopilar datos en tiempo real sobre variables clave como la humedad del suelo, proporcionando información precisa y detallada sobre las condiciones ambientales en el cultivo de aguacate.

La aplicación de esta tecnología tiene varios beneficios que se alinean con el ODS 12 como el uso eficiente de los recursos, al monitorear continuamente los niveles de humedad en el suelo y la temperatura en el cultivo de aguacate, se puede optimizar el riego de precisión, asegurando que el agua se utilice de manera más eficiente y reduciendo el desperdicio. A su vez se promueven prácticas agrícolas sostenibles en torno a mejorar la gestión del agua de

riego, contribuyendo a la conservación del medio ambiente. Adicionalmente se mejora la productividad y la resiliencia al garantizar un suministro adecuado de agua y optimizar las condiciones de crecimiento, el sistema de monitoreo de temperatura y control de humedad puede aumentar la productividad del cultivo de aguacate y a fortalecer la resiliencia de los agricultores frente a condiciones climáticas adversas.

Otro de los ODS a destacar es el ODS 8 que establece “Trabajo decente y crecimiento económico” ya que, al optimizar el uso del agua a través de la gestión automatizada del riego, el sistema ayuda a mejorar la productividad y la calidad de los cultivos de aguacate. Esto puede aumentar los ingresos de los agricultores y contribuir al desarrollo económico sostenible de la región. Además, la adopción de tecnologías de comunicación inalámbrica en la agricultura fomenta la innovación y el desarrollo tecnológico en la región. Esto puede atraer inversiones en investigación y desarrollo, así como en infraestructura digital, lo que contribuye al crecimiento económico y al desarrollo sostenible a largo plazo.

# Capítulo II: Fundamentación Teórica

## 2.1. Cultivos de Aguacate en la zona norte del País.

Ecuador presenta una variedad de pisos climáticos, algunos ideales para la producción y exportación de frutas no tradicionales. La presencia de diversos microclimas facilita el cultivo de estos frutos de alta calidad, entre ellos aguacates, piñas, mangos, sandías, melones, limones, pitahayas, tomates de árbol y uvillas. Sin embargo, la producción a gran escala en Ecuador se centra predominantemente en banano y camarón (Flores et al., 2021)

En 2019 se produjeron 20.995 toneladas de aguacate en un total de 4653 hectáreas. La producción está distribuida en los valles interandinos de la Sierra, en las provincias de Imbabura (Chota y Salinas), Carchi (Mira), Pichincha (Guayllabamba), Tungurahua (Patate y Baños) y Azuay (Paute y Gualaceo). En Ecuador, el precio del kilo de aguacate desde el productor bordea entre los sesenta centavos de dólar y un dólar, normalmente los precios en Estados Unidos o en Europa rondan los cinco dólares según Mercadona.

El Aguacate de los Andes y litoral ecuatoriano forma parte de los productos no tradicionales que se exportan, generando empleo, riqueza y la oportunidad de mejorar la calidad de vida de miles de agricultores de las zonas rurales (Porras Villafuerte, 2019)

El consumo PER CÁPITA de aguacate en el Ecuador es de aproximadamente 1 kilogramo anual, es decir que cada persona consume esa cantidad de aguacate al año; por lo que el mercado nacional se lo ve como un atractivo para su comercialización e impulsar proyectos dedicados a esta actividad. (Viera et al., 2016)

## 2.2. Ciclos de desarrollo del cultivo de aguacate.

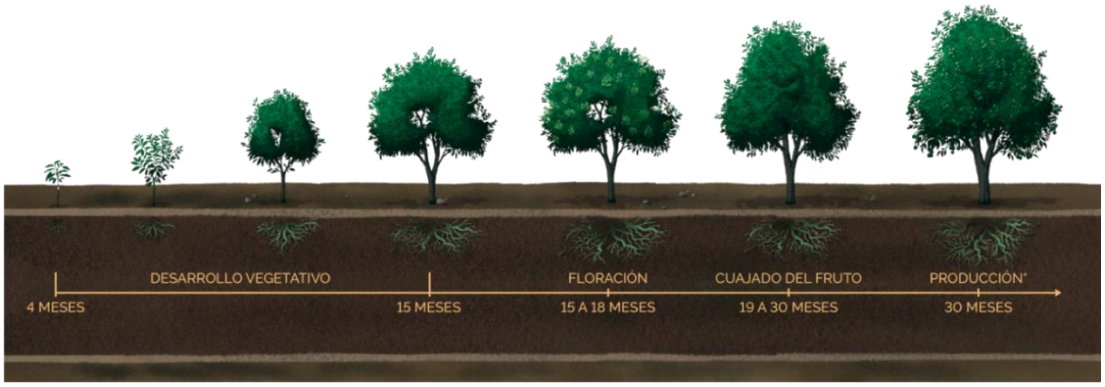
Según (Játiva & Román, 2016) los costos para producir el aguacate por hectárea, al año oscilan entre los 12 000 y 14 000 dólares, teniendo en cuenta variables como la planta, mantenimiento, fertilización y pago de mano de obra (jornaleros). Cada hectárea requiere en

promedio tres personas de mano de obra, dos fijos y uno ocasional para labores de fumigación, poda y limpieza.

La fase inicial de producción del cultivo se establece en un intervalo de tres a cinco años, alcanzando su máximo rendimiento hacia el séptimo año. Su vida útil productiva oscila entre 30 y 40 años. En términos de inversión, uno de los componentes de mayor peso corresponde a la irrigación, dado que la obtención de un kilogramo de aguacate demanda aproximadamente 1.000 litros de agua (Vásquez & García, 2021).

**Figura 3**

*Etapas de desarrollo del cultivo de aguacate*




*Nota:* Línea de tiempo del desarrollo del aguacate, Obtenido de (Inversa, 2020)

### 2.2.1. Requerimientos ambientes y condiciones climáticas óptimas para el cultivo de aguacate.

La mayoría de las variedades modernas de cultivo de aguacate prefieren climas cálidos y pueden soportar temperaturas de hasta -4°C (25°F). Sin embargo, tanto las bajas temperaturas como los cambios bruscos de temperatura limitan seriamente la producción del cultivo de aguacate, planta tropical amante del calor. Además, los aguacateros, sobre todo los más jóvenes, son especialmente vulnerables al estrés de las temperaturas superiores a 40°C (104°F). (EOS Data Analytics, 2023)

Cualquier plantación de árboles del aguacate prospera con temperaturas del suelo entre 20 y 25°C, mientras que las temperaturas inferiores a 10°C y superiores a 30°C impiden el crecimiento de las raíces. Para florecer, el clima para cultivar aguacate debe proporcionar a los árboles un mínimo de cuatro semanas de tiempo fresco en otoño e invierno. Sin embargo, las temperaturas inferiores a 10°C (50°F) pueden impedir la floración.

Las condiciones óptimas para el cultivo de aguacate varían según la variedad de cultivo y su etapa de crecimiento. Mientras que los árboles maduros pueden sobrevivir a temperaturas en torno a los -2°C (28°F), los ejemplares de 3-5 años o menos, no.

### 2.2.2. Requerimientos agronómicos y condiciones de crecimiento.

Originaria de México y América central, el Aguacate es una especie arbórea, perteneciente a la familia de las lauráceas, y el nombre científico está especificado como Persea americana Mill. Las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Tungurahua, Azuay y Loja, son las principales productoras de esta fruta, a una altitud entre 1800 y 2600 msnm, una temperatura promedio entre 15 y 20ºC, requiere de suelos de alta producción agrícola o más conocidos como “francos” o arenosos, con una capacidad de drenaje óptima y un pH que oscila entre los valores de 5.5 a 7.5. (Sotomayor et al., 2019)

**Tabla 1**

*Parámetros óptimos para el cultivo de aguacate*

| **Condiciones óptimas para el cultivo de aguacate** | |
|---|---|
| Temperatura | 15 a 20 °C |
| Altitud | Hasta 2500 m.s.n.m |
| Precipitación anual | 1000 a 2000 mm |
| Humedad Relativa | 75 al 80 % |
| Ph del suelo | 5.7 a 7.0 |
| Temperatura | 15 a 20 °C |

| | |
|---|---|
| Altitud | Hasta 2500 m.s.n.m |

*Fuente:* Obtenido de (Viera et al., 2016)

### 2.3. Factores ambientales en el crecimiento y rendimiento del aguacate.

Según (Sotomayor et al., 2019) las temperaturas ideales para la producción de los aguacates oscilan entre 20 °C y 25 °C (68 °F a 77 °F). Además, se debe tener en cuenta que las temperaturas nocturnas para que el fruto no sufra heladas o daños por frío deben oscilar entre 10 °C y 15 °C (50 °F a 59 °F) con estas condiciones se garantiza que se dé la floración y el cuajado de frutos.

Las temperaturas superiores a 30 °C (86 °F) pueden provocar estrés por calor, esto provoca la reducción de floración y cuajado, aumento de la evapotranspiración y la demanda de agua además de posibles quemaduras solares en frutos y hojas, provocando daños y reducción de calidad.

En lo que corresponde a temperaturas bajas, inferiores a 10°C (50°F) pueden ralentizar los procesos fisiológicos y afectar el crecimiento. Las heladas (temperaturas inferiores a 0 °C o 32 °F) pueden causar daños importantes, provocando caída de hojas y defoliación, daño a flores y frutos jóvenes, impactando el rendimiento y posible muerte de árboles jóvenes si se exponen durante períodos prolongados. (Hu et al., 2024)

#### 2.3.1. Niveles de Humedad óptimos para la producción de aguacate.

La humedad relativa debe oscilar entre los 75-80% para lograr un mejor prendimiento y cuaje de la flor. La humedad relativa excesiva puede tener como consecuencia el desarrollo de algas o líquenes sobre el tallo, ramas y hojas, o enfermedades fungosas que afectan al follaje, la floración, la polinización y el desarrollo de los frutos. Un ambiente excesivamente seco provoca la muerte del polen con efectos negativos sobre la fecundación y con ello la formación de menor número de frutos. (Bartoli, 2008)

### 2.3.2. Variables ambientales para censar en el cultivo de aguacate.

La producción óptima y eficiente del cultivo de aguacate está ligada a las variables ambientales específicas para su correcto desarrollo, como se abordó en el fundamento teórico inicial, la temperatura y la humedad son las dos variables de las que más depende este cultivo, mantener y monitorear los niveles óptimos de humedad implica la adecuada utilización del agua de riego disponible, por otra parte la temperatura es una magnitud que no se puede controlar, sin embargo conocer los niveles se emplea como criterio de decisión del sistema de riego.

### 2.3.3. Importancia de medir los niveles de temperatura y humedad en el cultivo de aguacate.

Uno de los principales retos en la producción de aguacate es contar con el recurso hídrico suficiente para abastecer la extensión del sembrío. Los árboles de aguacate prosperan en rangos específicos de temperatura y humedad, y las desviaciones pueden provocar estrés, una mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades y una reducción del rendimiento y la calidad de la fruta. El monitoreo de estos factores ambientales ayuda a los agricultores a mantener condiciones ideales, optimizar los programas de riego, reducir las pérdidas económicas y adaptarse a los cambios climáticos, lo que en última instancia conduce a árboles más sanos y resilientes y mayores ganancias. (Intagri, 2019)

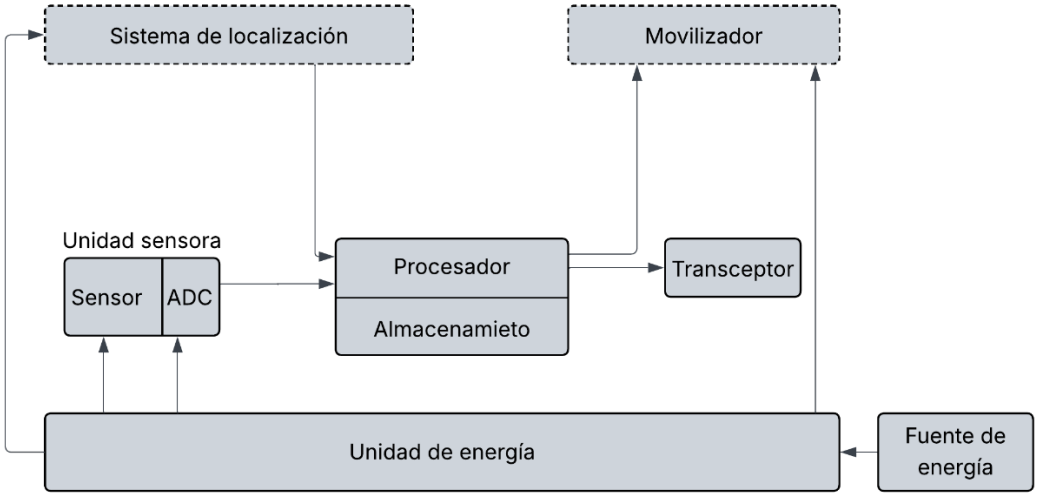
## 2.4. Tecnologías de sensores

Un sensor se define como aquel dispositivo que es capaz de convertir una variable física en otra que tiene un dominio diferente. De acuerdo con esta definición, es posible afirmar que un transductor forma parte de un sensor o de un actuador; pero la diferencia entre un sensor, un actuador y un transductor radica en que el transductor simplemente cambia el dominio de la variable, mientras que el sensor proporciona una salida útil para ser usada como variable de

entrada a un sistema de procesamiento de la información y el actuador se encarga de ejecutar la acción determinada por el sistema de procesamiento de la información. (Corona, 2014).

**Figura 4**

*Estructura esquemática de un sensor*




*Nota:* La Figura 4 está adaptada de "Estudio de la seguridad en los dispositivos IoT (Internet of Things)", por la Facultad de Ciencias Estudio, 2021, (p. 14).

### 2.4.1. Tipos de sensores para monitoreo de temperatura y humedad.

#### a. Sensores Capacitivos

Este tipo de sensores es ampliamente utilizado en la industria y la meteorología debido a su fácil fabricación, bajo costo y alta precisión. El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en la variación de la capacidad (C en [Farad]) de un condensador cuando cambia su constante dieléctrica. Si se emplea una mezcla gaseosa como dieléctrico entre las placas del condensador, la capacidad de este se ve afectada por dicha mezcla.

#### b. Sensores por conductividad

Cuando una superficie está expuesta a una mezcla gaseosa que contiene vapor de agua, siempre habrá algunas moléculas de agua presentes en esa superficie. La presencia de estas moléculas de agua permite que una corriente circule a través de la superficie, lo cual es el principio de funcionamiento de los sensores de conductividad. (Glaría, 2001)

### 2.4.2. Tecnologías inalámbricas para la transmisión de datos en entornos agrícolas remotos.

Según (Cedeño et al., 2014), las redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks, WSN) se han convertido en una herramienta valiosa para diversas aplicaciones, incluyendo la agricultura. Tanto a gran como a pequeña escala, estas redes permiten monitorear, controlar y mantener el estado de cualquier objeto o área analizada. En un campo de cultivo, estas redes pueden supervisar parámetros físicos de cada planta, como la temperatura y la humedad, y ajustarlos para mantener las condiciones ideales, logrando así la mejor calidad del producto final para el consumo humano. No obstante, cada uno de estos procesos consume una cierta cantidad de energía en los sensores, y toda la información recolectada debe ser transmitida inalámbricamente a un centro de recolección de datos.

### 2.4.3. Aplicaciones de las WSN.

Las redes inalámbricas de sensores (WSN) tienen múltiples aplicaciones en la agricultura, tales como la medición de condiciones climáticas, irrigación inteligente, monitoreo y control de plagas, y agricultura de precisión, entre otras. Un estudio presenta diversas ventajas y algunos problemas asociados al uso de las WSN. Entre las ventajas mencionadas se encuentran:

- Irrigación: Las WSN permiten optimizar el riego en áreas con recursos hídricos limitados, controlando el suministro de agua de manera eficiente.
- Fertilización: Facilitan la automatización del proceso de fertilización, permitiendo ajustar la cantidad, el tiempo y el lugar de aplicación para maximizar el uso de la tierra y mejorar el crecimiento y calidad de las plantas.
- Control de plagas: El uso de WSN para el control de plagas y hongos dañinos es ya una realidad, ayudando a reducir enfermedades en las plantas al modificar las condiciones ambientales para favorecer su desarrollo.

- Monitoreo de animales y pastos: Utilizando sensores GPS, que pueden considerarse WSN a gran escala, se monitorea la posición de los animales y se controlan los límites del terreno mediante señales sonoras. Asimismo, estas redes se emplean en el monitoreo de pastos.
- Invernaderos: En estos entornos cerrados, las WSN permiten ajustar la temperatura del aire, la intensidad de la luz, la humedad y la temperatura del suelo para crear condiciones óptimas para el cultivo.

### 2.4.4. Características de redes LPWAN, con Zigbee, Wi-Fi y Bluetooth para aplicaciones agrícolas.

La red de área amplia de bajo consumo (LPWAN) es una tecnología en rápido desarrollo con una amplia gama de aplicaciones, innovaciones tecnológicas e impactos sociales. Proporciona una infraestructura dinámica para el Internet de las Cosas (IoT), permitiendo que los dispositivos interconectados se comuniquen e interactúen entre sí y con Internet. Se utiliza frecuentemente cuando otras redes inalámbricas no son adecuadas.

**Tabla 2**

*Características de tecnologías de transmisión inalámbrica*

| Característica | LPWAN | Zigbee | Wi-Fi | Bluetooth |
|---|---|---|---|---|
| **Rango de alcance** | 10-40 km | Hasta 100 m | Hasta 100 m (802.11n) | Hasta 100 m (Bluetooth 5.0) |
| **Consumo de energía** | Muy bajo | Bajo | Alto | Bajo-Moderado |
| **Velocidad de datos** | 0.3 - 50 kbps | Hasta 250 kbps | Hasta 600 Mbps (802.11n) | Hasta 2 Mbps (Bluetooth 5.0) |
| **Frecuencia** | Sub-GHz (868/915 MHz), 2.4 GHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz, 5 GHz | 2.4 GHz |
| **Estándares** | LoRaWAN, Sigfox | IEEE 802.15.4 | IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax | IEEE 802.15.1 |
| **Seguridad** | Varía (AES-128, etc.) | AES-128 | WPA2, WPA3 | AES-128 |

Wi-Fi, Zigbee y Bluetooth no son opciones adecuadas para comunicaciones de largo alcance. Las redes celulares de máquina a máquina consumen mucha energía y resultan costosas en términos de software, hardware y servicios. En este contexto, LPWAN es ideal para conectar dispositivos IoT que necesitan enviar datos a largas distancias, manteniendo al mismo tiempo una larga vida útil de la batería. (Yuksel & Fidan, 2021)

### 2.5. Agricultura de precisión e IoT.

La agricultura de precisión (AP) se ha utilizado recientemente como una agricultura innovadora para aumentar la rentabilidad mediante la mejora de los rendimientos de los cultivos. Las redes de sensores inalámbricos (WSN) se utilizan ampliamente en la AP para medir los parámetros agrícolas. (Hamouda, 2024)

La agricultura es una fuente fundamental para mejorar la economía de los países. Al mismo tiempo, los principales recursos de la agricultura, como el agua, están disminuyendo, las actividades agrícolas, como el riego, requieren un trabajo riguroso y un tiempo intensivo. Según (Saranya et al., 2023). Para mejorar el rendimiento de los cultivos, los requisitos agrícolas, como el agua y los fertilizantes, deben proporcionarse en el momento adecuado, el lugar correcto y la cantidad satisfactoria. Por lo tanto, la agricultura de precisión (AP) es una agricultura inteligente que supera todos estos desafíos y necesidades.

La AP utiliza la tecnología de la información y la comunicación, los dispositivos sensores y el control automatizado para mejorar la productividad de los cultivos, la rentabilidad, la eficiencia laboral, la sostenibilidad energética y ambiental y la seguridad alimentaria.

#### 2.5.1. IoT aplicado a la agricultura de precisión.

La agricultura de precisión es posible gracias a los rápidos avances en el aprendizaje profundo (DL) y la Internet de las cosas (IoT) para la agricultura, lo que permite a los

agricultores mejorar sus operaciones agrícolas para satisfacer de manera sostenible el suministro futuro de alimentos. (Saranya et al., 2023)

En el acelerado mundo actual, el uso de dispositivos conectados a Internet está aumentando rápidamente. La incorporación de Internet ha comenzado a revolucionar este campo al conectar dispositivos, lo que ahora se conoce como Internet de las cosas (IoT). El término IoT fue acuñado por Kevin Ashton en el año 1999. Las cosas que nos rodean están interconectadas entre sí a través de Internet y hacen que las cosas sean más inteligentes al transferir datos sin ninguna interacción de humano a humano o de humano a máquina, y cada cosa conectada.

### 2.6. Automatización y control inteligente.

El concepto de automatización se basa en utilizar tecnología para realizar tareas que involucren una muy poca intervención humana. Un sistema de control inteligente de monitoreo consta de varios subsistemas basados en tecnologías del IoT, que se adaptan a diferentes propósitos, como la vigilancia, la monitorización ambiental y el control automático de actuadores, el control inteligente utiliza una variedad de enfoques informáticos como las redes neuronales, lógica difusa, aprendizaje de refuerzo entre otros. (Mahbub et al., 2021)

#### 2.6.1 Lógica difusa aplicada a sistemas de automatización.

La lógica difusa opera con aproximaciones en lugar de valores exactos, y se adapta a incertidumbres y modelos de sistemas desconocidos, de forma muy similar al razonamiento humano. A diferencia de la lógica booleana, que se basa en distinciones claras en las que las afirmaciones son totalmente verdaderas o falsas, la lógica difusa permite valores de verdad intermedios entre 0 y 1. La lógica difusa reconoce que las afirmaciones pueden tener distintos grados de pertenencia a un conjunto, lo que amplía el concepto para incluir múltiples valores de verdad posibles que van de 0 a 1. (Thomopoulos et al., 2024)

Los componentes fundamentales de la lógica difusa son los conjuntos difusos, que carecen de un límite bien definido y se caracterizan por una curva que asigna el espacio de entrada a un valor que representa el grado de pertenencia.

### *2.6.2. Fuzzificación.*

La lógica difusa se utiliza en el diseño de sistemas de inferencia difusa (SIF). A diferencia de los enfoques matemáticos abstractos, los SIF emplean reglas interpretables por humanos para asignar entradas precisas a salidas precisas.

Para profundizar más, exploremos cómo funciona un ventilador de enfriamiento en función de la temperatura. Durante la etapa de fuzzificación, el discurso se divide en diferentes conjuntos difusos mediante la selección de variables lingüísticas y funciones de pertenencia adecuadas. (Thomopoulos et al., 2024)

A medida que el ventilador de enfriamiento avanza hacia la etapa de inferencia/reglas, tiene en cuenta las reglas lingüísticas derivadas del conocimiento experto y los datos. Los conjuntos difusos de variables de entrada establecidos durante la etapa de fuzzificación se asignan luego a los conjuntos de salida. A continuación, se muestra un resumen de una ilustración de ejemplo de un conjunto de reglas, mientras que:

- Si (la temperatura es baja), entonces (el ventilador está apagado)
- Si (se desea la temperatura), entonces (el ventilador está apagado)
- Si (la temperatura es media) entonces (el ventilador es bajo)
- Si (la temperatura es media alta) entonces (el ventilador es medio)
- Si (la temperatura es alta) entonces (el ventilador es alto)

## 2.7. Sistemas de riego.

Los sistemas de riego son métodos y tecnologías de ingeniería diseñados para suministrar cantidades controladas de agua a cultivos, pastos o jardines con el fin de complementar la lluvia natural, optimizar el crecimiento de las plantas y mejorar la

productividad agrícola. Abarcan desde técnicas tradicionales de riego superficial, como surcos y cuencas, hasta métodos más avanzados como aspersores y riego por goteo, que optimizan el uso del agua al reducir la evaporación y la escorrentía. (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010)

### 2.7.1. Sistemas de riego convencionales.

En un sistema de riego convencional, los agricultores aplican un riego uniforme en todas las partes de la finca sin tener en cuenta las variabilidades del campo y las necesidades hídricas del cultivo. Por lo tanto, este método tiene una menor capacidad de ahorro de agua y puede provocar un riego excesivo en algunas partes de la finca mientras que otras partes están insuficientemente irrigadas, lo que puede provocar un estrés hídrico no deseado en las plantas. (Abioye et al., 2020)

La mayoría de los controladores de riego comerciales disponibles en el mercado están preprogramados para suministrar agua a intervalos predefinidos, lo que ofrece una programación de riego fuera de línea basada en el conocimiento empírico de la dinámica de las variables climáticas, así como de las características del suelo y de las plantas.

### 2.7.2 Problemas con los sistemas de riego convencionales.

Según (Abioye et al., 2020), las dificultades en los sistemas de riego abarcan la escasez de agua causada por la sequía y el cambio climático, las perturbaciones ambientales, la naturaleza no lineal de la dinámica de las plantas, la variabilidad climática, y la absorción dinámica de agua por parte de las plantas. Para enfrentar estos desafíos, se implementa el concepto de riego de precisión, que busca optimizar el uso del agua y mejorar el rendimiento de los cultivos.

El riego de precisión es la integración de tecnologías de información, comunicación y control en el proceso de riego para obtener un uso óptimo de los recursos hídricos y minimizar el impacto ambiental (Zacepins et al., 2012) . El riego de precisión tiene en cuenta la variación

espacial y temporal del suelo, la estructura del suelo y las propiedades hidráulicas, las respuestas de las plantas al déficit hídrico, las variables climáticas cambiantes a través de un monitoreo efectivo a través de Internet de las cosas (IoT), para tomar mejores decisiones de riego que tienen el potencial de ayudar a lograr un alto ahorro de agua y un mejor rendimiento. (Bitella et al., 2014)

### 2.7.3. Sistemas de riego de precisión.

Los sistemas de riego se pueden clasificar en dos tipos según su método de control: sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado. El control de lazo abierto, también conocido como control sin retroalimentación, opera tomando decisiones basadas en el estado actual. Esto significa que no utiliza retroalimentación para verificar si la acción tomada ha alcanzado el objetivo deseado, que en este caso sería satisfacer las necesidades de riego del cultivo de manera precisa, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y del suelo.(Benzaouia et al., 2023)

## 2.8. Tecnologías asociadas a la gestión de los sistemas de control de riego.

En el ámbito de la gestión de campos moderna, es crucial no solo adoptar sistemas de control avanzados, sino también incorporar protocolos de comunicación IoT para permitir una transmisión de datos fluida y un control mejorado.

Para (Benzaouia et al., 2023), la integración de IoT ofrece numerosos beneficios, incluida la adquisición de datos en tiempo real, la monitorización remota y la mejora de las capacidades de toma de decisiones. Se pueden utilizar diversas tecnologías de comunicación, como Wi-Fi , Bluetooth , Zigbee y otras, para establecer conexiones fiables en aplicaciones de gestión de campos.

### 2.8.1. Tecnologías para la agricultura de precisión

Las tecnologías empleadas en la agricultura de precisión dependen del medio, los requerimientos y de las condiciones ambientales. A continuación, se indican los tres tipos de tecnologías más usadas en este campo. (Petrović et al., 2024)

- **Sistema de Posicionamiento Global (GPS):** Proporciona datos de posicionamiento precisos, lo que permite un mapeo preciso de los campos y el seguimiento de maquinaria y recursos. Mejora la precisión de las operaciones de plantación, fertilización y cosecha, asegurando un uso óptimo de los insumos y minimizando el desperdicio.
- **Detección remota:** Utiliza satélites, drones y aviones para recopilar datos sobre la salud de los cultivos, las condiciones del suelo y los factores ambientales. Este monitoreo en tiempo real ayuda a los agricultores a evaluar las condiciones de los cultivos, detectar problemas tempranamente y tomar decisiones informadas sobre riego, control de plagas y manejo de nutrientes.
- **Sensores de suelo:** Mide la humedad, la temperatura, el pH y los niveles de nutrientes del suelo, lo que permite un riego y fertilización precisos. Los datos sobre el estado del suelo en tiempo real permiten a los agricultores aplicar la cantidad adecuada de agua y nutrientes en el momento adecuado, mejorando la salud y el rendimiento de los cultivos y al mismo tiempo conservando los recursos.

### 2.8.2. Monitoreo de Humedad en la agricultura de precisión.

El monitoreo de la humedad del suelo en tiempo real es un parámetro importante que ayuda a los agricultores a decidir mejorar la productividad agrícola y reducir el desperdicio de recursos para una mejor producción y crecimiento de las plantas. La humedad del suelo es

crucial para comprender y controlar las propiedades físicas y bioquímicas del suelo, lo que ayuda al crecimiento normal de la planta.

El monitoreo preciso de la humedad del suelo es necesario para la salud de las plantas. La disminución de la humedad del suelo o el contenido de agua puede dificultar que las raíces de las plantas sean estables y activas. (Ullah et al., 2024)

### 2.9. Norma ISO/IEC/IEEE 29148

Esta norma establece los principios, procedimientos y mejores prácticas de la denominada “Ingeniería de Requisitos” dirigido a sistemas y software. El principal objetivo de esta norma es garantizar que todos los requisitos planteados sean, coherentes, claros verificables y trazables, además se encarga de que estén en la misma línea de las necesidades reales de las partes interesadas o denominados stakeholders.

La ISO/IEC/IEEE 29148, se aplica en varios campos de la ingeniería, como la automotriz, aeroespacial, la ingeniería en telecomunicaciones, IoT, entre otras. Esta norma es importante en el desarrollo de proyectos ya que permite a los equipos crear documentación completa de requerimientos, ofreciendo una calidad superior del producto final además de la comunicación entre desarrollador y beneficiario. (ISO/IEC/IEEE, 2018)

# Capítulo III: Diseño e Implementación

Este capítulo aborda el diseño e implementación del sistema prototipo en el cultivo de aguacate en la Quinta La Joya, dando continuidad al diseño metodológico previamente desarrollado bajo el modelo conocido como cascada (Waterfall). El diseño del sistema tiene como fundamento el análisis previo de las características del predio donde se realizará la implementación, analizando variables y condiciones ambientales para definir los requerimientos del sistema, para posteriormente realizar la implementación que consiste en la instalación de los dispositivos componentes del sistema, entre ellos el Gateway, los nodos inalámbricos y los sensores de humedad del suelo, así como las electroválvulas destinadas a regular el riego de acuerdo con el porcentaje de humedad, la temperatura y los ciclos programados en intervalos de tiempo específicos. Posteriormente, se configura la red de comunicación para garantizar la interacción inalámbrica entre los nodos y una estación base central, lo cual permite establecer la infraestructura de software requerida para la recopilación, transmisión, almacenamiento y análisis de los datos obtenidos por los sensores. Este proceso no solo responde a los requerimientos identificados en la fase de análisis, sino que también integra elementos de hardware y software de manera estratégica, con el propósito de optimizar la gestión hídrica del cultivo de aguacate y asegurar el cumplimiento de los objetivos planteados.

## 3.1. Metodología

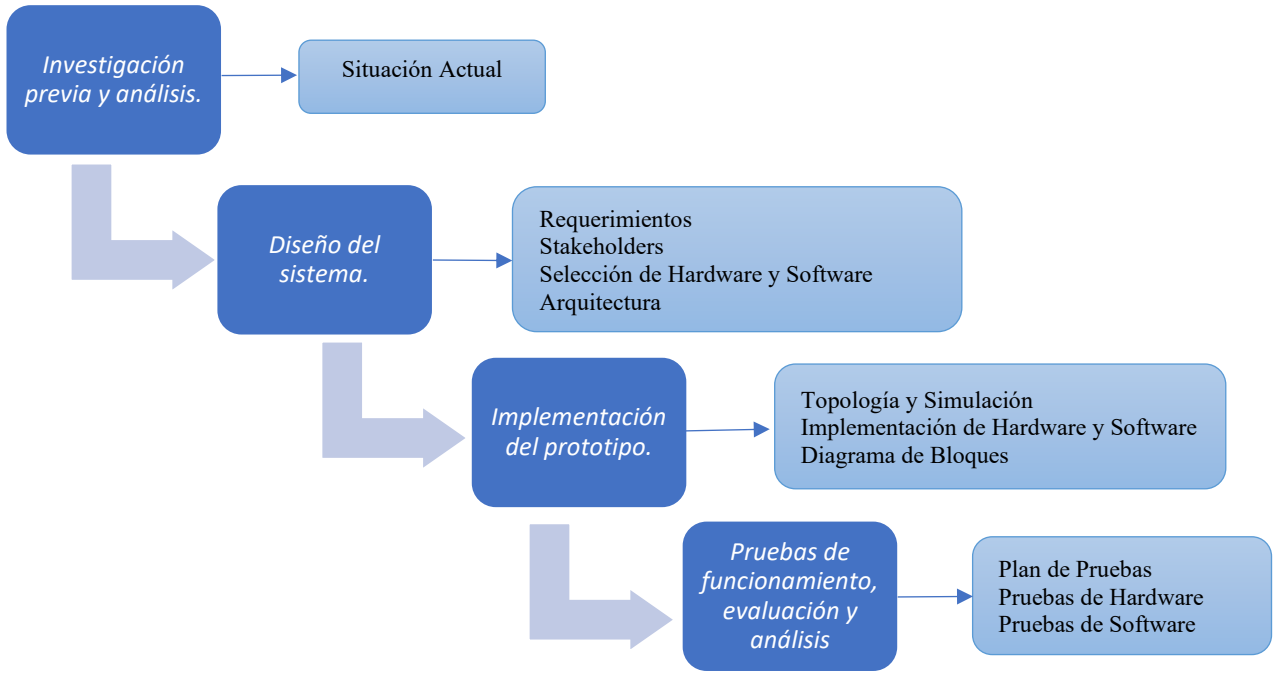
El presente proyecto adopta la metodología en cascada la cual se fundamenta en el desarrollo y cumplimiento de las fases secuenciales planteadas del proyecto. La característica principal de esta metodología es que cada nueva fase a implementar y/o desarrollar sólo puede iniciarse una vez que la anterior esté completa. Una de las ventajas de la metodología Waterfall es que, al tratarse de una secuencia de pasos, es fácil detectar errores sobre la marcha, lo que

permite dar correcciones oportunas y seguimiento específico de los bloques de trabajo establecidos. (Laoyan, 2025)

EL objetivo del proyecto es desarrollar un sistema para el monitoreo de temperatura y control de humedad en el cultivo de aguacate variedad “Fuerte”, basado en el Internet de las Cosas (IoT) e integración con lógica difusa para controlar actuadores obteniendo mejores resultados de producción.

**Figura 5**

*Metodología en cascada*




*Fuente*: Adaptado de (Royce, 2023)

El enfoque metodológico planteado se adapta a las necesidades y objetivos del proyecto estableciendo un orden cronológico y ordenado para cumplir con todos los requerimientos del caso e integrar cada una de las fases una vez que la anterior esté finalizada. A continuación, se describe cada una de las fases que integran la metodología:

- Investigación Previa y Análisis: Esta fase se basa en el estudio in situ de las condiciones y variables actuales, condicionando un marco sustancial de referencia con el fin de preestablecer las necesidades operacionales iniciales y

permitiendo cumplir con los objetivos específicos 1 y 2 planteados a inicio de este proyecto.

- Diseño del sistema: La segunda fase de la metodología implica recopilar y organizar la información acerca de los principales requisitos y componentes del sistema, lo que permite tomar decisiones en la selección tanto de hardware como de software dando cumplimiento al objetivo 3.
- Implementación del prototipo: En esta fase, mediante acciones planificadas, se ejecutan las soluciones planteadas en base a los requerimientos de la fase anterior y se materializa el sistema tanto de hardware como de software realizando la instalación/adaptación in situ.
- Pruebas de funcionamiento, evaluación y análisis: Fase final y dedicada a la evaluación del sistema y correcciones oportunas del flujo y bloques de operación globales que integran el sistema.

## 3.2. Fase de Investigación Previa y Análisis

Esta primera fase se enlaza directamente con la investigación previa en el capítulo 2 correspondiente a la fundamentación teórica esto implica recopilar información acerca de la situación actual del predio del cultivo de aguacate. Lo que se busca en esta fase es determinar en teoría, la solución integral al problema planteado empleando tecnología IoT y automatizando el riego para mejorar el desarrollo del cultivo, ofreciendo una solución sustentable y manteniéndola a largo plazo.

### *3.2.1. Situación Actual*

El cultivo de aguacate se ha convertido en los últimos años en un negocio rentable tanto local como internacionalmente. Según (Mora, 2025) una totalidad de 24000 kg de aguacate se exportó desde Ecuador hacia Argentina en 2025, además según los datos de Agrocalidad en el tema de certificación fitosanitaria, en el año 2024 se exportaron un total de 2788 toneladas de

aguacate realizando un total de 168 envíos a 12 diferentes destinos, lo que ha generado un interés en los productores de la zona norte del país específicamente de Imbabura, de extender las áreas de cultivo de este producto en los últimos años.

El predio "Quinta La Joya" ubicado en la parroquia de Pimampiro, cantón Pimampiro a 2028 m.s.n.m. tiene una extensión de 20100 $m^2$. Esta zona y sus predios colindantes son conocidos por la producción de árboles frutales como durazno, mandarina y aguacate, siendo este último el producto que acapara más extensión de siembra que los otros mencionados. Entre las características geográficas más relevantes de esta zona de cultivo, destaca la presencia de suelos de tipo arenoso, rangos de precipitaciones de 1000-1250 mm al año y temperaturas entre 14 a 24 $^{\circ}$C. Mediante una visita de campo se investigó la disponibilidad del recurso hídrico, el predio se abastece de un suministro de agua que se raciona por turnos de 2 horas, 2 veces a la semana, este suministro se almacena en un reservorio, sin embargo el agua de riego captada no es suficiente para abastecer la extensión en su totalidad según sus propietarios, teniendo en cuenta esto, la disposición del área de cultivo ha sido planificada con el fin de que el cultivo de aguacate se realice de una manera óptima y sostenible y no representa problemas para adaptar el sistema planteado. La zona total de cultivo abarca un área grande por lo que es crucial delimitar la de implementación y así definir los requerimientos óptimos para el sistema.

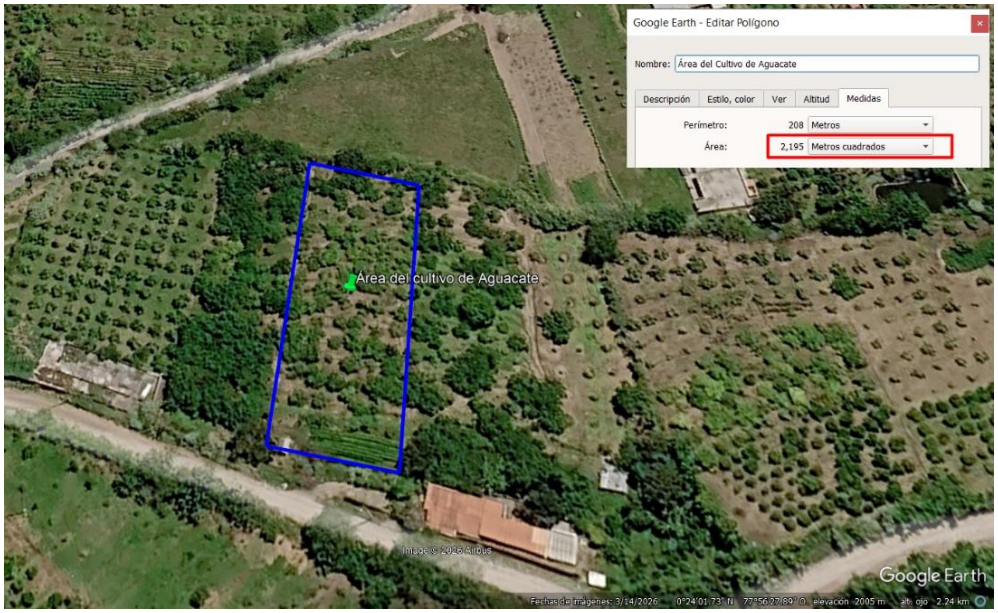
El cantón Pimampiro en su Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2030 señala que, en el tema de gestión del agua enfrentan serios desafíos. Una fuente hídrica importante es la subcuenca del río Mataquí que abastece a la región tanto para la agricultura como para el consumo humano, no obstante, se encuentra en una situación de precariedad por fenómenos naturales como la sequía y el déficit hídrico que son recurrentes en la región, además se señala que dichos problemas afectan tanto a la disponibilidad de acceso del agua potable para la población, así como al riego de cultivos. (GAD Pimampiro, 2024)

Frente a lo mencionado en el párrafo anterior, es indispensable tomar medidas de mitigación ante estos problemas en base a requerimientos específicos como la implementación de un sistema de monitoreo y control. En este caso se busca distribuir de manera eficiente el recurso hídrico mediante tomas de los datos de temperatura ambiente y humedad en suelo con el propósito de tomar decisiones lógicas que controlen actuadores manejando así la distribución del recurso. El proyecto que se va a implementar en el predio llamado Quinta la Joya que posee un sistema de riego por gravedad que es poco eficiente al momento de abastecer el suministro adecuado del recurso hídrico, por lo que es necesario implementar un sistema de riego por goteo en una parte del cultivo.

Para analizar la topografía y establecer parámetros de cuantificación respecto a la solución técnica que se plantea, se usa la herramienta Google Earth que permitirá evaluar parámetros como la extensión de la zona de enfoque, pendiente y elevación, parámetros que se deben cuantificar para establecer un criterio válido en la implementación. En la Figura 6 se puede observar que el área del cultivo de aguacate en donde se planea implementar el sistema es de 2195 metros cuadrados.

**Figura 6**

*Área de cultivo de Aguacate*

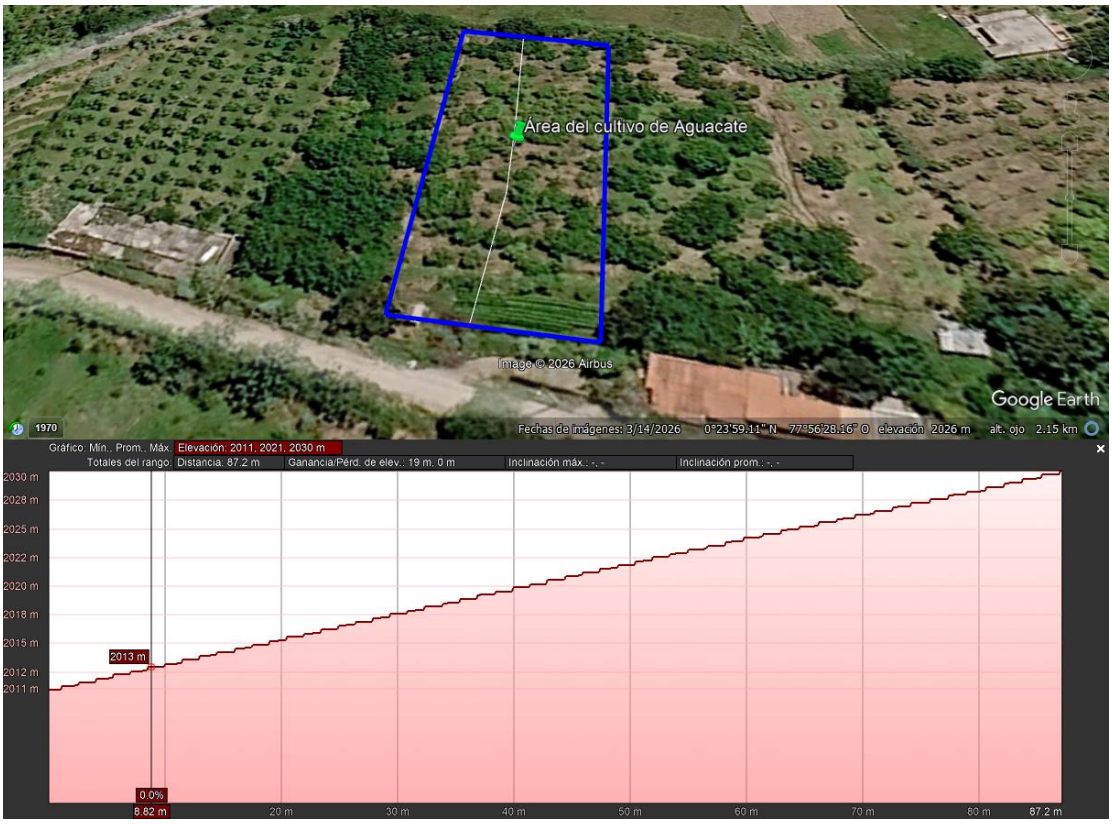


*Nota:* El área azul seleccionada corresponde a la extensión de cultivo de la variedad de aguacate denominada “Fuerte”. Fuente: Adaptado de Google Earth (2026).

De la misma forma, se traza una ruta para analizar datos del perfil topográfico de la zona, como se observa en la Figura 7. Los datos que proporciona la herramienta son fundamentales para calcular el desnivel y por consecuencia la pendiente. La distancia de extemo a extremo de manera vertical del terreno es de 87.1 m, la elevación inicial es de 2011 metros, en tanto que la elevación final presenta un valor de 2030 metros, con estos datos es posible obtener la pendiente.

**Figura 7**

*Datos topográficos del predio*




*Nota:* La Figura 7 presenta los datos de elevación en los extremos del terreno, proporcionando valores para el posterior análisis. Fuente: Adaptado de Google Earth (2026).

EL valor de elevación en metros del terreno se calcula mediante una simple resta de los valores de elevación, cabe señalar que estos valores que la herramienta proporciona son expresados en m.s.n.m y es pertinente realizar el cálculo para obtener la pendiente.

Es así como, el desnivel en metros es igual la elevación final menos la elevación inicial, obteniendo un valor de 19 metros de desnivel entre el extremo alto y el extremo bajo del terreno. Se procede entonces a encontrar la pendiente que posee el terreno haciendo uso de la ecuación 1 como se muestra a continuación:

$$Pendiente\ (\%) = \frac{Desnivel\ (m)}{Distancia\ Horizontal\ (m)} \times 100 \quad (1)$$

$$Pendiente\ (\%) = \frac{19\ m}{87.1\ m} \times 100$$

$$Pendiente = 21.81\ \%$$

El análisis topográfico del terreno determinó que la extensión es de 2195 $m^2$, con un desnivel de 19 metros entre los puntos de mayor y menor elevación, en función de este último parámetro se determinó que la pendiente promedio es de 21.81 % evidencia de que la inclinación del terreno es considerable.

Se identificó también que el suelo de la zona es de tipo arenoso, característica que influye en la retención e infiltración de agua, el suelo en cuestión presenta una filtración hídrica y menor capacidad de conservar la humedad, teniendo como consecuencia diferentes condiciones del suelo dependiendo de la ubicación e inclinación presentes.

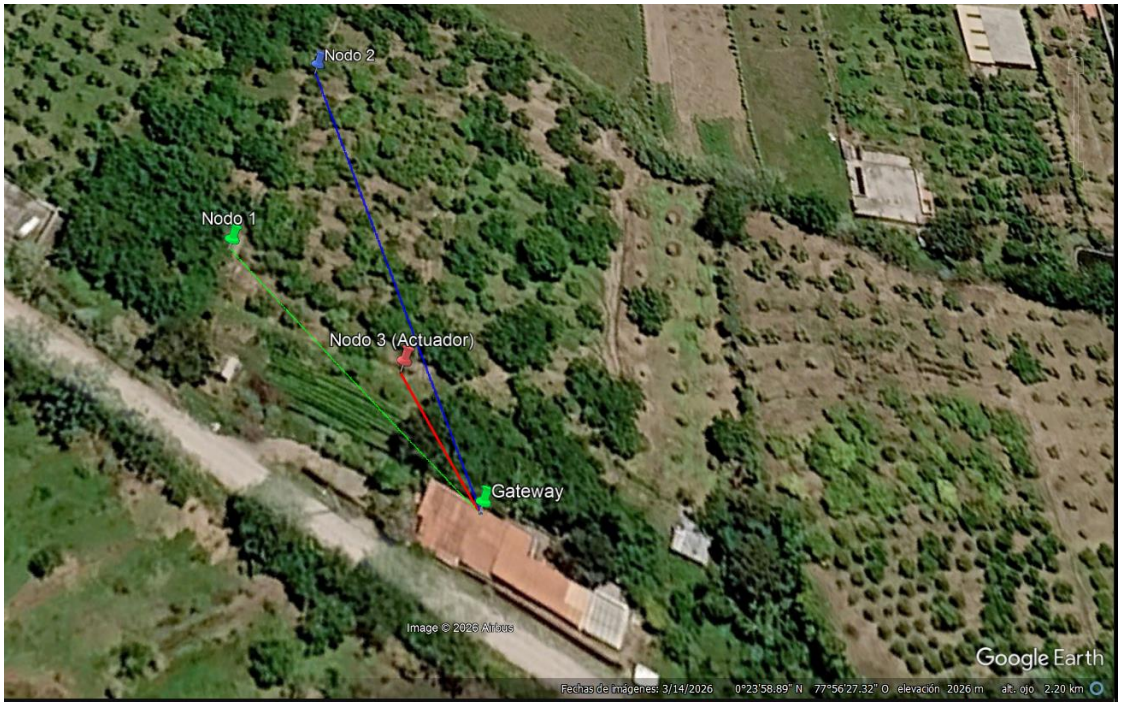
Debido a la topografía irregular que presenta el predio y las variaciones de humedad que pueden presentarse en las zonas altas y bajas y fundamentados en el Anexo 2, pregunta 5, la implementación de dos nodos sensores de manera estratégica es esencial ya que mediante esta configuración da paso a la obtención de lecturas de datos ambientales y de humedad del suelo más representativas, evitando que el sistema se base en un solo punto de medición.

Es así como se establece el criterio de que la adaptación de dos nodos sensores mejora la exactitud y precisión del monitoreo esto permite identificar las respectivas variaciones generadas por la pendiente propia del terreno, el escurrimiento de la superficie y las múltiples diferencias de infiltración del agua. En este sentido, la solución tecnológica sitúa al sistema en una mejor interpretación de las condiciones reales del área de estudio que garantiza la optimización del riego en base a las necesidades hídricas del cultivo.

Es de esa manera que la Figura 8 muestra la ubicación de los respectivos elementos de red proyectados a implementarse en el predio Quinta La Joya, fundamentalmente se compone de cuatro dispositivos de red siendo estos; Gateway, Nodos Sensor 1, Nodo Sensor 2 y Nodo Actuador distribuidos acorde al análisis topográfico realizado anteriormente proporcionando una solución óptima de acuerdo con el problema planteado inicialmente.

**Figura 8**

*Ubicación de los nodos sensores, nodo actuador y Gateway*




*Nota:* En la Figura 8 se puede observar los módulos de comunicación que utilizará el sistema y la ubicación específica de cada uno que comprende los nodos sensores (nodo 1 y 2),

nodo actuador y la puerta de enlace de datos o Gateway. Fuente: Adaptado de Google Earth (2020) por el Autor.

## 3.3. Fase de Diseño del Sistema

Ya que la ingeniería de requisitos es la normativa general recientemente establecida que describe los requerimientos para sistemas y partes involucradas, se basa en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 que dispone de diversas directrices y recomendaciones para una correcta definición de las nomenclaturas, estableciendo los requerimientos óptimos y específicos según las necesidades de las partes involucradas en el proyecto.

### *3.3.1. Nomenclatura de requerimientos*

Establecer una nomenclatura de requerimientos es parte esencial para cumplir con la estructura de la normativa mencionada en el apartado 3.3 garantizando el correcto funcionamiento del sistema y proveyendo un significado fácil de comprender e interpretar al usuario, la Tabla 3 presentada a continuación muestra la nomenclatura de los requerimientos.

**Tabla 3**

*Nomenclatura de Requerimientos*

| Descripción | Nomenclatura |
|---|---|
| Requerimientos de Stakeholders | StSR |
| Requerimientos del Sistema | SySR |
| Requerimientos de Arquitectura | SRSH |

*Fuente:* (ISO/IEC/IEEE, 2018)

Siguiendo las recomendaciones de la normativa se establece un grado de prioridad de cada una de las clases y tipos de requerimientos en función de su importancia. La lista de priorización se detalla en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Prioridad de Requisitos*

| Prioridad | Descripción |
|---|---|
| **Alta** | Es el mayor grado de prioridad del sistema que asegura su correcto y óptimo funcionamiento. |
| **Media** | La prioridad media contempla una función importante en el entorno, pueden dejarse de lado, pero esta acción supone un impacto en el desarrollo del sistema. |
| **Baja** | En este caso el requerimiento puede omitirse, causando una afectación nula en la operación del sistema, no es sustancial. |

Fuente: Autoría

### *3.3.2. Determinación de Stakeholders*

En el marco del presente proyecto, se entiende por *Stakeholders* o partes interesadas a los actores que mantienen una participación directa en los resultados buscados. Estos actores que se verán influenciados por el desarrollo del sistema o los beneficios que se podría obtener de su implementación, ya sea de manera directa o indirecta. La participación de los *stakeholders* en todas las fases del proyecto, desde la recopilación de requerimientos hasta la puesta en marcha y la posterior evaluación; resulta esencial para asegurar que sus expectativas y necesidades sean atendidas de forma adecuada. Los Stakeholders de este proyecto se muestan en detalle en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Lista de los Stakeholders*

| **Lista de Stakeholders** | |
|---|---|
| Tesista | Sr. Ramiro Ajala |
| Tutor | Msc. Luis Suárez |

| | |
|---|---|
| Asesor | Msc. Henry Farinango |
| Experto | |
| Dueño | Sra. Sonia del Pilar Quelal |

Fuente: Autoría

### *3.3.3. Requerimientos de Stakeholders*

La fase inicial de diseño del sistema está condicionada por requisitos y requerimientos de los Stakeholders que se ajustan a las necesidades del proyecto. Esta parte del desarrollo es fundamental ya que se definen los requisitos de operación de usuario que va a tener el sistema haciendo hincapié en las distintas prioridades que se definieron en la sección 3.3.1. En la Tabla 6 se definen estos requerimientos a detalle.

**Tabla 6**

Requerimientos de Stakeholders

| **StSR** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Requerimientos de Stakeholders** | | | | |
| **#** | **Requerimiento** | **Prioridad** | | |
| | | **Alta** | **Media** | **Baja** |
| **Requerimientos Operacionales** | | | | |
| **StSR1** | El sistema debe desplegarse en una zona expuesta a condiciones climáticas críticas. | X | | |
| **StSR2** | El sistema debe recolectar los datos de los nodos sensores en base a la ubicación. | X | | |
| **StSR3** | Se requiere una conexión energéticamente estable y funcional. | | X | |
| **StSR4** | El sistema debe censar datos de humedad en suelo y temperatura ambiente en tiempos establecidos con poco margen de error en la transmisión. | X | | |
| **StSR5** | El sistema debe comunicarse mediante tecnologías inalámbricas con la latencia mínima posible. | X | | |
| **StSR6** | El sistema garantiza la conexión del Gateway a Internet para el monitoreo de datos de manera remota. | X | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **StSR7** | El sistema debe controlar los actuadores en función de los datos procesados mediante reglas básicas de lógica difusa y a su vez de forma manual. | X | |
| **StSR8** | El sistema debe tomar datos del consumo de caudal de riego. | X | |
| **StSR9** | Los nodos sensores toman datos en un horario preestablecido y se configuran para que sean eficientemente en términos energéticos. | | X |
| | **Requerimientos de Usuario** | | |
| **StSR10** | El sistema debe monitorear de forma remota los datos en una plataforma predefinida, almacenando y mostrando los datos en tiempo real. | X | |
| **StSR11** | La implementación del sistema debe representar una inversión económicamente adecuada. | X | |
| **StSR12** | Los equipos de hardware deben tener una disponibilidad casi inmediata en el mercado. | X | |
| **StSR13** | Las dimensiones del sistema deben ser portables para la instalación y/o desinstalación en el caso pertinente. | X | |
| **StSR14** | El sistema debe presentar los datos en un Dashboard que sea fácil de interpretar y almacenarlos de manera local y en la nube. | X | |
| **StSR15** | La interfaz de monitoreo debe ser accesible desde cualquier dispositivo que tenga acceso a internet. | X | |

Fuente: Autoría

### *3.3.4. Requerimientos funcionales del sistema*

Estos requerimientos son las funcionalidades que el sistema debe manejar, en cuestión de uso, funciones, interfaces de los diferentes nodos, esto permite seleccionar cuidadosamente y con precisión las necesidades que el sistema demande para su correcto funcionamiento. Una recomendación importante es que se debe partir del requerimiento más general hasta los más

específicos, lo que permite llevar una estructura clara y concisa de los requerimientos, estos finalmente de presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Requerimientos funcionales del Sistema*

| SySR | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Requerimientos de Sistema** | | | | |
| **#** | **Requerimiento** | **Prioridad** | | |
| | | **Alta** | **Media** | **Baja** |
| **Requerimientos de Uso** | | | | |
| **SySR1** | El sistema debe proveer una fácil implementación in situ acorde a las ubicaciones definidas. | X | | |
| **SySR2** | El sistema está condicionado por el monitoreo y almacenamiento remoto, no solamente local. | X | | |
| **SySR3** | El sistema debe mostrar los datos en tiempo real de temperatura y humedad en suelo. | X | | |
| **SySR4** | El sistema debe mostrar los datos del consumo de agua en cada riego que sea activado. | X | | |
| **SySR5** | Debe operar en rangos de frecuencia establecidos en la legislación. | X | | |
| **Requerimientos de Performance** | | | | |
| **SySR6** | La comunicación entre los nodos y el Gateway debe ser constante mostrando valores en tiempo real. | X | | |
| **SySR7** | Los nodos sensores y nodo actuador deben conectarse al Gateway mediante tecnologías de baja potencia y largo alcance LoRa. | X | | |
| **SySR8** | El Gateway envía los datos a una plataforma centralizada que almacena, procesa y presenta los datos de forma intuitiva y versátil. | X | | |
| **SySR9** | El sistema debe enviar una notificación cuando la parte de control de riego sea accionada. | X | | |
| **Requerimientos de Interfaces** | | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **SySR10** | El prototipo del sistema debe disponer de puertos o pines los mismos que admitan el envío y recepción de datos de forma efectiva y sin saturación. | X | |
| **SySR11** | Todos los componentes de un nodo deben integrase en un sólo sistema embebido funcional además de tener larga durabilidad de sus componentes. | X | |
| **SySR12** | La tecnología inalámbrica que se emplee deberá disponer de una banda de frecuencia de uso permitida por la ARCOTEL. | X | |
| | **Requerimientos Físicos** | | |
| **SySR13** | Se debe contar con un módulo de montaje construido con materiales resistentes que permita proteger los componentes de los nodos. | X | |
| **SySR14** | Los nodos deben caracterizarse por tener dimensiones pequeñas que faciliten la portabilidad hacia el área de implementación del cultivo. | | X |
| **SySR15** | Los nodos sensores tendrán una ubicación estratégica que facilite la comunicación y recepción óptima con el mínimo de obstrucciones y pérdidas. | X | |
| **SySR16** | Ejecutar comparaciones mediate pruebas entre la parte donde se implementa el sistema y otra parte donde se aplica el riego tradicional evaluando el desempeño y efectividad del sistema | X | |

Fuente: Autoría

### *3.3.5. Requerimientos de Arquitectura del Sistema*

En esta sección se define las partes lógicas, hardware, software y energización del sistema, principalmente la arquitectura establece los requerimientos más específicos y apropiados para construir el sistema. En la Tabla 8 se detallan estos requerimientos en función de las necesidades que se definen conjuntamente con los stakeholders involucrados en el desarrollo.

**Tabla 8**

*Requerimientos de Arquitectura*

| SRSH | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Requerimientos de Arquitectura** | | | | |
| **#** | **Requerimiento** | **Prioridad** | | |
| | | **Alta** | **Media** | **Baja** |
| **Requerimientos Lógicos** | | | | |
| **SRSH1** | Los nodos sensores se deben comunicarse con el Gateway y este a su vez se comunica con el nodo actuador. | X | | |
| **SRSH2** | Los nodos deben integrar pines lógicos digitales para conectar los diferentes componentes. | X | | |
| **SRSH3** | El sistema debe procesar lógica difusa y activar los actuadores en función de los datos recolectados por los sensores. | X | | |
| **Requerimientos de Hardware** | | | | |
| **SRSH4** | El sistema debe contar con sensores que midan temperatura ambiental. | X | | |
| **SRSH5** | En necesario un sensor que detecte la humedad en el suelo de larga durabilidad. | X | | |
| **SRSH6** | El nodo actuador debe contar con electroválvulas que controlen el suministro hídrico y sensores de caudal. | X | | |
| **SRSH7** | Se debe contar con placas de comunicación que integren la tecnología LoRa. | X | | |
| **SRSH8** | Gateway central que recolecte y trate los datos eficientemente para tomar decisiones lógicas. | X | | |
| **Requerimientos de Software** | | | | |
| **SRSH9** | IDE compatible en la programación de los nodos sensores, actuadores, Gateway y fácil compilación de código. | X | | |
| **SRSH10** | Coexistencia de los repositorios o librerías en la programación y calibración de los sensores. | X | | |

| | | |
|---|---|---|
| **SRSH11** | Software o plataforma capaz de procesar reglas de lógica difusa y reenviar datos al Gateway para controlar los actuadores. | X |
| **SRSH12** | Plataforma de visualización compatible con los componentes e integraciones del hardware para visualizar los datos censados y estado del sistema. | X |
| **SRSH13** | Base de datos local para crear redundancia, garantizando la alta disponibilidad e integridad de los datos. | |
| | **Requerimientos Eléctricos** | |
| **SRSH14** | El consumo energético de los nodos sensores debe ser bajo y el valor de voltaje de 5 a 9 voltios. | X |
| **SRSH15** | El nodo actuador se debe energizar mediante la red eléctrica local. | X |

Fuente: Autoría

### 3.4. Selección de Hardware y Software

Habiendo ya definido los requerimientos según los Stakeholders, el siguiente paso es seleccionar el hardware y software que van a formar parte del sistema, el método para realizar la mejor elección es construir una tabla comparativa de los posibles componentes según el requerimiento de hardware o software y estableciendo un valor.

#### *3.4.1. Selección de Hardware*

La selección de Hardware implica la elección de los componentes que conformarán los nodos y el sistema actuador como sensores, microcontroladores, placas de desarrollo y actuadores eléctricos. El hardware mencionado debe cumplir con los requerimientos previamente establecidos para crear una completa compatibilidad y coexistencia de los elementos del proyecto. El seleccionar de manera correcta y prolija los elementos de esta sección asegurará el correcto funcionamiento del sistema.

#### 3.4.1.1. Selección de Sensores

Estos dispositivos permiten medir las variables planteadas para los datos de entrada del sistema. La selección de estos componentes para los nodos de censador se basa en las variables a medir que son temperatura ambiente y humedad en suelo. Para establecer qué sensor es más conveniente y efectivo que otro se realiza una comparación de características, como costos, disponibilidad en el mercado, precisión de censado y resistencia a condiciones climáticas críticas.

- **Sensor de Temperatura**

El sensor de temperatura es fundamental en la integración y requerimientos del sistema, ya que en base a esta variable ambiental se puede optimizar el riego dependiendo de la estación y época del año en el cultivo de aguacate. En la Tabla 9 se presenta 3 tipos de sensores de temperatura más demandados en el mercado que integran características esenciales y estables al momento de seleccionar este componente para el sistema.

**Tabla 9**

*Elección de sensor de temperatura*

| Hardware | Requerimientos | | | | | | Valoración Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | StSR4 | StSR11 | StSR12 | SySR3 | SRSH4 | SRSH10 | |
| DHT11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| DHT22 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 4 |
| TMP36 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Elección | DHT11 | | | | | | |

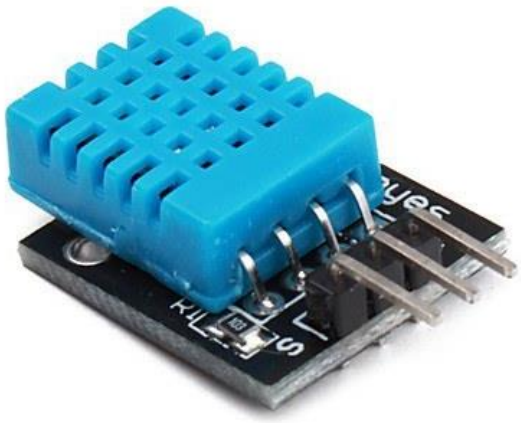
Fuente: Autoría

Como se puede apreciar en la Tabla 9 la elección del sensor de temperatura se ha realizado debido a sus características esenciales para adaptarse e integrar el sistema. El sensor seleccionado es el DHT11 mismo que ofrece mejores prestaciones, en lo que se refiere a costos es más económico y ofrece un tiempo de respuesta más rápida que el DHT22, además es de

tipo digital lo que hace relativamente más fácil la lectura de datos con un microcontrolador frente al TMP36 que es analógico.

**Figura 9**

*Sensor DHT11 de Temperatura*



*Nota:* Imagen referencial del sensor de temperatura DTH11. Fuente: (Kuongshun, 2023)

- **Sensor de Humedad en Suelo**

Una de las características geomorfológicas del predio es que posee una pendiente de 19 metros, este rasgo topográfico es un indicador de que los niveles de humedad no son los mismos en toda la extensión del cultivo, es por eso por lo que el sistema debe contar con un sensor de humedad de suelo para monitorear los niveles de esta magnitud. La Tabla 10 presenta 3 tipos de sensores de esta naturaleza donde se realiza la selección del sensor que mejor se adapte a los requerimientos del sistema.

**Tabla 10**

*Elección del Sensor de Humedad de Suelo*

| Hardware | Requerimientos | | | | | | Valoración Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | StSR4 | StSR11 | SySR3 | SySR11 | SRSH4 | SRSH15 | |
| VH4000 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| HW-390 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| YL-69 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| Elección | HW-390 | | | | | | |

Fuente: Autoría

En base a los datos proporcionados por la Tabla 10 el sensor seleccionado es el HW-390 o más conocido como Sensor Capacitivo v1.2. La selección se realizó en esencia, por las características que más se adaptan a los requerimientos como el voltaje de alimentación que es de 3.3v – 5v que se adapta a cualquier placa de procesamiento decente, corriente de operación de 5mA y una vida útil de 3 años ya que los electrodos tienen una capa de laca que los protege de la corrosión.

**Figura 10**

*Sensor capacitivo de humedad en suelo HW-390*




*Nota:* Sensor capacitivo de humedad en suelo HW390. Fuente: (ElectroStore, 2024)

- **Sensor de Caudal**

El sensor de caudal permite medir el gasto volumétrico del recurso hídrico que se consume con cada riego programado, censar estos datos permitirá establecer umbrales y comparar los niveles de consumo en dos partes específicas del cultivo destinadas a este propósito. En la Tabla 11 se presentan 2 sensores de caudal que operan bajo el principio del efecto Hall que son sensores de bajos costos, fácil integración, consumo energético eficiente y lectura digital, características que se integran al sistema propuesto.

**Tabla 11**

*Selección del sensor de Caudal*

| Hardware | Requerimientos | | | | | | Valoración Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | StSR8 | StSR11 | StSR12 | SySR4 | SRSH6 | SRSH15 | |
| YF-S201 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| FS-400A | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 |
| Elección | YF-S201 | | | | | | |

Fuente: Autoría

Posteriormente de haber analizado el hardware para el caudalímetro con fundamentos de requerimientos como se aprecia en la Tabla 11, el sensor seleccionado es el YF-S20. En comparación con el sensor FS-400A, provee conexiones universales para el caudal de 1/2 pulgada por lo que se adapta a cualquier sistema disponible, consumo de corriente de 15mA y un rango de flujo de 1-30L/min. En cuanto a la durabilidad, el material de construcción es plástico de alta calidad esto hace que se adapte tanto a la intemperie siendo resistente a climas extremos. Es por estas prestaciones que el sensor se adapta mejor al sistema.

**Figura 11**

*Sensor de Caudal YF-S201*



*Nota:* Imagen referencial del sensor de caudal YF-S201. Fuente: (Nylamp, 2023)

#### 3.4.1.2. Selección de Electroválvula

Este componente es crucial para controlar automáticamente el flujo del recurso hídrico disponible, las solenoides o electroválvulas gestionan el paso del agua mediante señales de control gestionadas por el sistema. Las aplicaciones de estos componentes van desde procesos industriales, control de gas y riego automático. En la Tabla 12 se presentan tres modelos de electroválvulas y la respectiva selección de acuerdo con los requerimientos del sistema.

**Tabla 12**

*Selección de Electroválvula*

| Hardware | Requerimientos | | | | | | Valoración Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | StSR1 | StSR3 | StSR11 | StSR12 | SRSH3 | SRSH6 | |
| 100-DVF | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 |
| ZE-4F180 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| PGV-201 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Elección | ZE-4F180 | | | | | | |

Fuente: Autoría

Posteriormente de haber realizado el análisis de los tres diferentes tipos de electroválvulas propuestas se optó por la electroválvula ZE-4F180 principalmente por su costo y disponibilidad en el mercado frente a las electroválvulas 100-DVF y PGV-2001. Al disponer conexiones de ½ pulgada y tener un voltaje de operación de 12V se adapta a la mayoría de los estándares usados en sistemas de riego lo que lo hace el elemento óptimo y viable para la integración al sistema.

**Figura 12**

*Solenoide ZE-4F180*



*Nota:* Solenoide ZE-4F180 12V. Fuente: (Ecetronics, 2023)

### 3.4.1.3. Selección de Nodos y Gateway

Estos microcontroladores son parte esencial del sistema, permitirán recolectar las variables ambientales específicas, para su posterior envío, almacenamiento y análisis. La selección se evidencia en la Tabla 13 donde se comparan cada uno de los microcontroladores propuestos y más comerciales a nivel de IoT.

**Tabla 13**

*Selección de Microcontrolador para Nodos y Gateway*

| Hardware | Requerimientos | | | | | | | Valoración Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | StSR6 | StSR11 | StSR12 | SySR7 | SRSH2 | SRSH7 | SRSH14 | |
| ESP8266 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 4 |
| ESP32 LoRa V3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 |
| Arduino Uno | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 4 |
| Elección | ESP32 LoRa V3 | | | | | | | |

Fuente: Autoría

Ante la evaluación y comparación de los microcontroladores listados en la Tabla 13, el seleccionado es el ESP32 LoRa V3 de Heltec, esta selección se realizó principalmente por el tipo de tecnología que integra como lo es Wi-Fi bajo el estándar IEEE 802.11 b/g/n y LoRa, esto denota una gran ventaja en cuanto a los otros dos microcontroladores que no poseen dicha tecnología e integrarla supondría adaptar módulos externos que se traduce en un gasto mayor. En comparación con el módulo ESP8266, el ESP32 Lora V3 presenta una capacidad superior de entradas y salidas digitales, al disponer de 26 pines GPIO, frente a los 11 pines disponibles en el ESP8266.

**Figura 13**

*Heltec ESP32 LoRa V3*




*Nota:* Microcontrolador Heltec ESP32 LoRa V3. Fuente: (Heltec Automation, 2023)

### 3.4.1.4. Selección de la Unidad Central de Procesamiento

El bloque de procesamiento es el centro donde se van a almacenar y tratar los datos obtenidos por los nodos sensores y recibidos por el Gateway, existen variados procesadores y microprocesadores disponibles para este uso y se debe tener en cuenta la capacidad para procesar los datos en tiempo real que representa un factor crítico en la toma de decisiones del sistema, la conexión y compatibilidad con diferentes servicios IoT, bases de datos y software

de visualización. La comparación de estas unidades de procesamiento se indica en la Tabla 14 presentada a continuación.

**Tabla 14**

*Selección del Procesador*

| Hardware | Requerimientos | | | | | | Valoración Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | StSR10 | StSR12 | SySR8 | SRSH3 | SRSH8 | SRSH11 | |
| Orange Pi | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Raspberry Pi 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| Intel Core i3 (Mini-CPU) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| Elección | Intel Core i3 (Mini - CPU) | | | | | | |

Fuente: Autoría

Después de realizar la comparativa de características y prestaciones, el procesador Intel Core i3 fue seleccionado debido al soporte de múltiples sistemas operativos, mayor capacidad de procesamiento e integración de software. En comparación con el Raspberry Pi 4 y la Orange Pi, el procesador Intel Core i3 tiene la capacidad de ejecutar múltiples procesos intensivos de datos además ofrece una gestión eficiente de las conexiones entrantes. Otra característica que destaca es su arquitectura x86 que es compatible con entornos de desarrollo y librerías, lo que se traduce en una plataforma potente y robusta para una implementación IoT que se adapta perfectamente a la del presente proyecto.

**Figura 14**

*Mini CPU Core i3*



*Nota:* Imagen referencial de Mini-CPU Core i3. Fuente: (Serimtec, 2023)

### 3.4.2. Selección de Tecnología Inalámbrica de Largo Alcance

Una parte fundamental de la solución tecnológica en lo que se refiere a la transmisión de datos entre nodos y Gateway, es la tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y baja potencia que será implementada. El desarrollo del proyecto implica la ubicación de los nodos sensores y actuadores a una distancia considerable del Gateway, es por esta razón que la tecnología de comunicación inalámbrica se debe seleccionar de acuerdo con los requerimientos previamente establecidos tomando en cuenta características como largo alcance, ancho de banda, frecuencias de operación, tasa de transmisión de datos y consumo energético. La Tabla 15 presenta una comparativa en base a los parámetros mencionados anteriormente.

**Tabla 15**

*Comparación de características de Tecnologías LPWAN*

| | **Tecnología Inalámbrica de Largo Alcance** | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Característica** | **LoRa** | **SigFox** | **Zigbee** | **NB-IoT** |

| Tipo de Red | LPWAN abierta | LPWAN propietaria | WPAN | LPWAN celular |
|---|---|---|---|---|
| Alcance Típico | 2-20 km | 3-10 km en urbano | 10-100 m | 1-10 km |
| Velocidad de Transmisión | 0.3 -50 kbps | 600 bps | 20 – 250 kbps | 20 – 250 kbps |
| Frecuencia de Operación | Bandas ISM libres (433, 868, 915 MHz) | Bandas ISM libres (868/902 MHz) | 2.4 GHz (global), 868/915 MHz | Bandas LTE licenciadas |
| Ancho de Banda | 125 – 500 kHz (más flexible y configurable) | 100 Hz (muy limitado) | 2 MHz | 180 kHz |
| Consumo energético | Tx: 30–50 mA<br>Rx: 10–15 mA<br>Sleep: 1–5 µA | Tx: 40–50 mA<br>Rx: 10–20 mA<br>Sleep: 1–5 µA | Tx: 25–35 mA<br>Rx: 20–30 mA<br>Sleep: 10–50 µA | Tx: 180–250 mA<br>Rx: 50–70 mA<br>Sleep: 3–10 µA |
| Topología de Red | Estrella (Maestro-Esclavo) | Estrella | Malla (mesh) | Estrella (operador celular) |

Fuente: Autoría

Una vez se ha analizados las características de las tecnologías de largo alcance, se procede a seleccionar la tecnología más idónea en base a los requerimientos del sistema.

**Tabla 16**

*Selección de la Tecnología Inalámbrica de Largo Alcance*

| **Tecnología** | **Requerimientos** | | | | | | **Valoración Total** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **StSR3** | **StSR5** | **SySR5** | **SySR7** | **SySR12** | **SRSH7** | |
| LoRa | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| SigFox | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| ZigBee | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| NB-IoT | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| Elección | LoRa | | | | | | |

Fuente: Autoría

Indagando las características de las tecnologías propuestas en la Tabla 16, se seleccionó la tecnología LoRa como opción más conveniente y adaptable al proyecto, esta tecnología

posee un alcance de hasta 10 km configurada con un factor de dispersión alto en condiciones ideales de línea de vista, lo que permite la comunicación entre los nodos y el Gateway sin dificultades en entornos remotos. Según la ARCOTEL, la frecuencia de funcionamiento de la tecnología LoRa está en el rango de 915 a 928 MHz en Ecuador y gran parte de América Latina bajo UDBL que son bandas de uso determinado en bandas libres, las frecuencias mencionadas no requieren concesión o título habilitante pero que establecen requisitos técnicos que deben cumplirse según la Agencia de Regulación y Control de la Telecomunicaciones.

En términos de consumo energético, LoRa frente a otras tecnologías como SigFox, NB-IoT y ZigBee representa una eficiencia alta en modo deep sleep, con un consumo en el orden de decenas microamperios, en tanto que en modo de transmisión de datos el orden de consumo sube a decenas de miliamperios, esto dependerá de la duración y potencia de la transmisión.

Los microcontroladores Heltec ESP32 LoRa V3 seleccionados en el apartado 3.4.1.3 se integran perfectamente con los requerimientos de tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance LoRa, reduciendo costos en la integración de módulos adicionales y disponiendo de un entorno completo para el posterior desarrollo y programación y pruebas de conectividad.

### 3.4.3. Selección de fuente de alimentación

Puesto a que los nodos sensores se encuentran a una distancia considerable del Gateway y estarán expuestos a cambios de ubicación, es poco conveniente energizarlos mediante la red eléctrica local, en este sentido la selección de una fuente de alimentación portable es crucial en la autonomía de funcionamiento de los dispositivos. A continuación, se detalla el consumo de los dos nodos sensores en modo activo (transmisión de datos) y en modo sleep para posteriormente realizar los respectivos cálculos de consumo de corriente y poder seleccionar la batería más adecuada al consumo requerido.

**Tabla 17**

*Consumo eléctrico del Nodo Sensor 1*

| Elemento | Consumo en Estado Activo (mA) | Consumo en modo Sleep (mA) |
|---|---|---|
| **HW-390** | 5 mA | 0.1 mA |
| **DHT11** | 1 mA | 0.15 mA |
| **ESP32 Lora V3** | 114 mA | 2 mA |
| **Total** | **120 mA** | **2.25 mA** |

Fuente: Autoría

De acuerdo con la Tabla 15, el consumo de energía es de 120 miliamperios, este cálculo se establece mediante la suma de todos los componentes que integran el nodo sensor, es decir el microcontrolador Heltec ESP32 Lora V3 y los componentes que se conecten, en este caso al nodo sensor 1 se conecta el sensor DHT11 y el sensor HW-390.

A continuación, se procede con el cálculo del consumo que debe poseer la batería en base a la ecuación (2).

$$Consumo\ Total = \frac{(T_{cn} * I_{cn}) + (T_{cd} * I_{cd})}{T_{cn} + T_{cd}} \quad (2)$$

Siendo:

$T_{cn}$: Tiempo de consumo en estado activo

$I_{cn}$: Intensidad eléctrica de consumo en funcionamiento

$T_{cd}$:Tiempo de consumo (Modo Sleep)

$I_{cd}$: *I*ntensidad eléctrica de consumo Modo Sleep

Los criterios para este nodo sensor (Nodo 1), son los que se detallan a continuación, en base a los requerimientos específicos de funcionamiento:

$T_{cn} = 0.5\ s$

$I_{cn} = 120\ mA$

$T_{cd} = 3\ s$

$I_{cd} = 2.25\ mA$

Conociendo estos datos se procede a calcular el consumo total de la batería del Nodo 1 en base a la ecuación (2) anteriormente planteada, esto permite conocer el consumo que tendrá el nodo en operación.

$$Consumo\ Total = \frac{(0.5 * 120) + (3 * 2.25)}{0.5 + 3}$$

$$Consumo\ Total = \mathbf{19.71\ mA}$$

Dado que el consumo calculado es de 87.75 mA, se opta por una batería recargable y que opere en un rango de 3.7v, el modelo de batería de litio 18650 recargable, se adapta perfectamente a estos requerimientos dado que la capacidad es de 3300 miliamperios.

Un punto primordial para considerar es el tiempo de duración o vida útil de la batería en base a la ecuación (3) detallada a continuación:

$$Tiempo\ de\ Batería = \frac{Capacidad\ de\ Batería}{Consumo\ Total} \quad (3)$$

La ecuación (3) detalla la fórmula para calcular el tiempo de vida de la batería, donde la Capacidad es 3300 miliamperios y el consumo total toma un valor de 19.71 miliamperios estos valores se obtuvieron mediante los cálculos realizados en la sección anterior. De este modo, se obtiene la duración de la batería:

$$Tiempo\ de\ Batería = \frac{3300\ mA}{19.71\ mA}$$

$$Tiempo\ de\ Batería = \mathbf{167.48\ h}$$

Se repite el mismo proceso para el Nodo Sensor 2, mismo que presenta variaciones en los sensores, este nodo únicamente posee un sensor de humedad de suelo para mayor

precisión en la toma de datos. A continuación, se presenta el consumo energético de cada elemento en sus respectivos estados de consumo.

**Tabla 18**

*Consumo eléctrico del Nodo Sensor 2*

| Elemento | Consumo en Estado Activo (mA) | Consumo en modo Sleep (mA) |
|---|---|---|
| **HW-390** | 5 mA | 0.1 mA |
| **ESP32 Lora V3** | 114 mA | 2 mA |
| **Total** | **119 mA** | **2.1 mA** |

Fuente: Autoría

De la misma forma que se realizó el cálculo para el nodo 1, se calcula el consumo que debe poseer la batería par el nodo 2 en base a la ecuación (3).

Los criterios para este nodo sensor (Nodo 2), son los que se detallan a continuación, en base a los requerimientos específicos de funcionamiento:

$T_{cn} = 0.5\ s$

$I_{cn} = 119\ mA$

$T_{cd} = 3\ s$

$I_{cd} = 2.1\ mA$

Conociendo estos datos se procede a calcular el consumo total de la batería del Nodo 1 en base a la ecuación (2) anteriormente planteada, esto permite conocer el consumo que tendrá el nodo en operación.

$$Consumo\ Total = \frac{(0.5 * 119) + (3 * 2.1)}{0.5 + 3}$$

$$Consumo\ Total = \mathbf{18.8\ mA}$$

Puesto a que el consumo del Nodo Sensor 2 es de 18.8 miliamperios se selecciona el mismo modelo de batería recargable del Nodo 1, con una capacidad es de 3300 miliamperios adaptándose idóneamente a los requerimientos eléctricos de consumo.

El tiempo de duración de la batería del Nodo Sensor 2 se calcula mediante la ecuación (3):

$$Tiempo\ de\ Batería = \frac{3300\ mA}{18.8\ mA}$$

$$Tiempo\ de\ Batería = \mathbf{175.53\ h}$$

El tiempo de la duración de las baterías es alto con valores de 167.48 horas para el Nodo 1 y 175.53 horas para el Nodo 2, que equivalen a 7 días aproximadamente para cada caso. Esto equivale a un rendimiento óptimo ya que teóricamente, las baterías se deben reemplazar para cargarlas cada semana.

### 3.4.4. Selección de Software

La selección de software es elemental en el desarrollo del proyecto para que resulte funcional integrándose al hardware. Los diferentes procesos de análisis y control se realizan por medio del software, estableciendo un sistema eficiente y escalable. En esta sección se incluye la elección de lenguajes de programación, almacenamiento, visualización en la nube, y procesamiento local, la selección del software se estableció en base a criterios de compatibilidad, disponibilidad, soporte y facilidad de implementación.

#### 3.4.4.1. Selección de software para programar los Nodos y Gateway

Seleccionar este tipo de software implica una identificación detallada de características de un IDE de programación basado en el lenguaje C/C++ que se usa para configurar el microcontrolador Heltec ESP32 LoRa V3. Además, se considera la compatibilidad de librerías, controladores y soporte. En la Tabla 19, mostrada a continuación se muestra las opciones de software para programar los microcontroladores y su valoración respecto a los requerimientos del proyecto.

**Tabla 19**

*Selección de Software para programar Nodos y Gateway*

| Software | Requerimientos | | | Valoración Total |
|---|---|---|---|---|
| | SRSH9 | SRSH10 | SRSH12 | |
| IDE Arduino | 1 | 1 | 1 | 3 |
| ESP-IDF | 0 | 1 | 1 | 2 |
| Micro Python | 1 | 1 | 0 | 2 |
| Elección | IDE Arduino | | | |

Fuente: Autoría

El software elegido para programar los microcontroladores es IDE de Arduino, esta elección se fundamenta en el uso fácil e intuitivo del entorno, además ofrece una compatibilidad amplia con los microcontroladores que se requiere configurar, disponibilidad de librerías compatibles con la tecnología LoRa y lectura de sensores de variables ambientales. En comparación con el ESP-IDF, el IDE Arduino dispone de una curva de aprendizaje más corta lo que se traduce en un desarrollo más eficiente del proyecto. Por otra parte, considerando que Micro Python ofrece programación por medio de un lenguaje interpretado, posee limitaciones en el tema de librerías LoRa e ineficiencia en la ejecución. Es por eso por lo que IDE Arduino se adapta mejor a los requerimientos del proyecto, garantizando la integración y funcionalidad de los módulos de comunicación.

#### 3.4.4.2. Selección de Software en la Unidad Central de Procesamiento

Como parte del diseño del sistema, se requiere que los datos obtenidos por los nodos sensores sean procesados y almacenados de manera local para posteriormente procesar lógica difusa como parte de la automatización y cumplir con el primer objetivo específico. En la sección 3.4.1.4. se realizó la selección de la unidad central de procesamiento, en este caso una Mini-PC con procesador Intel Core i3 que cumplirá la función de servidor local similar a una Raspberry Pi.

En este caso la Unidad Central de Procesamiento tiene instalado el sistema operativo Windows 10, esto abre un sin número de posibilidades para ejecutar software de procesamiento/almacenamiento con amplio soporte y curva de aprendizaje corta. Después de haber investigado plataformas de procesamiento, se opta por Node-Red que es una herramienta que trabaja mediante flujos de trabajo e integra varias paletas de entrada, además de poseer un módulo de procesamiento para la lógica difusa integrándose a la arquitectura IoT.

#### 3.4.4.2. Software para establecer reglas de Lógica Difusa

La automatización del sistema se basa en procesos que implican variables de entrada, un módulo de procesamiento y reglas o estados de salida, integrar lógica difusa es un objetivo y requerimiento imprescindible para controlar actuadores automáticamente en función de variables tomadas por los nodos sensores. En el área de la lógica difusa se pueden definir estas reglas mediante una variedad de plataformas, sin embargo, se opta por usar MATLAB Fuzzy Logic Designer por su capacidad de modelar sistemas de control de nivel complejo e integrarlos con herramientas de validación y simulación. Este ToolBox ofrece una interfaz precisa y robusta que permite analizar la respuesta del sistema previo a la implementación real en la arquitectura IoT.

#### 3.4.4.3. Software de Almacenamiento Local de Datos

Dado que los datos tomados por los nodos sensores son prioridad en este proyecto para su análisis, se debe garantizar la gestión y almacenamiento de estos. El uso de una base de datos de series temporales es fundamental para cumplir con ciertos requerimientos específicos propuestos del sistema. Puesto a que este tipo de bases de datos están diseñadas para almacenar datos que varían en función del tiempo, seleccionar la más idónea supondrá una correcta y eficiente implementación de ese software de base de datos. En la Tabla 20 mostrada a continuación se presentan tres opciones de software para identificar sus principales características y seleccionar la más conveniente para el proyecto.

**Tabla 20**

*Selección de la Base de Datos Local*

| Software | Requerimientos | | | | | Valoración |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | StSR10 | StSR14 | SySR2 | SySR8 | SRSH13 | Total |
| TimescaleDB | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| InfluxDB | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| SQLite | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| Elección | InfluxDB | | | | | |

Fuente: Autoría

La selección de la base de datos InfluxDB permite almacenar y disponer de los datos entre un 95 a 99% en la mayoría de los casos, dependiendo del dispositivo de red donde se esté ejecutando, al disponer una base de datos de series temporales se facilita la consulta mediante la marca de tiempo y las etiquetas asignadas. InfluxDB se integra con Node-RED y plataformas de visualización locales. Además, se implementa este software para tener una doble redundancia de los datos en caso de una falla de conexión a Internet.

#### 3.4.4.4. Selección de Plataforma de Visualización

La visualización del monitoreo es un componente esencial del proyecto, la selección de la plataforma de visualización remota se establece bajo los requerimientos detallados en la Tabla 21, además de ser una herramienta indispensable para el beneficiario, la visualización en tiempo real ayuda a verificar el estado del cultivo y proporcionar información que resulta importante al momento de informar al administrador sobre los factores de humedad de suelo, temperatura y humedad ambiente. A continuación, se presentan cuatro opciones de plataformas utilizadas en el monitoreo remoto de proyectos IoT.

**Tabla 21**

*Selección de Plataforma de Visualización*

| Software | Requerimientos | | | | | Valoración |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | StSR10 | StSR14 | SySR2 | SRSH10 | SRSH12 | Total |
| ArduinoCloud | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| Thinger.io | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| ThingsBoard | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| ThingSpeak | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Elección | Thinger.io | | | | | |

Fuente: Autoría

La plataforma seleccionada para realizar el monitoreo de forma remota es Thinger.io que destaca frente a las otras tres opciones por su compatibilidad con el Gateway Heltec ESP32 LoRa V3 ofreciendo una API bastante ligera para realizar la integración con el dispositivo sin la necesidad de incluir librerías externas o configuraciones adicionales. En esta plataforma, los datos se almacenan en Data Buckets que son bases de datos de series temporales que permiten guardar los datos con registros históricos de fácil acceso y exportación.

Thinger.io también permite realizar las conexiones a su plataforma mediante protocolos de red ligeros como MQTT, HTTP, SigFox, entre otros y la parte de la interfaz es muy intuitiva para crear los Dashboards que facilitan el monitoreo de las magnitudes censadas. En comparación con ThingSpeak o Arduino Cloud, no existe limitaciones en la visualización y/o control de los dispositivos, además ofrece una aplicación móvil que facilita la disponibilidad del servicio con un dispositivo móvil conectado a Internet.

### 3.5. Diseño del Enlace Inalámbrico de Red LoRa

El diseño de una red de comunicación está definido por parámetros esenciales como la topología utilizar, parámetros del enlace, cálculos de pérdidas y simulaciones para validar el modelo. La red LoRa a implementar debe garantizar la constante comunicación entre los Nodos

(sensores y actuadores) con el Gateway o puerta de enlace siendo una red estable a la escala predefinida de la misma.

Una de las consideraciones claves para tener en cuenta es que la red estará desplazada en una zona rural con densidad de vegetación media-baja por lo que es pertinente realizar los cálculos de pérdidas en base a un modelo de propagación con el fin de establecer los parámetros óptimos para el enlace y la menor cantidad de pérdida de paquetes posible.

### 3.5.1. Topología

Los requerimientos del sistema definen una topología con 3 Nodos; dos nodos sensores, un nodo actuador y el Gateway, por lo tanto, se tienen 4 elementos y es una topología en estrella. Esta sección se condiciona por la ubicación geográfica de los elementos de red, como se mencionó en la sección 3.2.1. El proyecto se está desarrollando en "Quinta La Joya" en el cantón Pimampiro donde mediante un análisis in situ y con la ayuda del ingeniero experto en Agronomía, se definió la ubicación de los nodos en base a las variables ambientales a censar. La Tabla 22 muestra la ubicación en coordenadas de cada uno de los elementos que conforman la red LoRa.

**Tabla 22**

*Coordenadas de los Nodos componentes de la Topología*

| **Ubicación de Nodos y Gateway** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **ID** | **Tipo de Nodo** | **Coordenadas GPS** | | **Altitud (m.s.n.m)** | **Distancia al Gateway (m)** |
| | | **Latitud** | **Longitud** | | |
| Gateway | Gateway | 0°23'57.77"N | 77°56'28.09"O | 2037 | - |
| Nodo 1 | Sensor | 0°23'59.26"N | 77°56'28.96"O | 2025 | 54.67 |
| Nodo 2 | Sensor | 0°24'0.21"N | 77°56'28.32"O | 2016 | 76.60 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Nodo 3 | Actuador | 0°23'58.97"N | 77°56'28.20"O | 2026 | 38.50 |

*Fuente:* Autoría

### 3.5.2. Parámetros del Enlace LoRa

Para diseñar el enlace LoRa se debe seleccionar los parámetros de tipo físicos además de las configuraciones iniciales, teniendo en cuenta normativa, restricciones y condiciones del entorno rural en este caso. Seleccionar de forma correcta estos parámetros va a garantizar que el sistema sea lo óptimo posible en términos de confiabilidad, consumo energético y alcance del enlace.

El primer parámetro fundamental que rige el enlace de comunicación es la frecuencia de operación, según la ARCOTEL, el rango de frecuencias para Ecuador es de 915 MHz que pertenece a la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), es una banda libre de licencia, es decir que no requiere título habilitante. Esta frecuencia de operación es óptima ya que presenta menos atenuación ante la densidad de vegetación para integraciones en entornos rurales.

La potencia de transmisión viene a ser el siguiente parámetro para definir el enlace LoRa. Según la (ARCOTEL, 2018) este parámetro debe establecerse en un valor de +14 dBm, ya que al operar en la banda ISM esa es la potencia máxima permitida. El nivel de potencia establecido junto con la ganancia de las antenas permitirá un alcance de varios kilómetros en condiciones de vista total o parcial.

El tercer parámetro para establecer es el tipo de antena y la ganancia de estas, como se mencionó en la sección 3.4.1.3 los nodos integran la tecnología LoRa y un tipo específico de antena. En la hoja de datos de la placa de desarrollo se especifica que las antenas manejan una ganancia de 4 dBi tanto para los nodos sensores como para el Gateway, este parámetro prioriza la cobertura entre los diferentes elementos de la red garantizando la estabilidad del enlace inalámbrico.

Para terminar, se seleccionan los parámetros de modulación de la tecnología LoRa, estos son el SF (Spreading Factor) o Factor de Dispersión, este parámetro varía desde SF7 hasta SF12 lo que define el alcance de la señal y la velocidad de transmisión de datos. Y el BW (BandWidth) o Ancho de Banda se define en 125 KHz, esto provee una baja velocidad de datos ofertando una alta eficiencia energética. Mediante los valores anteriormente definidos, en la Tabla 23 se muestran los parámetros del enlace inalámbrico LoRa que se deberán configurar en las simulaciones y en la programación del sistema.

**Tabla 23**

*Parámetros del Enlace LoRa*

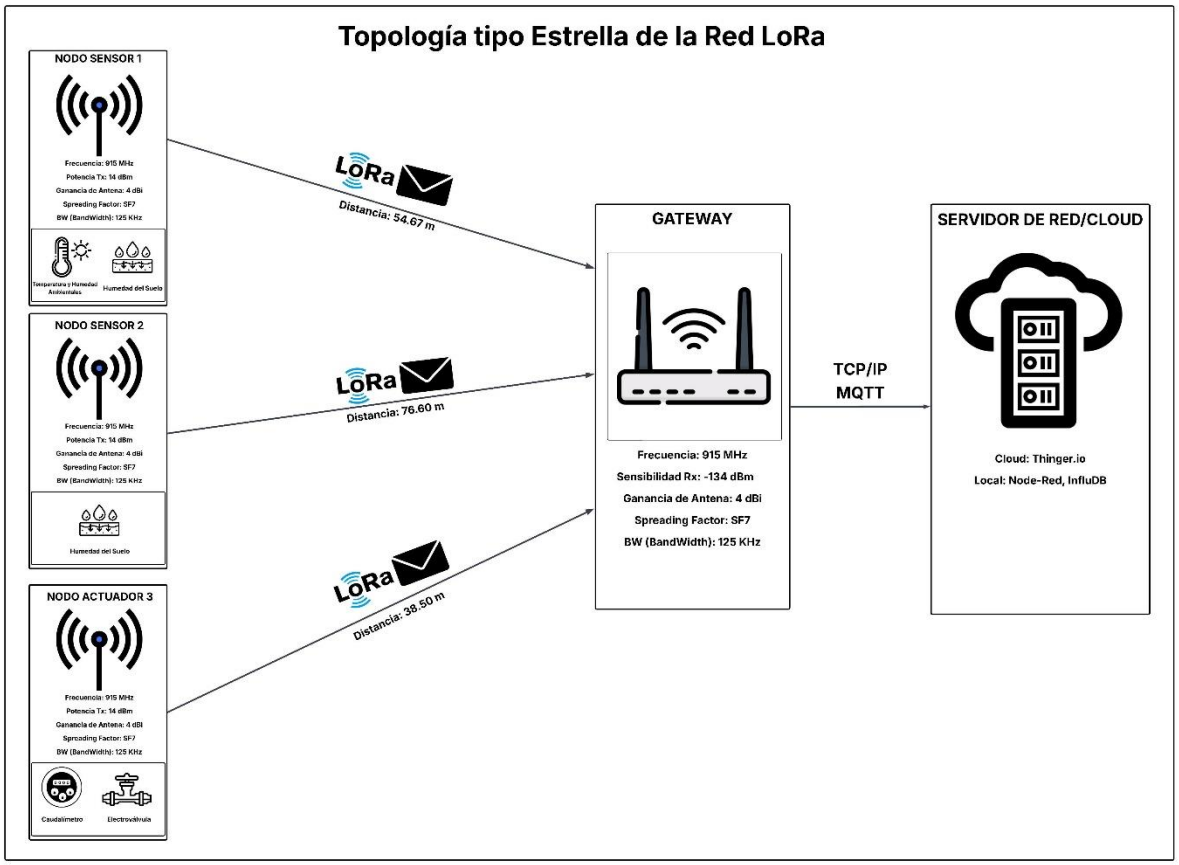
| **Parámetros del Enlace Inalámbrico LoRa** | |
|---|---|
| **Parámetro** | **Valor** |
| Frecuencia de Operación | 915 MHz |
| Potencia de Transmisión | 14 dBm |
| Potencia de Recepción | -134 dBm |
| Ganancia de Antenas | 4 dBi |
| SF (Spreading Factor) | SF7 |
| BW (BandWidth) | 125 KHz |

*Fuente:* Autoría

En base a la información de la Topología y de los Parámetros del Encale LoRa definidos en las secciones 3.5.1 y 3.5.2 respectivamente a continuación en la Figura 15 se presenta la topología tipo estrella que emplea la tecnología LoRa. En el esquema mostrado los nodos sensores y actuadores se comunican con el Gateway Central y este se encarga de enviar los datos a una plataforma en la Nube y a un servidor de Red Local mediante TCP/IP y MQTT respectivamente. La estructura definida garantiza la interoperabilidad entre los diferentes dispositivos de red definiendo un sistema estable y eficiente.

**Figura 15**

*Topología en Estrella de la Red LoRa*




Fuente: Autoría

### 3.5.3 Pérdidas en el Enlace Inalámbrico usando en Modelo de Propagación Okumura-Hata

La estimación de pérdidas del enlace LoRa es un punto esencial a la hora de diseñar la red inalámbrica esto permitirá tomar correcciones del enlace antes de la implementación real. La recomendación UIT-R P.1546-4 menciona que se hace uso del modelo empírico Okumura-Hata para predecir la atenuación en entornos suburbanos y rurales. El modelo de propagación mencionado determina la pérdida media de la señal en base a parámetros como la frecuencia de operación, distancias entre emisor/receptor y las alturas efectivas de las antenas. (UIT, 2009)

La expresión general del modelo Okumura-Hata se derivó de mediciones empíricas que fueron realizadas por Okumura posteriormente simplificada por Hata y se muestra en la ecuación (4)

$$L_{50}(dB) = 69.55 + 26.16\log f - 13.82\log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55\log(h_t)]\log(d) \quad (4)$$

*Nota:* Obtenido de (UIT-R P.1546-4, 2009)

Siendo:|

$L_{50} =$ Pérdida media de propagación (dB)

$f =$ Frecuencia de operación (MHz)

$h_t =$ Altura de la antena transmisora (m)

$h_r =$ Altura de la antena receptora (m)

$d =$ Distancia entre transmisor y receptor (km)

$a(h_r) =$ Factor de corrección de la altura de la antena receptora (dB)

De la ecuación (4) integra un parámetro esencial conocido como el Factor de corrección de la altura de la antena, que se adapta dependiendo de áreas suburbanas o rurales (entorno con vegetación o abierto) y según el modelo Okumura-Hata este parámetro ajusta la pérdida de

propagación dependiendo de la altura de la antena receptora, en este caso la altura de la antena del Gateway.

$$a(h_r) = (1.1\log(f) - 0.7)h_r - (1.56\log(f) - 0.8) \quad (5)$$

Nota: Obtenido de (UIT-R P.1546-4, 2009)

Donde:

$a(h_r) =$ Factor de corrección de la altura de la antena

$f =$ Frecuencia de Transmisión (MHz)

$h_r =$ Altura de la antena Transmisora (m)

En el estudio de la implementación del proyecto, el cálculo o estimación de las pérdidas por propagación del enlace LoRa se efectúa mediante el modelo Okumura-Hata por medio de sus expresiones presentadas anteriormente, sin embargo, el modelo en cuestión fue diseñado inicialmente para calcular pérdidas en zonas urbanas, no obstante, según la recomendación UIT-R P.1546-4 esta fórmula ha sido adaptada para entornos rurales con vegetación la cual se denota en la expresión (6).

$$L_0 = L_{50} - 4.78[\log(f)]^2 + 18.33\log(f) - 40.94 \quad (6)$$

*Nota*: Obtenido de (UIT-R P.1546-4, 2009)

La ecuación (6) permite calcular la pérdida de propagación en áreas rurales donde la señal se ve afectada por la topografía, vegetación y la distancia. Para realizar los cálculos de este modelo se tiene en cuenta los datos de los parámetros del enlace, además de las alturas de las antenas transmisoras y receptoras. A continuación, se procede a realizar los cálculos matemáticos de las pérdidas en cada enlace de la red propuesta y se presentan en la Tabla 24.

**Tabla 24**

*Cálculo de pérdidas con el modelo Okumura-Hata*

| Datos del Enlace | Cálculos con el Modelo Okumura - Hata |
|---|---|
| **Factor de corrección de la antena a($h_r$)** f: 915 MHz, $h_r$: 3 m | $a(h_r) = (1.1\log(915\ MHz) - 0.7)(3\ m) - (1.56\log(915\ MHz) - 0.8)$ $\boldsymbol{a(h_r) = 3.85\ m}$ |
| **Enlace Nodo 1** $f = 915\ MHz$ $h_t = 3\ m$ $h_r = 3.5\ m$ $d = 0.055\ km$ $a(h_r) = 3.85\ m$ | $L_{50}(dB) = 69.55 + 26.16\log(915\ MHz) - 13.82\log(3\ m) - 3.85m$ $+ [44.9 - 6.55\log(3.5\ m)]\log(0.055\ km)$ $L_{50}(dB) = 84.5\ dB$ $L_0 = L_{50} - 4.78[\log(f)]^2 + 18.33\log(f) - 40.94$ $L_0 = 83.58\ dB - 4.78[\log(915\ MHz)]^2 + 18.33\log(915) - 40.94$ $\boldsymbol{L_0 = 65.2\ dB}$ |
| **Enlace Nodo 2** $f = 915\ MHz$ $h_t = 3\ m$ $h_r = 3.5\ m$ $d = 0.077\ km$ $a(h_r) = 3.85\ m$ | $L_{50}(dB) = 69.55 + 26.16\log(915\ MHz) - 13.82\log(3.5\ m) - 3.85m$ $+ [44.9 - 6.55\log(3.5\ m)]\log(0.077\ km)$ $L_{50}(dB) = 96.83\ dB$ $L_0 = L_{50} - 4.78[\log(f)]^2 + 18.33\log(f) - 40.94$ $L_0 = 96.83\ dB - 4.78[\log(915\ MHz)]^2 + 18.33\log(915) - 40.94$ $\boldsymbol{L_0 = 72.03\ dB}$ |
| **Enlace Nodo 3** $f = 915\ MHz$ $h_t = 3\ m$ $h_r = 3\ m$ $d = 0.039\ km$ $a(h_r) = 3.85\ m$ | $L_{50}(dB) = 69.55 + 26.16\log(915\ MHz) - 13.82\log(3\ m) - 3.85m$ $+ [44.9 - 6.55\log(1\ m)]\log(0.039\ km)$ $L_{50}(dB) = 80.76\ dB$ $L_0 = L_{50} - 4.78[\log(f)]^2 + 18.33\log(f) - 40.94$ $L_0 = 80.76\ dB - 4.78[\log(915\ MHz)]^2 + 18.33\log(915) - 40.94$ $\boldsymbol{L_0 = 66.18\ dB}$ |

Fuente: Autoría

Los valores obtenidos de los cálculos usando el modelo Okumura-Hata se resumen en la Tabla 24, estos datos facilitan estimar cuantitativamente las pérdidas en el enlace inalámbrico LoRa en función de las bases o parámetros establecidos previamente como la frecuencia de operación, distancia de los Nodos hacia el Gateway y la altura de las antenas. Los resultados evidencian el modo en que la atenuación varía dependiendo de ciertas configuraciones operacionales del sistema permitiendo evaluar la calidad y viabilidad del enlace, determinando el umbral de señal disponible.

Del mismo modo, los valores calculados se emplean fundamentalmente para la siguiente etapa de Simulación del Enlace, constatando las predicciones teóricas con la simulación que se apega más a un escenario real para validar la capacidad del sistema en mantener la comunicación estable en la zona de despliegue prevista.

### 3.5.4. Simulación del Enlace Inalámbrico LoRa

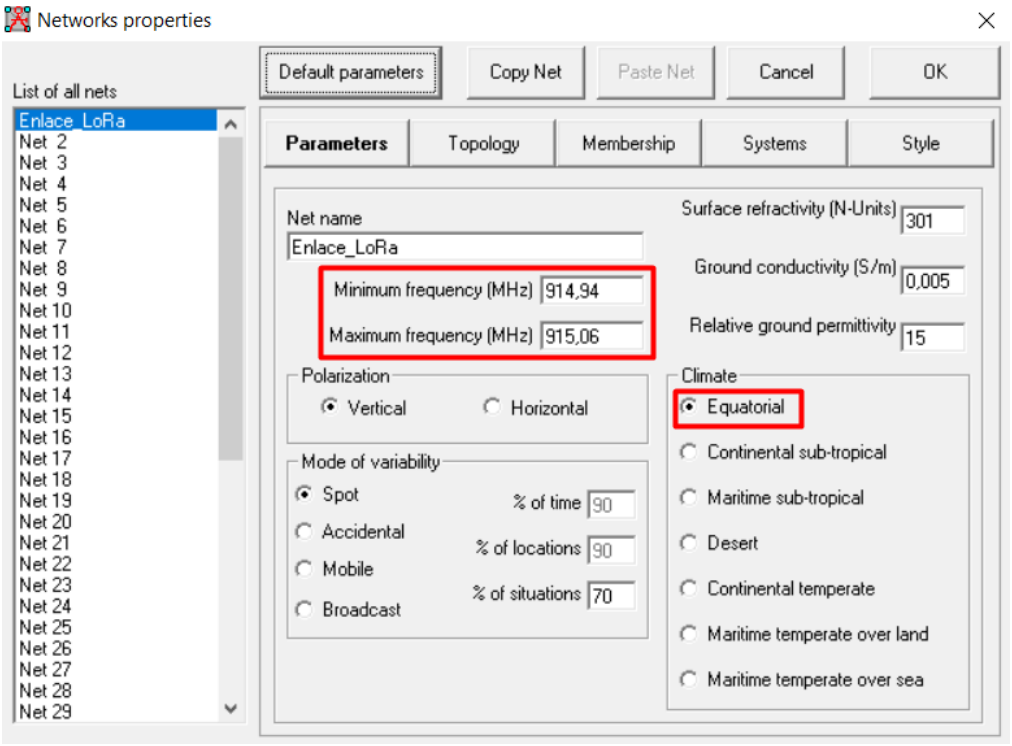
La simulación, en el diseño de redes, permite realizar el análisis de la cobertura y el desempeño de la red inalámbrica de largo alcance bajo ciertas condiciones. Con el objetivo de validar y complementar los resultados obtenidos en la sección 3.5.3, se procede a realizar las simulaciones de cobertura haciendo uso de Radio Mobile. En esta sección se integra la información real de campo, como las alturas relativas de las antenas, variaciones en la topografía y presencia de vegetación que son factores que influyen en la propagación de la señal que algunos modelos analíticos-empíricos no proporcionan. Lo que se busca con la simulación es evaluar de forma más precisa el rendimiento esperado de la red LoRa.

Configurar Radio Mobile para las simulaciones requiere del ingreso de parámetros específicos como la ubicación de los elementos de red, frecuencias de operación, topología, potencia de trasmisión, altura y ganancia de antenas, entre otros. Mediante los datos presentados en la Tabla 23 se configura las propiedades de red iniciales. Como se observa en la Figura 16, se definen las frecuencias mínima y máxima, teniendo como frecuencia central

915 MHz con ±62.5 kHz que denota el Bandwidth (BW) distribuido simétricamente alrededor de la frecuencia central de operación. Además del tipo de clima Ecuatorial simulando las condiciones climáticas del área de implementación del proyecto.

**Figura 16**

*Configuración de propiedades de Red iniciales en Radio Mobile*

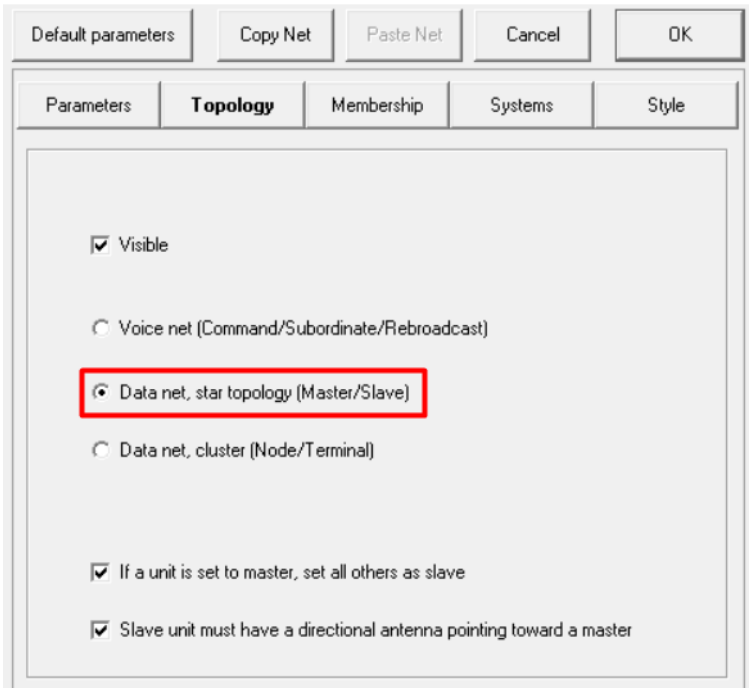



Fuente: Autoría

Posteriormente de haber definidos las propiedades iniciales del enlace, se establece la topología, el diseño del sistema demanda de una topología tipo estrella con una jerarquía Maestro-Esclavo, donde el Gateway toma el rol de Nodo Maestro y los Nodos Sensores y Actuador toman el rol de Esclavo simulando una red típicamente utilizada en el campo del IoT.

**Figura 17**

*Configuración de Topología*

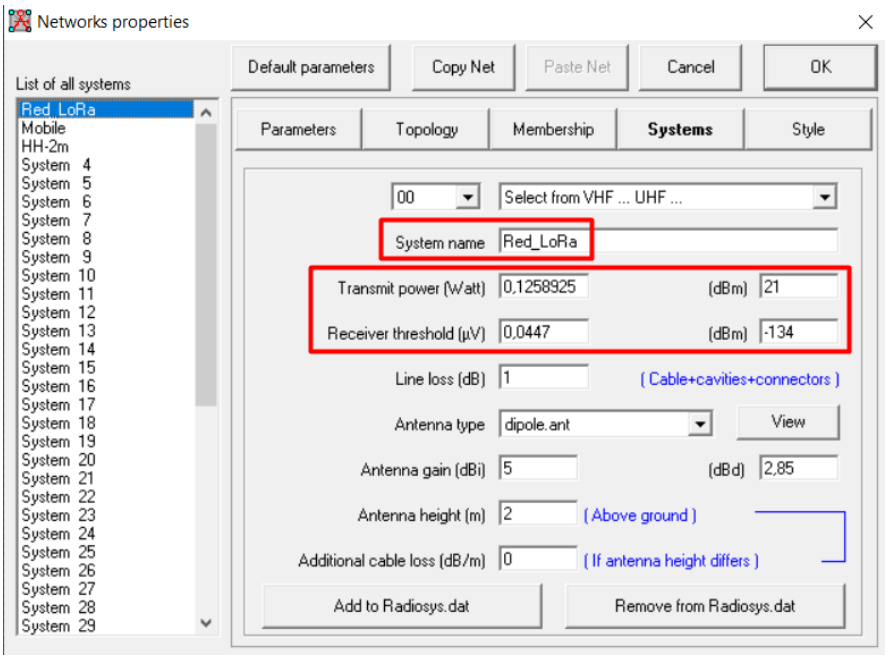



Fuente: Autoría

Para terminar la configuración de simulación de la red LoRa, se establecen los valores operacionales según el fabricante de las placas de desarrollo Heltec ESP32 LoRa V3. La potencia de transmisión se establece un valor de 21 dBm, en tanto que el umbral de recepción es de -134 dBm, el tipo de antena es la conocida como Rubber Duck que es básicamente un dipolo que según el fabricante provee una ganancia de 5 dBi. Para garantizar la comunicación entre Gateway y Nodos la altura base del sistema es de 3 metros, todos estos parámetros configurados se observan en la Figura 16.

**Figura 18**

*Configuración de parámetros del fabricante Heltec*




Fuente: Autoría

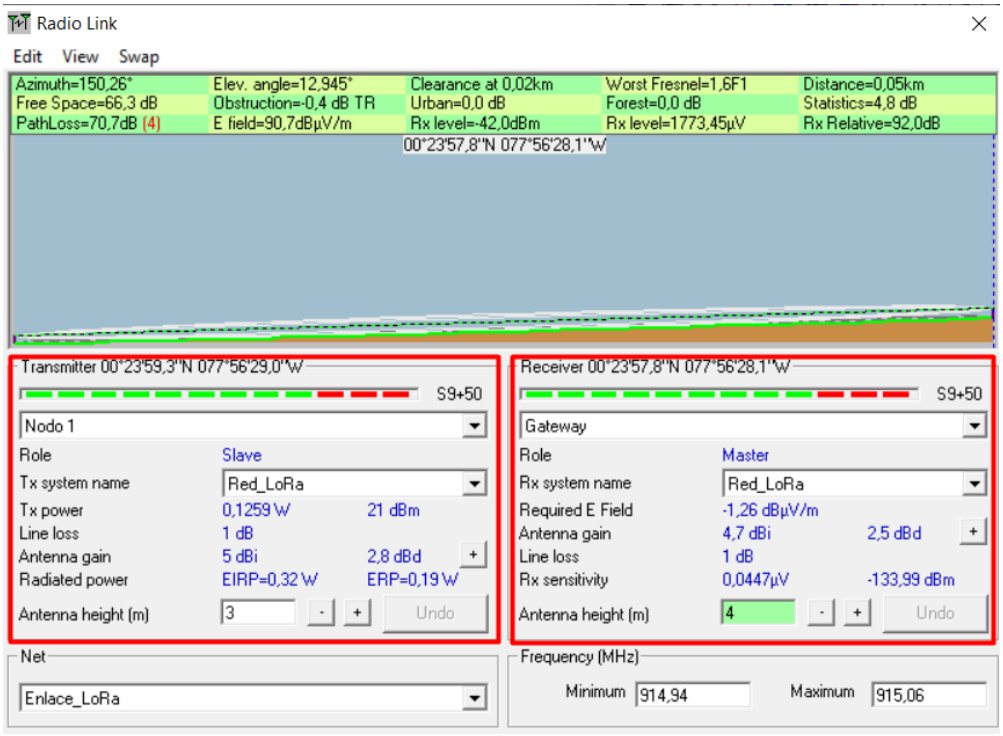
Al integrar los parámetros con el entorno real y con las características de los dispositivos usados en el sistema, se permite generar resultados más consistentes y hacer una comparación con los cálculos teóricos realizados previamente como se muestra en las subsecciones siguientes. Este recurso es esencial para contribuir al análisis puntual de la viabilidad técnica del proyecto y tomar decisiones correctivas previo a su implementación real en el área.

#### 3.5.4.1. Enlace Nodo 1 – Gateway

Como se muestra en la Figura 19, el enlace entre el Nodo 1 y el Gateway posee línea de vista normal sin obstrucciones que no representan mayor problema para la comunicación, mediante la ecuación (6), el valor de pérdida teórico calculado mediante el modelo Okumura-Hata establece un valor de 65.2 dB y el valor de pérdida de simulación es de 70.7 dB, teniendo una diferencia de 5.5 dB el cual no es un valor crítico que afecte la eficiencia del enlace, por lo tanto, se concluye que este enlace es viable mediante la simulación.

**Figura 19**

*Simulación del Enlace Inalámbrico Nodo 1 - Gateway*



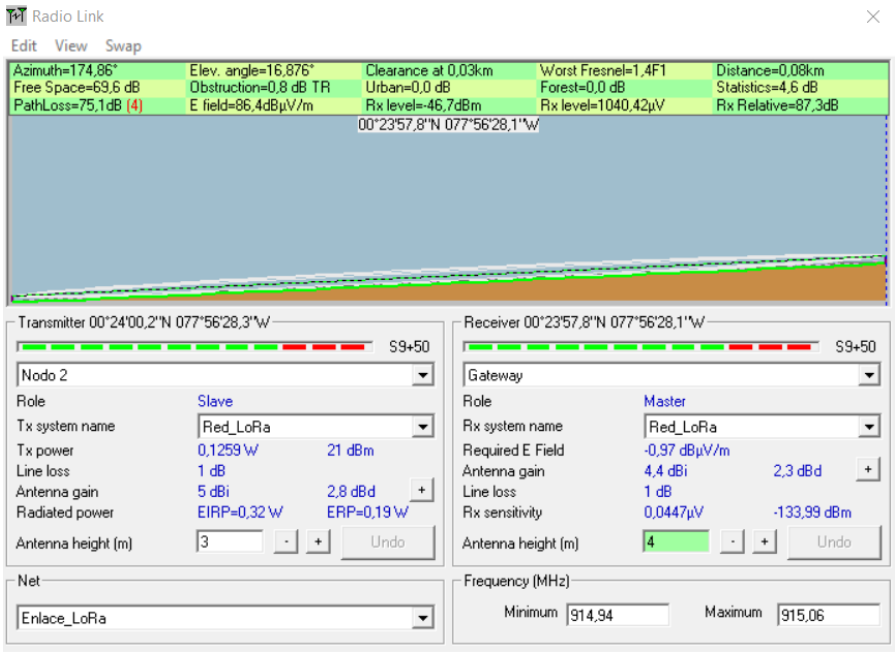

Fuente: Autoría

### 3.5.4.2. Enlace Nodo 2 – Gateway

El Nodo 2, ubicado a 0.08 km de distancia del Gateway establece un valor de pérdida teórico de 72.03 dB y el valor de simulación en Radio Mobile toma un valor de 75.1 dB la variación que se presenta es de 3.07 dB esto demuestra que el enlace del Nodo 2 es muy favorable, el nivel de señal recibido en el Gateway es de -46.7 dBm lo que deja un margen de enlace de 87 dB, este margen de enlace deja una reserva suficiente de potencia frente al ruido y el desvanecimiento de la señal.

**Figura 20**

*Simulación del Enlace Inalámbrico Nodo 2 - Gateway*



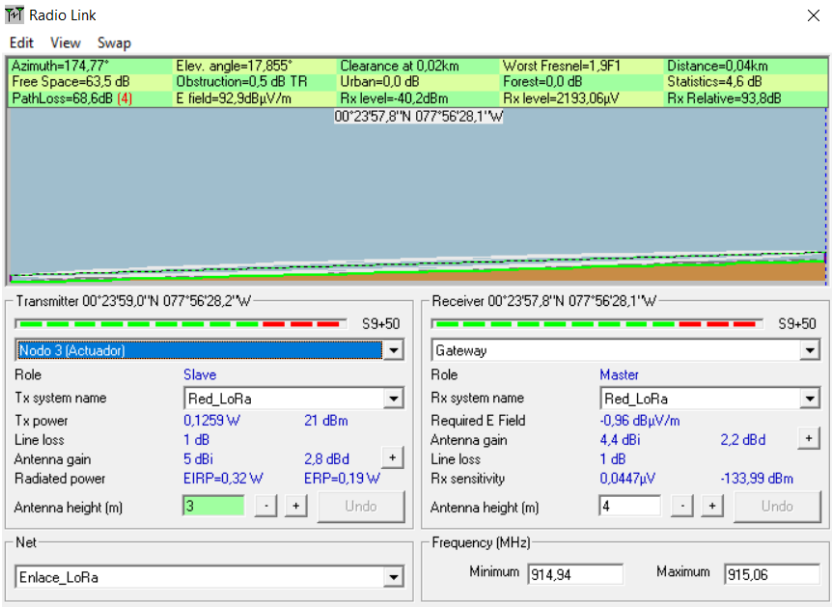

Fuente: Autoría

### 3.5.4.3. Enlace Nodo 3 – Gateway

El enlace inalámbrico perteneciente al Nodo 3 presenta condiciones altamente favorables para la comunicación LoRa, al tener una distancia muy corta de 0,04 km y presentar una línea de vista completamente despejada. El modelo simulado calcula una pérdida total de 68,6 dB, en comparación con el modelo teórico su valor es de 66.18 dB, presentando una diferencia de sólo 2.42 dB. Conjuntamente, estos parámetros dan paso a establecer que el enlace del Nodo 3 es viable dentro de la red LoRa simulada.

**Figura 21**

*Simulación del Enlace Inalámbrico Nodo 3 - Gateway*




Fuente: Autoría

Es necesario realizar la representación geoespacial de los enlaces inalámbricos generados en Radio Mobile mediante la exportación a Google Earth, esto permite valorar el comportamiento de la red LoRa en el área física de implementación. La proyección que incorpora elementos del terreno y la distribución espacial de los nodos ofrece una apreciación precisa y detallada de las trayectorias de propagación de los enlaces.

Las líneas de conexión de los nodos mostradas en la Figura 22 que se enlazan con el Gateway indican las posibles trayectorias del enlace y ayudan a verificar la línea de vista existente, además de identificar áreas donde las edificaciones, obstáculos naturales o la vegetación podrían afectar la trayectoria de la señal de comunicación.

**Figura 22**

*Topología Simulada en Google Earth*




Fuente: Adaptado de Google Earth (2020)

### 3.5.5. Validación del espectro de la tecnología de comunicación LoRa

Como parte de la validación experimental de los parámetros que componen el enlace inalámbrico de radio frecuencia se usa un analizador de espectro con el fin de comprobar y garantizar la integridad de la capa física. Como ya se ha mencionado, se están usando los microcontroladores Heltec ESP32 LoRa V3 con los parámetros señalados en la Tabla 23. Este análisis se lo realizó con el equipo Keysight N9322C Spectrum Analyzer que posee un rango de frecuencia de 9 KHz hasta los 7 GHz permitiendo validar la frecuencia, ancho de banda y potencia de la transmisión.

Para observar y comprobar las portadoras de la señal de radiofrecuencia LoRa se debe establecer un intervalo de frecuencias en el rango de los 915 MHz, por lo que las configuraciones ingresadas en el analizador de espectro se muestran en la Tabla 25.

**Tabla 25**

*Valores de Frecuencia ingresados en el analizador de espectro Keysight N9322C*

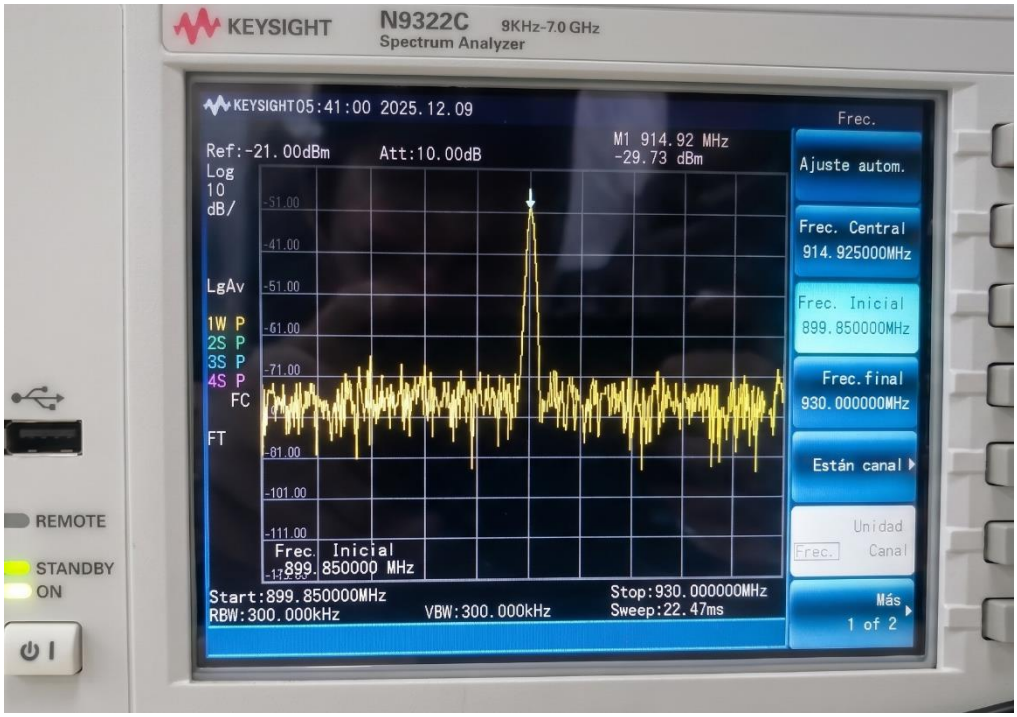
| Frecuencia | Valor |
|---|---|
| Inicial | 899.9 MHz |
| Central | 914.93 MHz |
| Final | 930 MHz |

Fuente: Autoría

En la Figura 23 se observa el espectro analizado, obteniendo la portadora de la frecuencia LoRa con una frecuencia central de 914.92 MHz y una potencia de -29.7 dBm, valor óptimo para la recepción de los paquetes.

**Figura 23**

*Espectro de la comunicación inalámbrica LoRa*




Fuente: Autoría

### 3.6. Diseño del Sistema con Lógica Difusa

La lógica difusa emplea mecanismos eficaces que modelan sistemas basados en variables y magnitudes no lineales que son de difícil interpretación para los modelos matemáticos convencionales. El presente trabajo de grado emplea la lógica difusa mediante un sistema de interferencia difusa Mamdani, por su amplia aceptación en la toma de decisiones y aplicaciones de control que requieren precisión al momento de ser activados. Este sistema incluye el conocimiento experto en función de las reglas o variables lingüísticas definidas.

El sistema difuso está dirigido a la gestión del sistema de regadío, esto permite asociar las variables físicas ambientales específicas con acciones directas a los debidos procesos. En esta sección se describe la construcción del sistema difuso mismo que abarca el establecimiento de las variables lingüísticas, los conjuntos difusos, reglas de inferencia y la defuzzificación, lo que sirve como base fundamental para la posterior implementación en la arquitectura del sistema IoT.

#### 3.6.1 Definición del Universo de Discurso y variables lingüísticas

El universo de discurso se define mediante los posibles valores numéricos que puede adoptar cada variable del sistema difuso. En este sistema en específico se definen tres variables de entrada y una variable de salida, los universos de discurso de cada una de las variables se establecieron acorde a las condiciones ambientales de la zona, las especificaciones de los sensores además de los requerimientos operativos del sistema. En la Tabla 26, se presentan las variables y su respectivo universo de discurso.

**Tabla 26**

*Universo de Discurso*

| Variable | Tipo | Universo de discurso | Magnitud |
|---|---|---|---|
| Temperatura ambiente | Entrada | $U_T = [0,45]$ | °C |
| Humedad ambiente | Entrada | $U_{HA} = [0,100]$ | % |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Humedad del suelo | Entrada | $U_{HS} = [0,100]$ | % |
| Tiempo de riego | Salida | $U_{TR} = [0,3600]$ | seg |

Fuente: Autoría

### 3.6.2 Distribución Borrosa

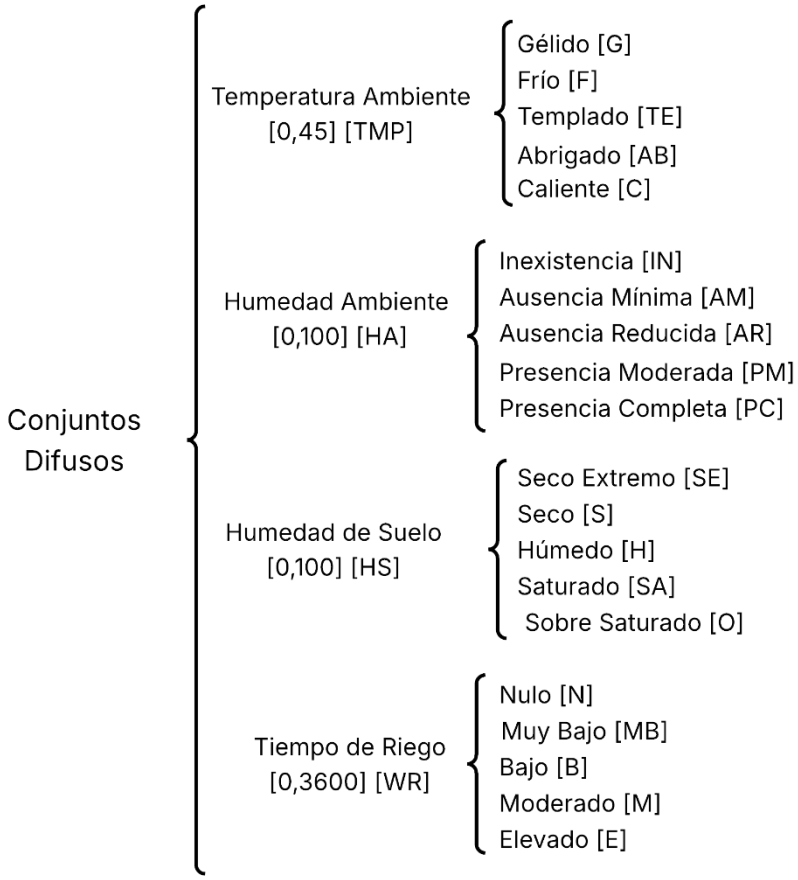
Esta sección establece la división o partición cualitativa del universo de discurso de cada variable involucrada en el sistema difuso. Aquí cada variable se particiona en conjuntos lingüísticos los mismos que representan los diferentes estados del sistema. La particularidad de la distribución borrosa es que la división es gradual, es decir que las transiciones entre estados son suaves lo que se asemeja al comportamiento de las variables ambientales y de control involucradas en el proceso de regadío.

Cabe resaltar que el establecimiento de estos rangos también se basa en las recomendaciones del experto en cuestión y se posibilita la asociación de términos lingüísticos con los rangos de las magnitudes físicas como se muestra en la Figura24, esta definición resulta fundamentalmente relevante en sistemas de control donde las condiciones ambientales están sujetas a fluctuaciones constantes.

Para el sistema desarrollado, esta sección se definió en base a criterios técnicos y operativos, estableciendo un equilibrio entre el modelo y la capacidad de inferencia del sistema para que pueda tomar decisiones en la sección del riego en función de las condiciones del entorno.

**Figura 24**

*Distribución Borrosa para el sistema IoT*




Fuente: Autoría

### 3.6.3 Funciones de Pertenencia o Membrecía

Estas funciones permiten caracterizar de manera cuantitativa el rango de un valor en específico de determinada variable en cualquier conjunto difuso ya determinado, estableciendo relación entre los valores numéricos definidos en el universo de discurso y la representación lingüística. Establecer una transición gradual entre los estados definidos en las funciones borrosas, evita que la toma de decisiones del sistema sea abrupta y mantenga una lógica correcta. Se debe considerar que el sistema se lo modeló tomando en cuenta la naturaleza continua de las variables ambientales en relación con las restricciones de operación del sistema de riego en base a formas simplificadas y computacionalmente convenientes y eficientes.

La Tabla 27 mostrada a continuación establece las funciones de pertenencia de cada conjunto difuso y sus subconjuntos respectivos estas pueden ser trapezoidales (trap) o triangulares (tri) estas dependen de las variables ambientales y sus rangos, en el caso de las funciones triangulares se emplean para estados con un valor característico definido, en tanto que las funciones trapezoidales se usan para rangos de valores operativos estables.

**Tabla 27**

*Funciones de pertenencia del Sistema Difuso*

| **Temperatura (°C) [0–45]** | | |
|---|---|---|
| **Variable Lingüística** | **Tipo** | **Parámetros** |
| Gélido [G] | trap | [0 0 5 10] |
| Frío [F] | tri | [5 10 15] |
| Templado [TE] | tri | [12 18 24] |
| Abrigado [AB] | tri | [20 26 32] |
| Caliente [C] | trap | [28 33 45 45] |
| **Humedad Ambiente (%) [0–100]** | | |
| Inexistencia [IN] | trap | [0 0 5 10] |
| Ausencia Mínima [AM] | tri | [5 15 25] |
| Ausencia Reducida [AR] | tri | [20 35 50] |
| Presencia Moderada [PM] | tri | [45 60 75] |
| Presencia Completa [PC] | trap | [70 85 100 100] |
| **Humedad del Suelo (%) [0–100]** | | |
| Seco Extremo [SE] | trap | [0 0 10 25] |
| Seco [S] | tri | [25 35 50] |
| Húmedo [H] | tri | [45 60 75] |
| Saturado [SA] | tri | [70 82 92] |
| Sobre Saturado [O] | trap | [85 92 100 100] |

| Tiempo de Riego (s) [0–3600] | | |
|---|---|---|
| Nulo [N] | trap | [0 0 10 30] |
| Muy Bajo [MB] | tri | [20 60 120] |
| Bajo [B] | tri | [90 180 300] |
| Moderado [M] | tri | [240 600 1200] |
| Elevado [E] | trap | [900 1800 3600 3600] |

Fuente: Autoría

Las expresiones matemáticas de las funciones de pertenencia no se presentan de forma implícita en esta sección con el fin de llevar una exposición clara y fluida en el desarrollo de diseño de la lógica difusa. Las funciones trapezoidales se emplearon en los extremos del universo de discurso con el fin de definir regiones estables, mientras que las funciones triangulares se utilizaron para los estados intermedios, permitiendo una transición gradual y continua entre los distintos conjuntos difusos de cada variable del sistema difuso.

### 3.6.4 Funciones de Pertenencia en Fuzzy Logic Designer

Una vez que se han definido el tipo de funciones de pertenencia se realiza la implementación en el entorno de Fuzzy Logic Designer de Matlab. La función general de esta herramienta es crear el sistema difuso, relacionando las variables de entrada por medio de la inferencia difusa Mamdani con la variable de salida mediante parametrización y representaciones gráficas generadas a posteriori, es decir que se examinan las características de las funciones que se asocian a cada variable lingüística del sistema difuso geométrica y paramétricamente, tomando en cuenta los rangos definidos y la interpretación física.

Esta metodología permite fijar formalmente la correspondencia entre el fenómeno modelado y la representación difusa, lo que constituye un elemento esencial en la validación del mecanismo de inferencia difusa desarrollada para el sistema.

#### 3.6.4.1 Función Temperatura (TMP)

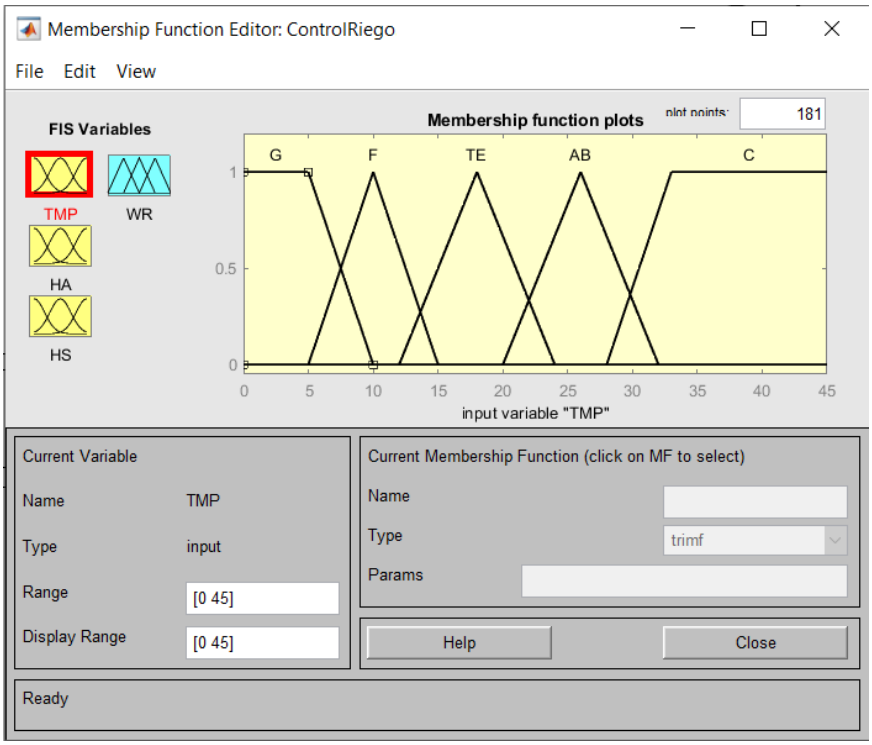
En el Toolbox de Matlab, Fuzzy Logic Designer antes mencionado, se crea la variable de entrada nombrada “TMP” que se define en un rango continuo de 0 a 45, esto representa el rango de temperatura o y en términos de lógica difusa, el universo de discurso. Esta función se caracteriza por cinco variables lingüísticas; Gélido (G), Frío (F), Templado (TE), Abrigado (AB) y Caliente (C).

Mediante una reunión técnica con el experto se definió los parámetros adecuados considerados para las funciones de pertenencia trapezoidales es decir los valores para Gélido (G) y Caliente (C) respectivamente se definieron con los valores [0 0 5 10] y [28 33 45 45], esta elección de función es por la naturaleza de extremos del dominio, ya que las temperaturas muy altas o bajas poseen un grado de pertenencia constante en un intervalo. Por otra parte, las funciones Frío (F), Templado (TE) y Abrigado (AB) que son conjuntos intermedios obedecen a funciones triangulares lo que permite una transición más exacta alrededor de valores centrales o llamados picos, estos parámetros corresponden a [5 10 15], [12 18 24] y [20 26 32] respectivamente.

Como se puede apreciar en la Figura 25, el solapamiento es controlado entre las funciones de pertenencia adyacentes, este solapamiento garantiza cambios “suaves” entre las variables lingüísticas eludiendo cambios abruptos en la interferencia difusa. Este diseño es vital para asegurar la continuidad del sistema difuso diseñado, mejorando la robustez en comparación con las variaciones mínimas de valores de entrada permitiendo que las múltiples reglas actúen de forma proporcional y parcial durante la inferencia.

**Figura 25**

*Funciones de pertenencia de la Temperatura Ambiente [TMP] en Fuzzy Logic Designer*




Fuente: Autoría

### 3.6.4.2 Función Humedad Ambiente (HA)

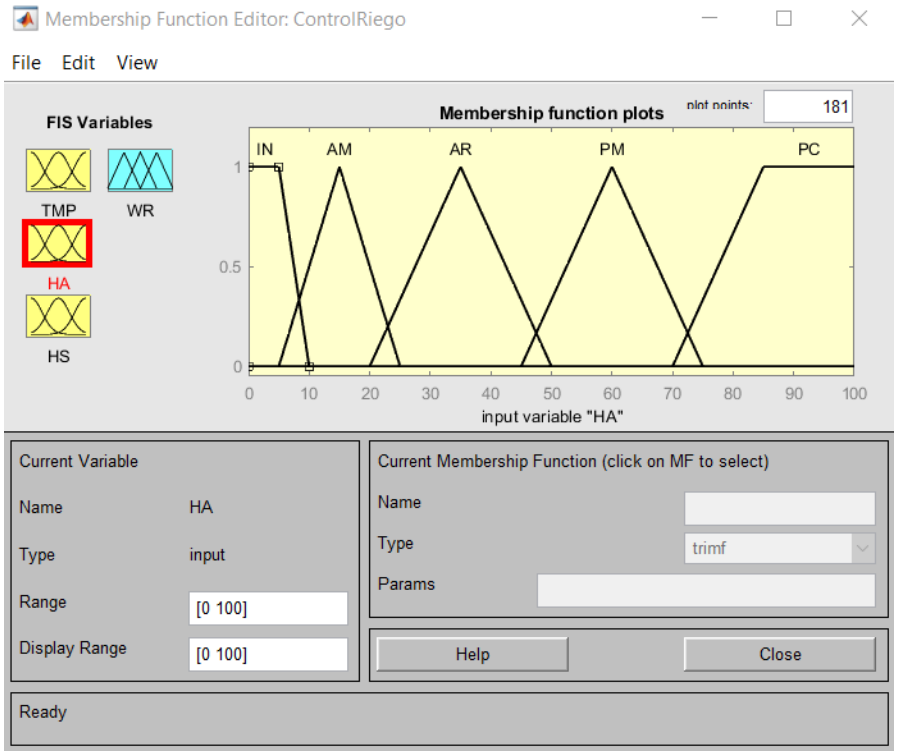
Para esta función el modelado difuso de la variable de entrada se encuentra en el rango de 0 a 100 %. Esta variable lingüística posee cinco subconjuntos difusos como se puede constatar en la Tabla 27, esto conjuntos describen de manera gradual los distintos estados de la humedad ambiental. Para definir los rangos de cada subconjunto, al igual que la Temperatura, se realizó en base a las recomendaciones del experto en cuestión.

La Figura 26 muestra los subconjuntos respectivos ingresados en el Toolbox de Matlab, el subconjunto inicial llamado Inexistencia (IN) toma un rango de valores de 0 a 10 % y una función trapezoidal, el siguiente subconjunto Ausencia Mínima (AM) es una función trapezoidal y toma valores desde 5 a 25 %, continuando con los subconjuntos, el siguiente es Ausencia Reducida (AR) de carácter trapezoidal con valores desde 20 al 50 %, antecediendo a este subconjunto se encuentra el subconjunto llamado (PM) o Presencia Mínima adquiriendo

valores desde el 45 al 75 % y finalmente se establece el subconjunto Presencia Completa (PC) de carácter trapezoidal y toma valores en el rango de 70 a 100 %.

**Figura 26**

*Funciones de pertenencia de la Humedad Ambiente (HA) en Fuzzy Logic Designer*




Fuente: Autoría

### 3.6.4.3 Función Humedad del Suelo (HS)

Esta variable lingüística está modelada en un universo de discurso mismo que se define en el intervalo [0,100] en donde se discretiza cinco subconjuntos difusos los que combinan funciones trapezoidales y triangulares. En el caso de las funciones trapezoidales, sólo para los extremos son Seco Extremo (SE) y Sobre Saturado (O), esto garantiza una saturación de esta función de pertenencia en los intervalos [0, 10] y [92, 100] respectivamente.

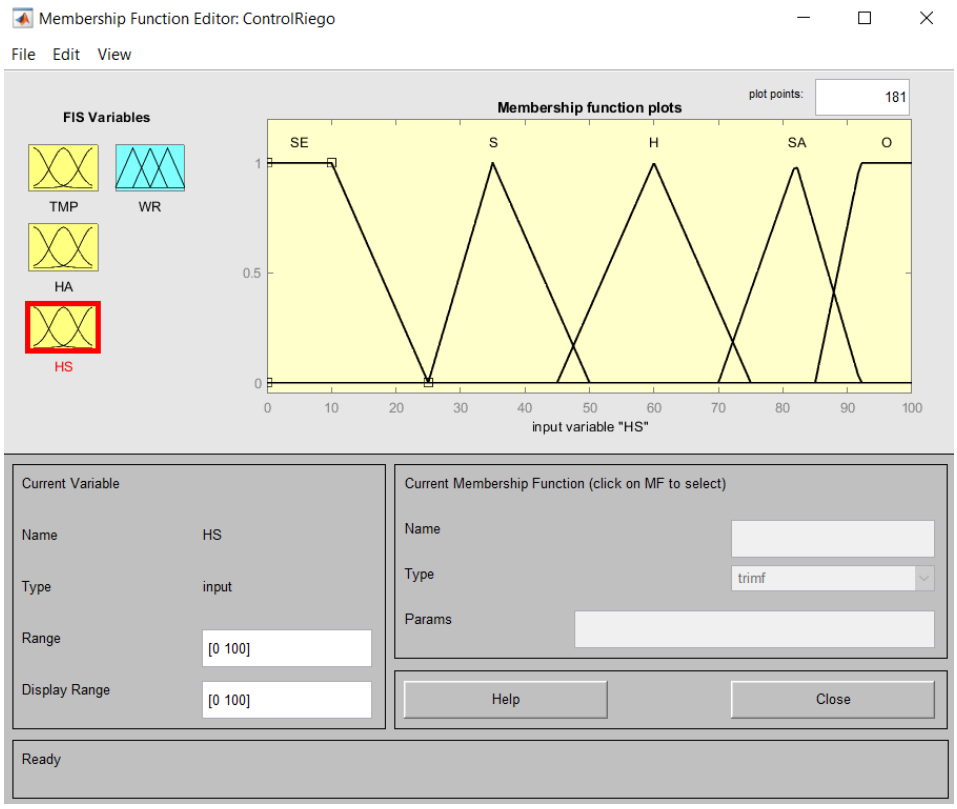
Por otra parte, los subconjuntos intermedios usan funciones triangulares centradas en valores específicos de esta magnitud, estos son 35 para Seco (S), 60 para Húmedo (H) y 82 para Saturado (SA). El diseño integra el solapamiento que es estratégico para los conjuntos

adyacentes como ya se ha mencionado anteriormente. Por ejemplo, la intersección entre húmedo (H) y Saturado (SA) en el intervalo [70, 75] garantiza que, coexistan los grados de pertenencia de estos dos subconjuntos difusos al mismo tiempo en base al valor de entrada en dicho rango.

De este modo el controlador difuso reduce errores en la cuantificación y provee una alta capacidad en generalizar las incertidumbres y el posible ruido propio de los sensores de humedad del suelo.

**Figura 27**

*Funciones de pertenencia de la Humedad del Suelo (HS) en Fuzzy Logic Designer*




Fuente Autoría

Hasta este punto se han descrito las funciones de pertenencia de las variables de entrada con sus respectivos subconjuntos y tipos de funciones, por último, se describe la variable de salida que es la que materializa el control del sistema en sí. En este escenario corresponde al

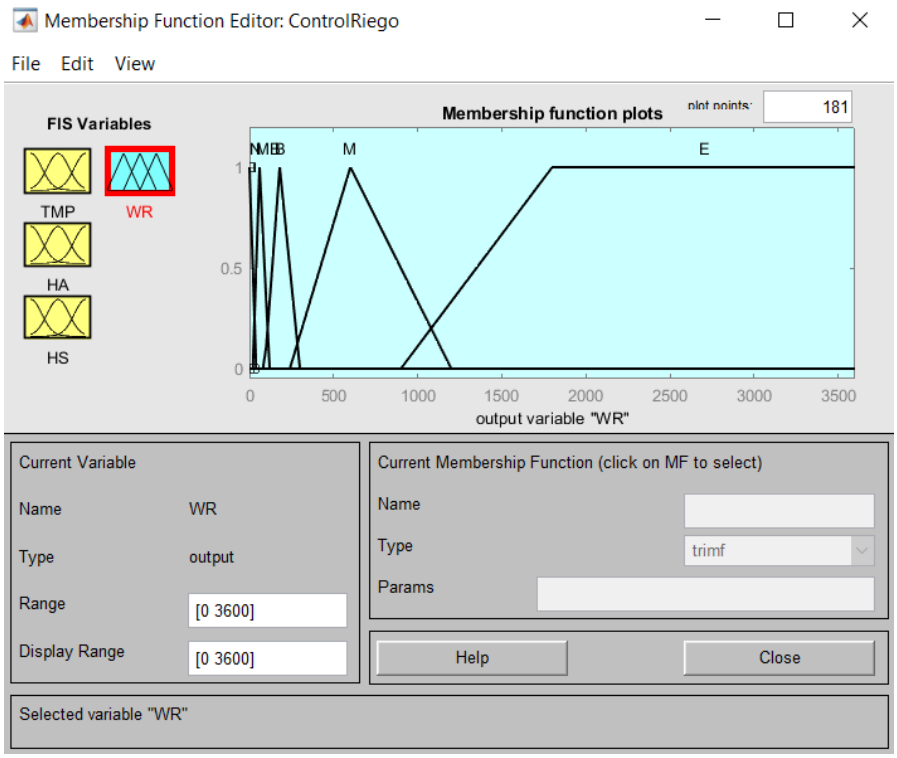
tiempo de riego que es el parámetro que se encarga de traducir el proceso de inferencia difusa a una regla de cuantificación que se aplica al proceso de riego.

### 3.6.4. Función Tiempo de Riego (WR)

Esta variable lingüística define un intervalo de 0 a 3600 segundos representando el universo de discurso, además posee cinco subconjuntos difusos visualizados en la Figura 28.

**Figura 28**

*Funciones de pertenencia del Tiempo de Riego (WR) en Fuzzy Logic Designer*




Fuente: Autoría

El subconjunto Nulo (N) toma una función trapezoidal para su implementación en el sistema con un intervalo que va desde 0 hasta 30 segundos con parámetros [0 0 10 30] esto permite definir situaciones en las que no se requiere del riego y es despreciable. El otro extremo se representa por el subconjunto Elevado (E) con función trapezoidal tomando los valores que van desde los 900 hasta los 3600 segundos estableciendo el intervalo [900 1800 3600 3600] lo que se representa tiempos prolongados de riego. Los conjuntos intermedios corresponden a los

subconjuntos Muy Bajo (MB), Bajo (B) y Moderado (M) adoptando intervalos de 20 a 60 segundos para el primer subconjunto, 90 a 300 segundos para el segundo subconjunto y 240 a 1200 segundos para el tercer subconjunto, parametrizando respectivamente en [20 60 120], [90 180 300] y [240 600 1200], estos parámetros son los que se ingresa en el Fuzzy Logic Designer de Matlab.

### 3.6.5 Reglas Borrosas

Las reglas borrosas rigen el comportamiento del sistema en términos de la inferencia difusa. Estas reglas se obtuvieron de la combinación semántica de las variables de entrada y salida en su formato lingüístico, tomando en cuenta sus respectivas funciones de pertenencia, las reglas son generadas haciendo uso del Fuzzy Logic Designer de Matlab.

El modelo de interferencia difusa que se utiliza como ya se ha venido mencionando es el Mamdani, este se fundamenta básicamente en estructuras de decisión (if-then) si-entonces además del razonamiento del experto en definir las decisiones para el sistema de riego. De esta forma, las reglas borrosas definidas describen y relacionan de forma coherente entre entrada-salida del sistema, lo que representa la constitución del núcleo de la fase de interferencia difusa.

En la Tabla 28 se observan las 45 reglas borrosas que se obtuvieron en el desarrollo del sistema difuso, estas reglas representan los escenarios en que el sistema decide en activarse o permanecer en espera.

**Tabla 28**

*Base de reglas del sistema de inferencia difusa (Modelo de Mamdani)*

| N° | Regla Difusa |
|---|---|
| 1 | If (TMP is G) and (HA is IN) and (HS is SE) then (WR is E) |
| 2 | If (TMP is F) and (HA is AR) and (HS is SE) then (WR is E) |
| 3 | If (TMP is TE) and (HA is PM) and (HS is SE) then (WR is E) |
| 4 | If (TMP is AB) and (HA is AR) and (HS is SE) then (WR is E) |

5 If (TMP is C) and (HA is IN) and (HS is SE) then (WR is E)

6 If (TMP is G) and (HA is PM) and (HS is S) then (WR is B)

7 If (TMP is F) and (HA is AR) and (HS is S) then (WR is B)

8 If (TMP is TE) and (HA is PM) and (HS is S) then (WR is M)

9 If (TMP is AB) and (HA is AM) and (HS is S) then (WR is M)

10 If (TMP is C) and (HA is IN) and (HS is S) then (WR is E)

11 If (TMP is G) and (HA is PC) and (HS is H) then (WR is N)

12 If (TMP is F) and (HA is PM) and (HS is H) then (WR is MB)

13 If (TMP is TE) and (HA is PM) and (HS is H) then (WR is MB)

14 If (TMP is AB) and (HA is AR) and (HS is H) then (WR is B)

15 If (TMP is C) and (HA is IN) and (HS is H) then (WR is B)

16 If (TMP is G) and (HA is PC) and (HS is SA) then (WR is N)

17 If (TMP is F) and (HA is PM) and (HS is SA) then (WR is N)

18 If (TMP is TE) and (HA is AR) and (HS is SA) then (WR is N)

19 If (TMP is AB) and (HA is AR) and (HS is SA) then (WR is MB)

20 If (TMP is C) and (HA is IN) and (HS is SA) then (WR is MB)

21 If (TMP is G) and (HA is PC) and (HS is O) then (WR is N)

22 If (TMP is F) and (HA is PM) and (HS is O) then (WR is N)

23 If (TMP is TE) and (HA is PM) and (HS is O) then (WR is N)

24 If (TMP is AB) and (HA is AR) and (HS is O) then (WR is N)

25 If (TMP is C) and (HA is IN) and (HS is O) then (WR is N)

26 If (TMP is TE) and (HA is AR) and (HS is S) then (WR is M)

27 If (TMP is TE) and (HA is AR) and (HS is H) then (WR is B)

28 If (TMP is AB) and (HA is PM) and (HS is S) then (WR is M)

29 If (TMP is AB) and (HA is PM) and (HS is H) then (WR is B)

30 If (TMP is F) and (HA is PM) and (HS is S) then (WR is MB)

31 If (TMP is C) and (HA is AR) and (HS is S) then (WR is E)

32 If (TMP is TE) and (HA is AM) and (HS is S) then (WR is M)

33 If (TMP is AB) and (HA is AM) and (HS is H) then (WR is B)

34 If (TMP is F) and (HA is AM) and (HS is SE) then (WR is E)

35 If (TMP is G) and (HA is AR) and (HS is SE) then (WR is E)

36 If (TMP is F) and (HA is PC) and (HS is S) then (WR is MB)

37 If (TMP is TE) and (HA is PC) and (HS is S) then (WR is MB)

38 If (TMP is AB) and (HA is PC) and (HS is S) then (WR is B)

39 If (TMP is AB) and (HA is IN) and (HS is H) then (WR is B)

40 If (TMP is TE) and (HA is AM) and (HS is SE) then (WR is E)

41 If (TMP is AB) and (HA is IN) and (HS is SE) then (WR is E)

42 If (TMP is AB) and (HA is IN) and (HS is SA) then (WR is N)

43 If (TMP is TE) and (HA is AM) and (HS is SA) then (WR is N)

44 If (TMP is TE) and (HA is IN) and (HS is SE) then (WR is E)

45 If (TMP is AB) and (HA is AM) and (HS is S) then (WR is E)

Fuente: Autoría

Es pertinente indicar que las reglas aquí mostradas abarcan los escenarios contemplados para las variables climáticas y la respectiva salida difusa con el tiempo de irrigación, adaptadas al escenario climático y requerimientos del cultivo de aguacate “Fuerte”.

La implementación de estas reglas proveerá al sistema una base sólida de conocimiento para la toma de decisiones oportunas en el control de humedad del suelo, permitiendo validar el enfoque técnico adaptado a los requerimientos planteados.

### 3.6.6 Proceso de Inferencia Difusa (Mamdani)

Este proceso representa el núcleo del sistema diseñado, aquí se convierten los datos obtenidos por los sensores en decisiones lógicas que se basan en las reglas difusas o el razonamiento de la lógica difusa. Para este trabajo de grado, los valores de los sensores mencionados se envían a Node-RED, que es el encargado de procesar la inferencia de tipo Mamdani diseñada anteriormente en el Fuzzy Logic Designer de Matlab.

Inicialmente los valores numéricos reales de los sensores se transforman en grados de pertenencia mismos que se asocian a los conjuntos difusos anteriormente definidos.

Como paso final de la inferencia, estos grados de pertenencia se comparan con la base de datos de las reglas difusas definidas para el sistema. Cada regla se evalúa empleando el operador min (mínimo) para las conjunciones lógicas de tipo (AND) acorde al modelo desarrollado por Mamdani. Como resultado de esta valoración el nivel de activación de cada regla se determina y se aplica en el conjunto difuso de salida dando como respuesta el tiempo de activación del Nodo Actuador.

### 3.6.7 Agregación

La etapa de Agregación es básicamente combinar las salidas parciales que se generan por cada regla (de ser el caso) en una sola función de pertenencia para la salida. Este proceso de utiliza el operador (max) máximo, este operador superpone las funciones de pertenencia resultantes obtenidas de cada regla y se conserva el mayor grado de pertenencia. Como resultado de este proceso se obtienen una función en donde se integran el conjunto de las reglas de activación en ese caso y teniendo una salida global del sistema ante los parámetros sensados.

La Agregación establece que en la salida no solo predomine una única regla sino de la combinación de las reglas tomadas en ese caso.

### 3.6.8 Desfusificación

Es la fase final del sistema difuso y tiene como objetivo convertir la salida difusa agregada en un valor real numérico el mismo que pueda ser interpretado por el sistema. El método centroide o centro de gravedad es el método de desfusificación que se empleó para este sistema, este método calcula el valor de salida de la función de pertenencia agregada lo que proporciona un resultado continuo y transiciones estables. Este método y su elección se fundamenta en la capacidad para obtener equilibradamente las reglas activadas que influyen en el proceso, esto resulta bastante adecuado en sistemas de sensores inalámbricos estableciendo un modelo robusto en el desfusificado y constituyendo una representación exacta y aplicable del razonamiento difuso implementado en el sistema IoT.

## 3.7. Diseño y construcción del Sistema de Monitoreo y Control de Humedad

La presente fase integra tanto los fundamentos teóricos revisados previamente como las decisiones técnicas necesarias para dar paso a una solución funcional y estable, haciendo uso del hardware y software seleccionados.

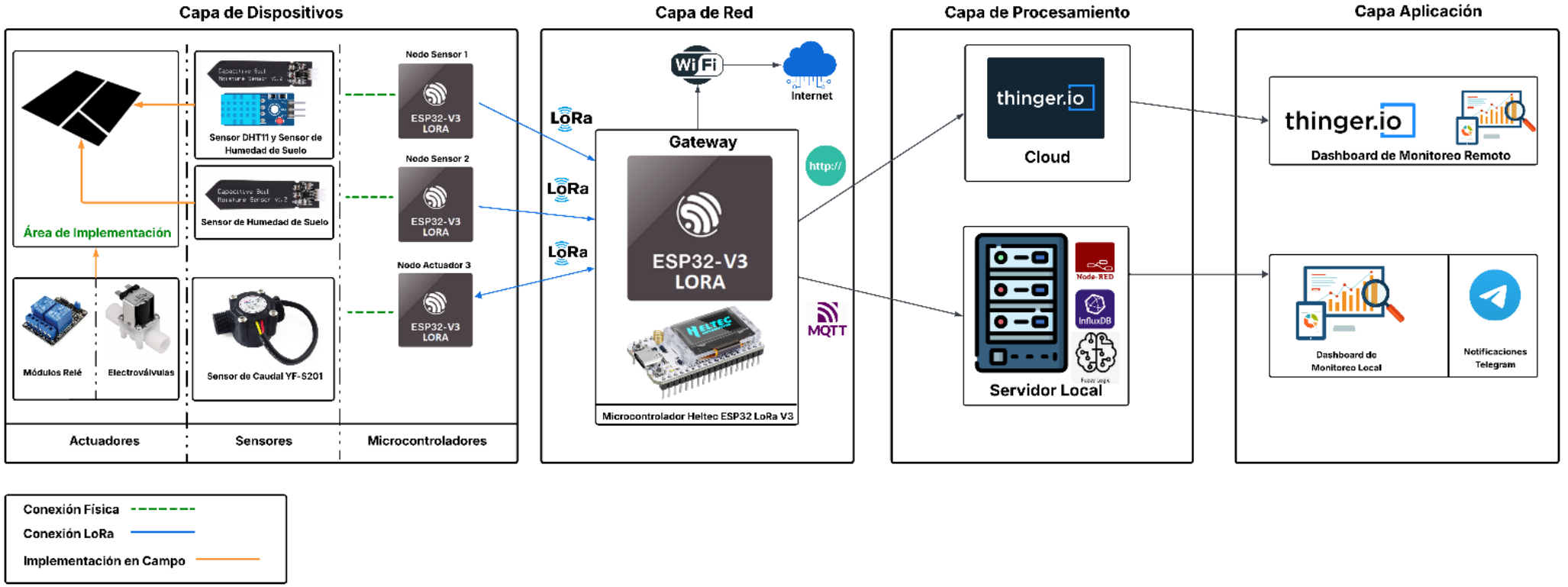
En esta etapa también se define la arquitectura del sistema, diagramas de conexión, diagramas de flujo de los nodos, programación y códigos implementados, algoritmos de procesamiento y control que regirán la automatización del sistema.

Se realiza también la construcción de los prototipos de hardware para su posterior instalación y pruebas de adquisición, transmisión y análisis de datos y control en tiempo real. Este proceso garantiza que el sistema se comporte adecuadamente a las condiciones del entorno agrícola donde se implementará, optimizando el uso del recurso hídrico y dando una solución óptima, eficiente y accesible.

### 3.7.1. Arquitectura del Sistema

**Figura 29**

*Arquitectura del sistema*



### 3.7.2. Diseño y Funcionamiento del Nodo Sensor 1

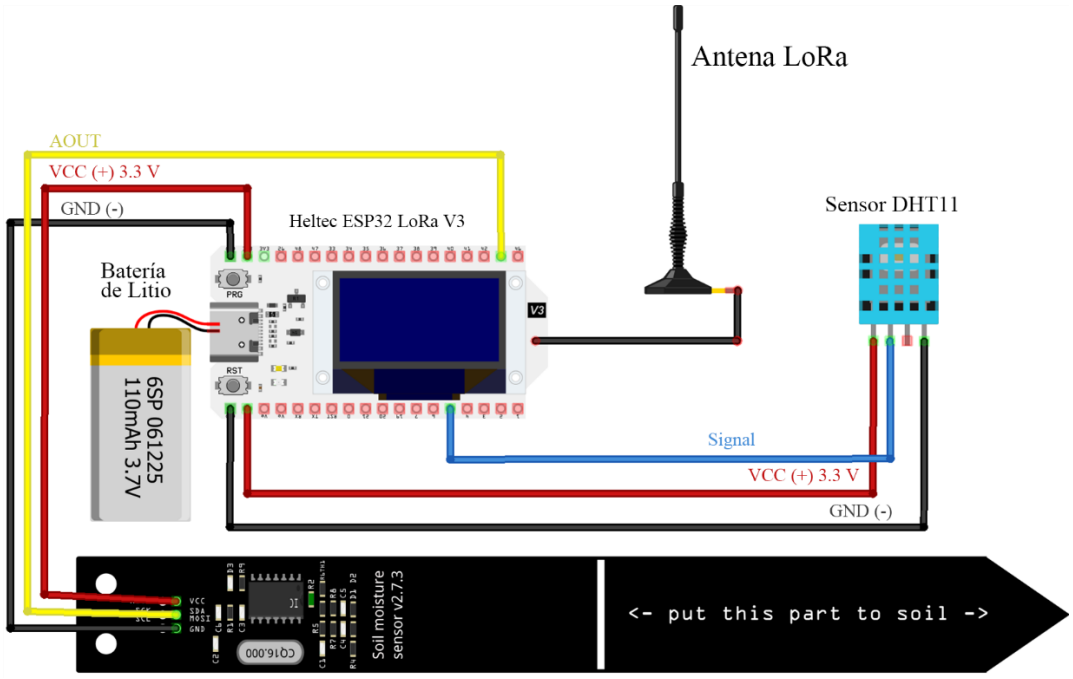
El desarrollo de esta sección implica el proceso técnico de poner en funcionamiento el Nodo Sensor 1, aquí se presentan puntos como el diagrama electrónico, parte de la lógica operativa que se define mediante un diagrama de flujo además de los procesos de programación y calibración de los sensores que integra el nodo y la transmisión de los datos mediante la tecnología LoRa.

#### 3.7.2.1. Diagrama de conexión del Nodo Sensor 1

El Nodo Sensor 1 recopila datos de temperatura y humedad ambiente, así como humedad del suelo mediante los sensores DHT11 y HW-390 respectivamente. Estos sensores se conectan mediante conexiones físicas por el protocolo IC2 al microcontrolador Heltec ESP32 LoRa V3. Como se aprecia en la Figura 30, el diagrama de este nodo describe las conexiones de alimentación eléctrica, sensores y comunicación, identificadas con los respectivos colores proporcionando un esquema preciso y diferenciado.

**Figura 30**

*Diagrama de conexiones del Nodo Sensor 1*




Fuente: Autoría

Las conexiones de los sensores hacia la placa de desarrollo siguen un orden específico y claro. La alimentación eléctrica del nodo está suministrada por una batería de litio, la energización de los sensores se realiza mediante los pines específicos de la placa, así como las entradas GPIO para cada sensor, como se detalla en la Tabla 29.

**Tabla 29**

*Pines de conexión del Nodo Sensor 1*

| **Conexiones del Nodo Sensor 1** | | | |
|---|---|---|---|
| **Pines ESP32 LoRa** | **DHT11** | **HW-390** | **Color** |
| VCC (3.3 V) | PIN 1 | PIN 2 | Rojo |
| GND | PIN 4 | PIN 3 | Negro |
| GPIO48 | PIN 2 | --- | Azul |
| GPIO6 | --- | PIN 1 | Amarillo |

Fuente: Autoría

### 3.7.2.2. Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 1

El diagrama de flujo del Nodo Sensor 1 permite representar la secuencia lógica y estructura de los procesos y operaciones de toma, procesamiento y transmisión de datos. El proceso de funcionamiento inicia con el establecimiento de las librerías de comunicación, compatibilidad con la tecnología de transmisión inalámbrica y los sensores, seguido de las variables que se ejecutarán en el código, los pines analógicos que toman los datos de los sensores.

El siguiente proceso es el bucle principal que configura los parámetros del enlace LoRa y la comunicación Serial del microcontrolador.

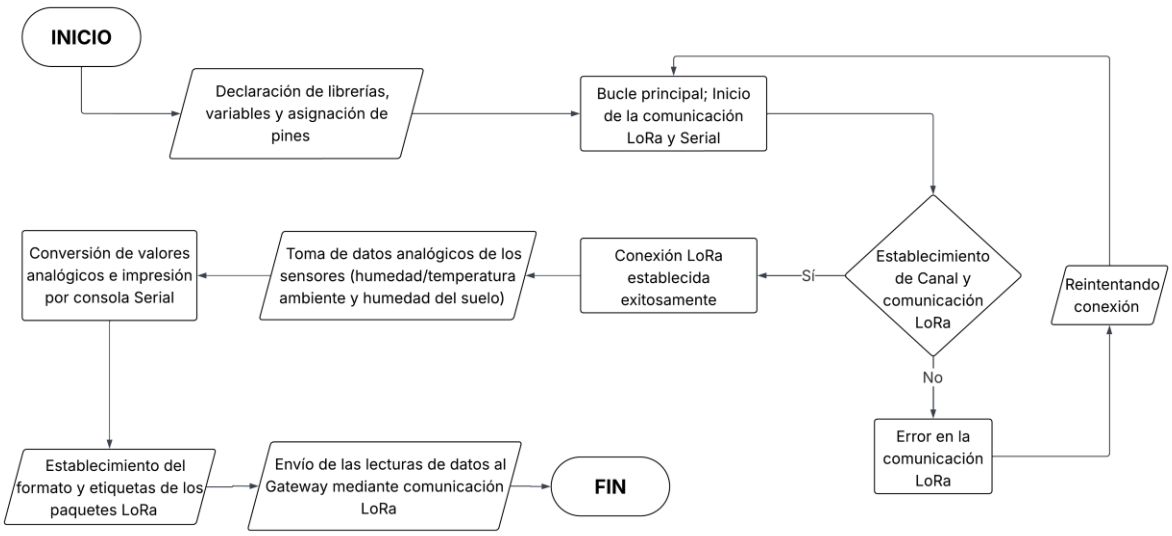
A continuación, se define un proceso de decisión de dos vías; si se cumple la condición de establecimiento de conexión se procede a ejecutar el proceso de toma de datos analógicos,

por otro lado, si no se cumple la condición el sistema presenta un proceso de error y reintenta la conexión en bucle.

El proceso de la toma de datos analógicos de los sensores da paso a la conversión de esos valores en formato de las magnitudes de cada variable ambiental siendo estos; temperatura (°C), humedad ambiente (%) y humedad del suelo (%). Consecutivamente se establece el formato y la etiqueta identificadora de cada magnitud y se envían los datos por comunicación LoRa, dando fin al flujo de funcionamiento del Nodo Sensor 1.

**Figura 31**

*Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 1*




Fuente: Autoría

Como se puede apreciar en la Figura 31, el diagrama de flujo representa el código de programación del Nodo Sensor, mismo que permite detectar errores, depurar el código además funciona como documentación para la creación de los diagramas de flujo de los nodos restantes y se convierte en un elemento esencial en el marco de la metodología de trabajo del presente proyecto.

### 3.7.2.3. Lectura y Calibración de Sensores del Nodo 1

En esta sección se aborda los procedimientos utilizados para garantizar la adquisición de las magnitudes a medir mediante los sensores DHT11 de temperatura/humedad ambiente y el sensor capacitivo HW-390 de humedad del suelo, este proceso respalda la precisión de las mediciones en un entorno real. Los métodos que se describirán en esta sección implican la validación y ajustes propios de cada sensor, las conversiones necesarias para transformar las señales analógicas en valores interpretables para el sistema.

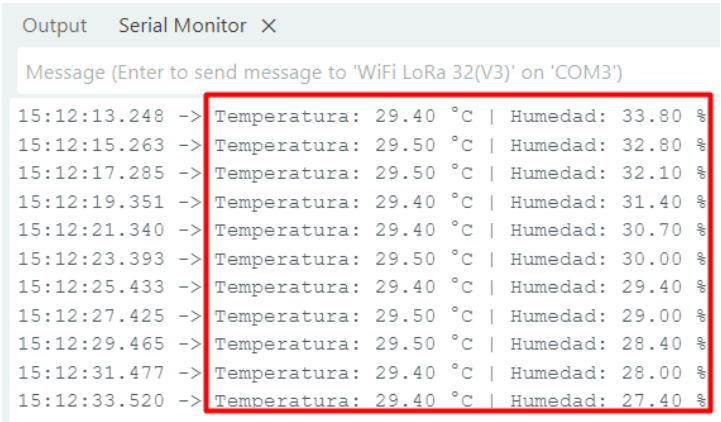
- **Adquisición de datos y calibración del sensor DHT11**

Para garantizar que las variables de temperatura y humedad ambiente sean precisas para el posterior procesamiento, es necesario realizar la calibración del sensor. En este caso en particular, según el fabricante de este sensor, no requiere calibración ya que viene pre-calibrado de fábrica y ofrece medidas en formato digital con una precisión de ±2 °C y ±5 %. La hoja de datos del sensor especifica un rango de Temperatura de 0-50 °C y Humedad de 20-90 %.

Como se mencionó el sensor viene calibrado de fábrica con un pequeño margen de error por lo que se procede a realizar la lectura de datos mediante la impresión en consola Serial del IDE de Arduino.

**Figura 32**

*Toma de datos del sensor DHT11*




Fuente: Autoría

La Figura 32 muestra los datos tomados por el sensor DHT11 en el rango que provee las especificaciones, estos valores presentan variaciones graduales que confirman la estabilidad tanto del sensor, así como del algoritmo de lectura implementado en el microcontrolador. La integración de ambos elementos garantiza que la información generada sea confiable para la posterior transmisión y análisis de los datos dentro del sistema.

- **Adquisición de datos y calibración del sensor HW-390**

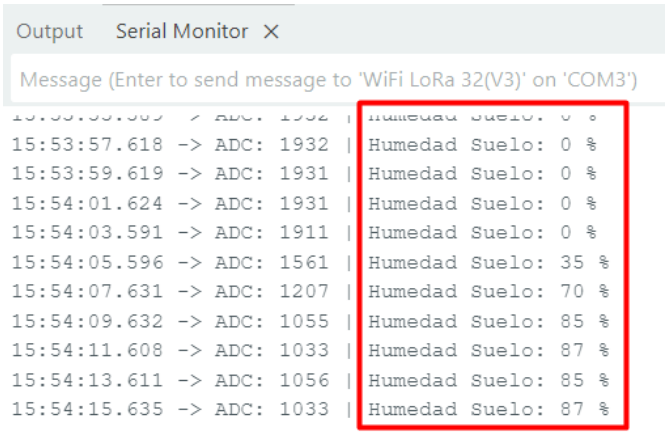
EL sensor de humedad de suelo HW-390 mide la resistencia eléctrica del suelo, ese es el principio básico de funcionamiento que aprovecha el agua como modificador de la conductividad del medio. El momento en el que el sensor se introduce en la tierra, por los electrodos o pistas eléctricas circula una corriente mínima. La resistencia eléctrica disminuye a medida que el suelo posee un mayor contenido de agua, esto se traduce en el aumento del voltaje de salida mediante el pin analógico de salida del sensor (AO).

El voltaje analógico que genera el sensor ingresa al microcontrolador mediante un pin ADC que no es más que un convertidor analógico-digital que transforma la señal de voltaje continua a un valor discreto digital en el rango de 0 a 4095 lo que representa la intensidad de la señal que se recibe. El microcontrolador se encarga de realizar la normalización para calibrar el estado de dos casos, suelo seco y suelo saturado de agua, mediante valores de referencia para ambos casos que se explicarán más adelante.

En la Figura 33 se puede corroborar la toma de datos del sensor de humedad del suelo mediante la consola serial del IDE de Arduino. Además de observa el voltaje ADC establecido para el porcentaje de humedad correspondiente en cada caso.

**Figura 33**

*Toma de datos del sensor de humedad del suelo HW-390*




Fuente: Autoría

Los resultados que se evidencian en el monitor serial demuestran el funcionamiento adecuado de la toma de datos del sensor y la conversión analógica. Al momento que la humedad del suelo varía, también lo hace el voltaje ADC, lo que permite el algoritmo calcular el porcentaje de humedad en base a las condiciones del sustrato.

El proceso de calibración implica establecer los umbrales correctos en dos casos; el primero exponiendo el sensor al aire libre lo que genera voltaje ADC, este valor se coloca en la constante entera “AirValue”, el segundo caso consiste en sumergir el sensor en agua y el valor de voltaje ADC se coloca en la constante entera “WaterValue”. Los valores que arrojaron las mediciones fueron 2790 para el primer caso y 1180 para el segundo caso. En la Figura 34 se observa el código para la calibración con los valores mencionados.

**Figura 34**

*Valores de calibración para el sensor de humedad de suelo HW-390*

```
// ==== SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO ====
#define PIN_SENSOR 6  // GPIO6 = ADC1_CH5
const int AirValue   = 2790;   // seco
const int WaterValue = 1180;   // húmedo
int soilMoistureValue = 0;
int soilMoisturePercent = 0;
```

Fuente: Autoría

### 3.7.2.4. Programación del Nodo Sensor 1

En esta sección se describe los procedimientos lógicos de programación que definen el modo operacional del elemento de red. Puesto a que el sistema se basa en los microcontroladores Heltec ESP32 LoRa V3 que son compatibles con el IDE de Arduino, las estructuras de código componen la lectura y calibración de sensores, definición de paquetes de información, envío inalámbrico y lógica operacional inherentes al Nodo en cuestión. Este proceso de desarrollo permite constituir un elemento esencial para asegurar la precisión, integridad y continuidad de la toma de datos hacía el Nodo Centralizado o Gateway.

La estructura de programación en el IDE utilizado empieza por la definición de las librerías necesarias para las funciones del programa, para el Nodo Sensor 1 se detallan en la Tabla 30, estas librerías poseen propiedad intelectual por lo cual es necesario mencionar los propietarios.

**Tabla 30**

*Librerías para programar el Nodo Sensor 1*

| Librería | Propietario |
|---|---|
| LoRaWan_APP.h | Heltec Automation |
| Arduino.h | Arduino |
| DHT.h | Adafruit Industries |

Fuente: Autoría

Las librerías son declaradas al inicio del código, se muestran en la Figura 35 y son tres en particular. La librería LoRaWan_APP.h se emplea para llamar las funciones necesarias en la comunicación LoRa, Arduino.h se usa para llamar a la API de Arduino necesaria para integrar funciones del lectura, escritura y funciones principales, por último, la librería DHT.h es la librería fundamental para realizar la comunicación con el sensor de temperatura y humedad ambientales DHT11.

**Figura 35**

*Librerías incluidas en el código del Nodo Sensor 1*

```
#include "LoRaWan_APP.h" // Librería para la comunicación LoRa
#include "Arduino.h"     // Librería que define la API estándar de Arduino
#include "DHT.h"         // Librería para el sensor DHT11
```

Fuente: Autoría

Tras haber incluido las librerías necesarias para la programación, se procede a declarar las variables/constantes necesarias para el funcionamiento de los sensores, en este caso del sensor DHT11 y del sensor de Humedad del Suelo, como se puede apreciar en la Figura 36, en esta sección del código se realiza también la calibración del sensor en caso de que se requiera.

**Figura 36**

*Declaración de variables y constantes*

```
// ==== SENSOR DHT11 ====
#define DHTPIN 48       // GPIO48 - Pin de Conexión en el microcontrolador
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
float ValHum = 0, ValTem = 0;

// ==== SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO ====
#define PIN_SENSOR 6  // GPIO6 = ADC1_CH5
const int AirValue   = 2790;   // Valor ADC en el aire seco
const int WaterValue = 1180;   // Valor ADC en agua (húmedo)
int soilMoistureValue = 0;
int soilMoisturePercent = 0;
```

Fuente: Autoría

Inicializar la comunicación por radiofrecuencia es una parte fundamental del código de programación del microcontrolador, la definición de los parámetros de la capa física se debe realizar con precisión para que la modulación CSS (Chirp Spread Spectrum) trabaje de manera eficiente según las especificaciones del fabricante del microcontrolador. La Figura 37 presenta el bloque de programación configurado en el firmware, aquí se establecen variables críticas como la frecuencia de operación, potencia de transmisión, factor de dispersión y la tasa de

codificación. Los valores aquí establecidos definen las características del enlace, fomentando el compromiso técnico entre la eficiencia, robustez del sistema y transferencia de datos.

**Figura 37**

*Configuración de parámetros de capa física LoRa del Nodo Sensor 1*

```
// ==== CONFIGURACIÓN LORA ====
#define RF_FREQUENCY 915000000  // Hz
#define TX_OUTPUT_POWER 15      // Potencia en dBm
#define LORA_BANDWIDTH 0        // [0: 125 kHz, 1: 250 kHz, 2: 500 kHz, 3: Reserved]
#define LORA_SPREADING_FACTOR 7 // [SF7..SF12] Factor de Dispersión
#define LORA_CODINGRATE 1       // [1: 4/5, 2: 4/6, 3: 4/7, 4: 4/8]
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8  // Mismo valor para Tx y Rx
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0   // Simbolos
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false
#define BUFFER_SIZE 100         // Payload
```

Fuente: Autoría

La optimización y eficiencia de energía son un punto fundamental para garantizar que el nodo funcione durante un tiempo prolongado sin interrupciones y eficientemente energético.

En la Figura 38 se observa la sección del código, encargada de la inicialización en el void setup que se encarga de organizar el arranque de los dispositivos conectados al microcontrolador como son los sensores y el accionamiento de la interfaz de radio y de establecer la frecuencia de trabajo del CPU del microcontrolador en 80 MHz.

Posteriormente se designan las funciones de retorno o “callbacks” que se vinculan con eventos de transmisión y recepción de datos LoRa, estos son necesarios para establecer la comunicación asíncrona con el Gateway y garantizar la fiabilidad del enlace inalámbrico.

**Figura 38**

*Ciclo principal de transmisión del Nodo 1*

```
void setup() {

#if DEBUG
  Serial.begin(115200);     //Inicializa la comunicación serial
  Serial.println("Nodo 1 optimizado iniciado"); //MEnsaje de arranque
#endif

  setCpuFrequencyMhz(80);       // CPU a 80 MHz

  Mcu.begin(HELTEC_BOARD, SLOW_CLK_TPYE); //Inicia el MCU y el reloj de bajo consumo

  pinMode(SENSOR_PWR, OUTPUT);    // Configuración de modos de Pines
  digitalWrite(SENSOR_PWR, LOW); // Sensores apagados por defecto

  dht.begin();                    // Inicialización del sensor DHT11

  analogReadResolution(12);     // Configuración ADC a 12 bits
  analogSetPinAttenuation(PIN_SENSOR, ADC_11db);  //Ajuste de rango de entrada ADC

  RadioEvents.TxDone = OnTxDone; // Asigna callback de transmisión
  RadioEvents.RxDone = OnRxDone;  // Asigna callback de recepción

  Radio.Init(&RadioEvents);       // Inicializa el módulo LoRa
  Radio.SetChannel(RF_FREQUENCY); // Configura la frecuencia de recepción

  Radio.SetRxConfig(MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH, LORA_SPREADING_FACTOR,
                    LORA_CODINGRATE, 0, LORA_PREAMBLE_LENGTH,
                    0, false, 0, true, 0, 0,
                    LORA_IQ_INVERSION_ON, true);  // Configuración RX

  Radio.SetTxConfig(MODEM_LORA, TX_OUTPUT_POWER, 0, LORA_BANDWIDTH,
                    LORA_SPREADING_FACTOR, LORA_CODINGRATE,
                    LORA_PREAMBLE_LENGTH, LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
                    true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, 3000);  // Configuración TX
}
```

Fuente: Autoría

La siguiente sección de la estructura del código que se ilustra en la Figura 39, es la correspondiente al void loop o ciclo principal de ejecución, que se encarga de la toma y posterior transmisión de los datos ambientales. Como primera estructura se verifica que el módulo transceptor LoRa esté disponible para transmitir.

A continuación, se activa los sensores temporalmente por medio de un pin de control, tomando datos del sensor DHT11 y HW-390, si existe valores inválidos en las lecturas, se asigna un valor nulo para evitar errores de procesamiento de datos. Posteriormente el valor

analógico del sensor de humedad del suelo se convierte a formato de porcentaje usando una función de mapeo calibrada previamente. Por último, la alimentación de los sensores es desactivada para optimizar la energía de la batería y se formas los formatos de paquetes para ser enviados mediante un ID hacia el Gateway mediante LoRa.

**Figura 39**

*Void Loop del Nodo Sensor 1*

```
void loop() {

  if (lora_idle) {                // Verifica si el módulo LoRa está disponible para enviar datos

    // Encender sensores
    digitalWrite(SENSOR_PWR, HIGH); // Activa la alimentación de los sensores
    delay(50);                      // Espera breve para estabilización de los sensores

    float hum = dht.readHumidity();     // Lectura de humedad relativa del sensor DHT11
    float temp = dht.readTemperature(); // Lectura de temperatura del sensor DHT11

    if (isnan(hum) || isnan(temp)) {    // Verifica si las lecturas son inválidas
      hum = 0;                          // Si ocurre error se asigna valor 0
      temp = 0;
    }

    int raw = analogRead(PIN_SENSOR);   // Lectura analógica del sensor de humedad del suelo
    int soil = map(raw, AirValue, WaterValue, 0, 100); // Conversión a porcentaje de humedad
    soil = constrain(soil, 0, 100);     // Limita el valor del porcentaje entre 0 y 100

    // Apagar sensores
    digitalWrite(SENSOR_PWR, LOW);      // Desactiva la alimentación de los sensores

    // Construcción del payload
    sprintf(txpacket, "ID1@Hmd@%.2f@Tmp@%.2f@Slo@%d",
            hum, temp, soil);           // Construye el paquete de datos con ID y valores de sensores

#if DEBUG
    Serial.printf("TX: %s\n", txpacket); // Muestra el paquete transmitido si DEBUG está activo
#endif

    Radio.Send((uint8_t*)txpacket, strlen(txpacket)); // Envía el paquete mediante el módulo LoRa
    lora_idle = false;                                // Indica que la radio está ocupada transmitiendo
  }
```

Fuente: Autoría

Finalmente implementa un mecanismo de ahorro de energía empleando el modo Light Sleep evidenciado en la Figura 40, que configura un temporizador interno, determinando el tiempo tras el cual debe reactivarse el dispositivo.

Seguido de este proceso mediante la instrucción esp_light_sleep_start() el microcontrolador entra en un estado de consumo energético sumamente bajo y detiene momentáneamente la ejecución del programa. Una vez pasado el tiempo configurado, el dispositivo se despierta automáticamente.

**Figura 40**

*Configuración de Light Sleep del Nodo 1*

```
// Light Sleep (Modo de bajo consumo sin reiniciar el programa)
// Configura temporizador de despertar
esp_sleep_enable_timer_wakeup((uint64_t)SEND_INTERVAL * 1000000ULL);
esp_light_sleep_start(); // Coloca al microcontrolador en modo de bajo consumo
```

Fuente: Autoría

### 3.7.3. Diseño y Funcionamiento del Nodo Sensor 2

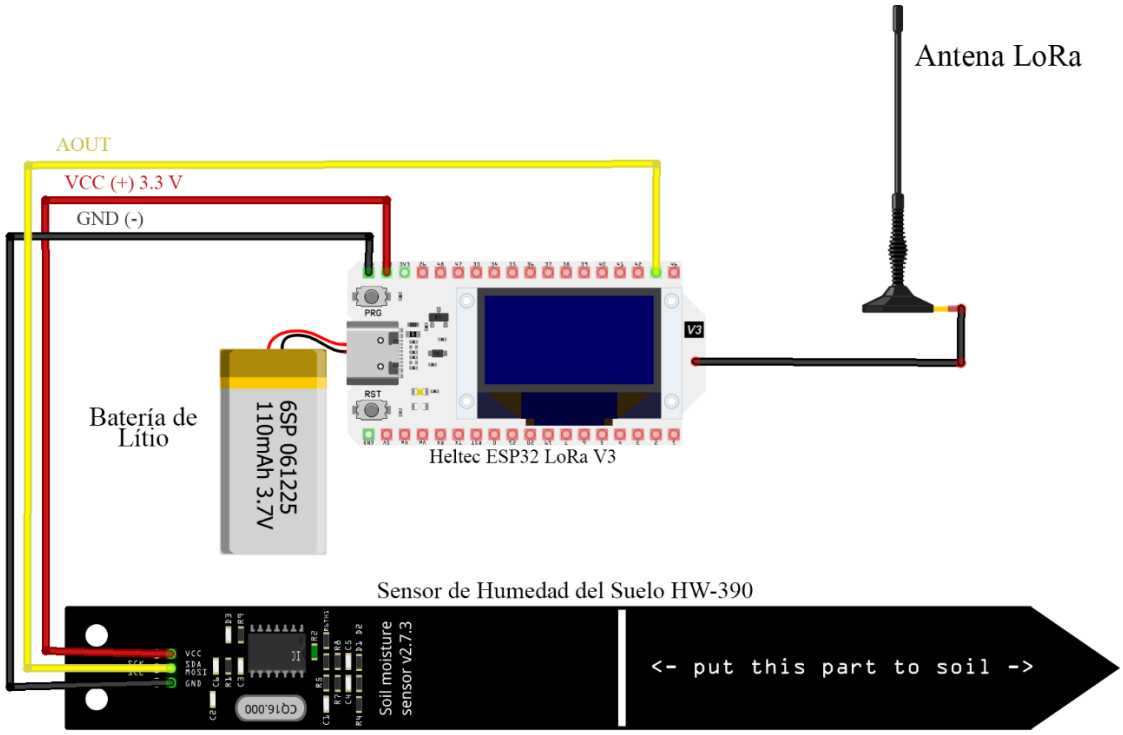
Al igual que el Nodo 1, en esta sección se realiza el proceso técnico de poner en funcionamiento el Nodo 2, la estructura de las secciones será similar a las ya realizadas en el Nodo 1, se presenta el diagrama electrónico, la lógica operativa que se define mediante el diagrama de flujo, los procesos de programación y calibración de los sensores y la transmisión de los datos hacia la capa física.

#### 3.7.3.1. Diagrama de conexión del Nodo Sensor 2

A diferencia del primer nodo sensor, el Nodo Sensor 2 solamente toma datos de humedad del suelo mediante el sensor HW-390 mismo que se comunica mediante IC2 con el microcontrolador Heltec ESP32 LoRa V3. La lógica de toma y envío de datos hacia el Gateway en la misma que en el Nodo Sensor 1 por lo que sería repetitivo describir que se realiza en este Nodo. En la Figura 41 se describe las conexiones físicas y de energía, como sensores que están anexados a este Nodo y la fuente de alimentación.

**Figura 41**

*Diagrama de conexiones del Nodo Sensor 2*




Fuente: Autoría

Es imperativo señalar el sensor de humedad del suelo HW-390 sigue un código de colores en sus pines para la conexión hacia el microcontrolador. La alimentación del Nodo Sensor 2 se realiza mediante una batería de litio recargable. En la Tabla 31 se puede observar el respectivo, color, pin y entrada tanto del sensor como del microcontrolador, detallando la lógica de conexión para evitar errores en el diseño de este Nodo Sensor.

**Tabla 31**

*Pines de conexión del Nodo Sensor 2*

| Conexiones del Nodo Sensor 2 | | |
|---|---|---|
| **Pines ESP32 LoRa** | **HW-390** | **Color** |
| VCC (3.3 V) | PIN 1 | Rojo |
| GPIO6 | PIN 2 | Amarillo |
| GND | PIN 3 | Negro |

*Nota:* La numeración de pines del sensor HW-390 de la Figura 33 se la realiza de arriba hacia abajo, bajo esta numeración se construye las conexiones detalladas en la presente tabla. Fuente: Autoría

### 3.7.3.2 Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 2

El diagrama de flujo del Nodo Sensor 2 representa la secuencia lógica y estructura de los procesos y operaciones de toma, procesamiento y transmisión de datos. El proceso se inicializa con el establecimiento de las librerías de comunicación, compatibilidad con la tecnología de transmisión inalámbrica y los sensores, seguido de las variables que se ejecutarán en el código y los pines analógicos que toman los datos del sensor de humedad del suelo.

El siguiente proceso es el bucle principal que configura los parámetros del enlace LoRa y la comunicación Serial del microcontrolador.

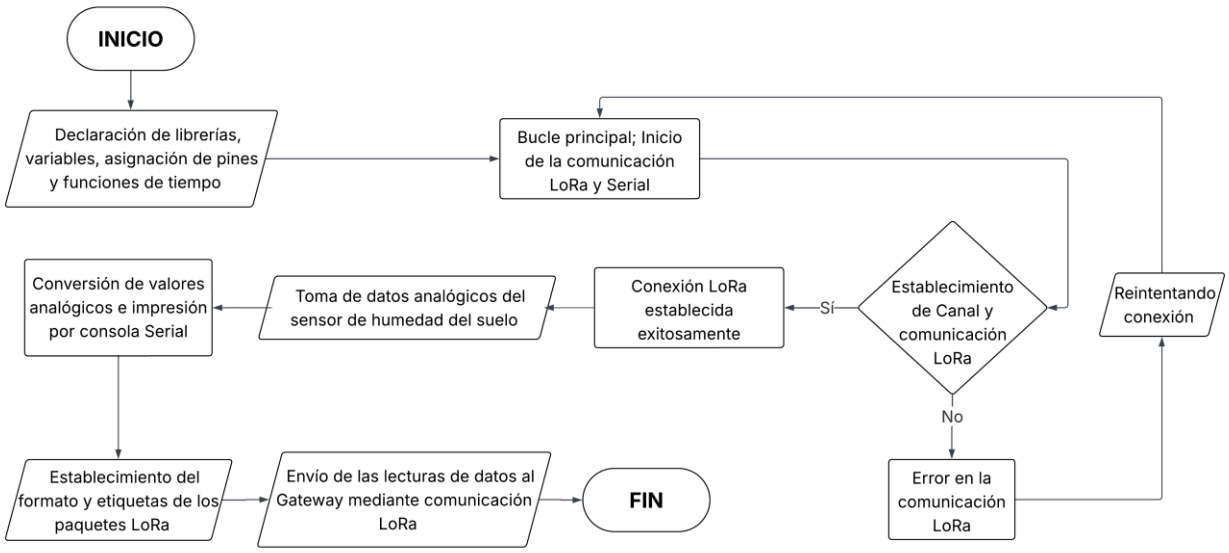
Posteriormente, se define un proceso de decisión de dos vías; si se cumple la condición de establecimiento de conexión se procede a ejecutar el proceso de toma de datos analógicos, por otro lado, si no se cumple la condición el sistema presenta un proceso de error y reintenta la conexión en bucle.

El proceso de la toma de datos analógicos de los sensores da paso a la conversión de esos valores en formato de las magnitudes la variable censada siendo esta; la humedad del suelo (%). Consecutivamente se establece el formato y la etiqueta identificadora de cada magnitud y

se envían los datos por comunicación LoRa, dando fin al flujo de funcionamiento del Nodo Sensor 1.

**Figura 42**

*Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 2*




Fuente: Autoría

### 3.7.3.3 Lectura y Calibración de Sensores del Nodo 2

Para garantizar la adquisición de datos o magnitudes de este Nodo, se debe seguir los procedimientos respectivos y de operación para que el sensor capacitivo HW-390 de humedad del suelo funcione óptimamente apegado a los requerimientos del sistema.

En la sección 3.7.2.3 se detalló el proceso de lectura y calibración de los sensores del Nodo 1. Una característica que comparten ambos Nodos (Nodo 1 y Nodo 2) es la integración del sensor HW-390, por lo que realizar nuevamente la explicación de la lectura y calibración de este sensor para este Nodo sería redundante, es por esta razón se recomienda revisar la sección mencionada al principio de este párrafo.

### 3.7.3.4 Programación del Nodo Sensor 2

La presente sección describe el desarrollo de programación del firmware que se encarga de la toma y transmisión de las magnitudes medidas por este nodo. A diferencia del Nodo

Sensor 1, este se orienta únicamente en la adquisición eficiente de datos de humedad del suelo previo a su envío al Gateway, garantizando la sincronización, disponibilidad y bajo consumo energético. Lo que se detalla en esta sección es la estructura general del programa en concordancia con los requerimientos definidos del sistema.

De acuerdo con la estructura lógica de funcionamiento del Nodo, se declara las librerías de programación, hecho que es indispensable para el correcto funcionamiento del código, además se describe la atribución o autoría de dichas librerías ya que poseen propiedad intelectual.

**Tabla 32**

*Librerías de programación del Nodo Sensor 2*

| **Librería** | **Propietario** |
|---|---|
| LoRaWan_APP.h | Heltec Automation |
| Arduino.h | Arduino |

Fuente: Autoría

Las librerías utilizadas en la programación de este nodo sensor son las ya mencionadas para el Nodo Sensor 1 a excepción de la librería DHT.h que no se emplea en este nodo. Las librerías se detallan en la Tabla 32.

Ya que este nodo posee un sensor HW-390 de humedad del suelo, es imperativo declarar las respectivas variables y constantes para su conexión con el microcontrolador. Más específicamente; el PIN analógico de entrada, las constantes “AirValue” y “WaterValue” que se usan para la calibración del sensor. En la Figura 43 se detallan todos los parámetros mencionados.

**Figura 43**

*Librerías de programación y constantes del Nodo Sensor 2*

```
#include "LoRaWan_APP.h"          // Librería LoRa (Heltec / SX127x)
#include "Arduino.h"              // Núcleo de Arduino

// ================================================
// SENSOR HUMEDAD DE SUELO HW-390
// ================================================
#define PIN_SENSOR 6              // Pin analógico donde está conectado el HW-390
const int AirValue   = 2790;      // Valor ADC cuando el sensor está en aire (seco)
const int WaterValue = 1180;      // Valor ADC cuando el sensor está en agua (100% humedad)
```

Fuente: Autoría

La siguiente sección que estructura el código de programación mostrada en la Figura 44 corresponde al establecimiento de los parámetros de configuración de la comunicación LoRa referente a la capa física, al igual que el Nodo Sensor 1, el nodo actual presenta una configuración igual de parámetros que establecen el comportamiento del enlace inalámbrico entre el Nodo y el Gateway, por lo que se considera que la explicación es redundante y se puede revisar en la sección 3.7.2.4.

**Figura 44**

*Configuración de parámetros de capa física LoRa del Nodo Sensor 2*

```
// ================================================
// CONFIGURACIÓN DE LA COMUNICACIÓN LORA
// ================================================
#define RF_FREQUENCY 915000000    // Frecuencia LoRa (915 MHz – región ISM)
#define TX_OUTPUT_POWER 15        // Potencia de transmisión en dBm
#define LORA_BANDWIDTH 0          // Ancho de banda LoRa (125 kHz)
#define LORA_SPREADING_FACTOR 7   // Spreading Factor (equilibrio alcance/velocidad)
#define LORA_CODINGRATE 1         // Coding Rate 4/5 (robustez frente a errores)
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8    // Longitud del preámbulo LoRa
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false // Payload de tamaño variable
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false       // No invertir señal IQ
#define BUFFER_SIZE 80            // Tamaño máximo del mensaje LoRa

char txpacket[BUFFER_SIZE];      // Buffer para mensajes de transmisión
bool lora_idle = true;            // Indica si la radio está disponible
```

Fuente: Autoría

La optimización y eficiencia de energía energética garantizan que el nodo funcione durante un tiempo prolongado sin interrupciones. En la Figura 45 se observa la sección del código, encargada de la inicialización en el void setup que se organiza el arranque de los dispositivos conectados al microcontrolador como son los sensores, el accionamiento de la interfaz de radio y establecimiento la frecuencia de trabajo del CPU del microcontrolador en 80 MHz. Posteriormente se designan las funciones de retorno o "callbacks" que se vinculan con eventos de transmisión y recepción de datos LoRa, estos son necesarios para establecer la comunicación asíncrona con el Gateway y garantizar la fiabilidad del enlace inalámbrico.

**Figura 45**

*Ciclo principal de transmisión del Nodo 2*

```
void setup() {

#if DEBUG
  Serial.begin(115200);           // Inicializa la comunicación serial
  Serial.println("Nodo 2 optimizado iniciado"); // Mensaje de inicio del nodo
#endif

  setCpuFrequencyMhz(80);         // Reduce la frecuencia del CPU a 80 MHz

  Mcu.begin(HELTEC_BOARD, SLOW_CLK_TPYE); // Inicializa el hardware de la placa Heltec

  pinMode(SENSOR_PWR, OUTPUT);    // Configura el pin que alimenta el sensor como salida
  digitalWrite(SENSOR_PWR, LOW);  // Mantiene el sensor apagado por defecto para ahorrar energía

  analogReadResolution(12);       // Configura la resolución del ADC a 12 bits
  analogSetPinAttenuation(PIN_SENSOR, ADC_11db); // Ajusta la atenuación del ADC

  // Asociación de eventos de radio con sus funciones callback
  RadioEvents.TxDone = OnTxDone;
  RadioEvents.RxDone = OnRxDone;

  Radio.Init(&RadioEvents);       // Inicializa el módulo LoRa con la estructura de eventos
  Radio.SetChannel(RF_FREQUENCY); // Configura la frecuencia de operación LoRa

  // Configuración del modo recepción LoRa
  Radio.SetRxConfig(MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH, LORA_SPREADING_FACTOR,
                    LORA_CODINGRATE, 0, LORA_PREAMBLE_LENGTH,
                    0, false, 0, true, 0, 0,
                    LORA_IQ_INVERSION_ON, true);

  // Configuración del modo transmisión LoRa
  Radio.SetTxConfig(MODEM_LORA, TX_OUTPUT_POWER, 0, LORA_BANDWIDTH,
                    LORA_SPREADING_FACTOR, LORA_CODINGRATE,
                    LORA_PREAMBLE_LENGTH, LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
                    true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, 3000);
```

Fuente: Autoría

Continuando con estructura del código que se ilustra en la Figura 46, es la correspondiente al void loop o ciclo principal de ejecución, que se encarga de la toma y posterior transmisión de los datos ambientales. Como primera estructura se verifica que el módulo transceptor LoRa esté disponible para transmitir. A continuación, se activa el sensor temporalmente por medio de un pin de control, tomando datos de humedad del suelo, si existe valores inválidos en las lecturas, se asigna un valor nulo para evitar errores de procesamiento de datos. Posteriormente el valor analógico del sensor de humedad del suelo se convierte a formato de porcentaje usando una función de mapeo calibrada previamente. Por último, la alimentación del sensor es desactivada para optimizar la energía de la batería y se establecen los formatos de paquetes para ser enviados mediante un ID hacia el Gateway mediante comunicación LoRa.

**Figura 46**

*Ciclo principal de transmisión del Nodo 2*

```
void loop() {

  // Verifica si la radio está disponible para transmitir
  if (lora_idle) {

    // Encender sensor
    digitalWrite(SENSOR_PWR, HIGH); // Activa alimentación del sensor
    delay(30);                      // Espera breve para estabilización de la lectura

    // Lectura analógica del sensor de humedad
    int raw = analogRead(PIN_SENSOR);

    // Conversión del valor ADC a porcentaje de humedad del suelo
    int soil = map(raw, AirValue, WaterValue, 0, 100);
    soil = constrain(soil, 0, 100); // Limita el valor entre 0% y 100%

    // Apagar sensor
    digitalWrite(SENSOR_PWR, LOW);  // Desactiva alimentación para ahorrar energía

    // Construcción del payload
    sprintf(txpacket, "ID2@Soil@%d", soil); // Mensaje ID del nodo y valor del sensor

#if DEBUG
    Serial.printf("TX: %s\n", txpacket); // Mensaje enviado por el puerto serial
#endif

    // Envío del paquete LoRa
    Radio.Send((uint8_t*)txpacket, strlen(txpacket));
    lora_idle = false; // Indica que la radio está ocupada transmitiendo
  }
```

Fuente: Autoría

Como sección final del código se implementa un mecanismo de ahorro de energía empleando el modo Light Sleep evidenciado en la Figura 47, que configura un temporizador interno, determinando el tiempo tras el cual debe reactivarse el dispositivo. Seguido de este proceso mediante la instrucción *esp_light_sleep_start()* el microcontrolador entra en un estado de consumo energético sumamente bajo y detiene momentáneamente la ejecución del programa. Una vez pasado el tiempo configurado, el dispositivo se despierta automáticamente.

**Figura 47**

*Configuración de Light Sleep del Nodo 2*

```
// Light Sleep (modo de bajo consumo sin reiniciar el programa)
// Configura temporizador de despertar
esp_sleep_enable_timer_wakeup((uint64_t)SEND_INTERVAL * 1000000ULL);
esp_light_sleep_start(); // Entra en modo de suspensión ligera hasta el siguiente ciclo
```

Fuente: Autoría

### 3.7.4 Diseño y Funcionamiento del Nodo Actuador

El Nodo Actuador cumple un papel esencial en la ejecución de las acciones físicas en base a las decisiones del sistema basado en lógica difusa. En esta sección se describe el proceso para integrar este nodo a la arquitectura del sistema IoT planteada. Es importante señalar que, aunque este Nodo se encargue del control del sistema de riego, también integra sensores de caudal para la medición del flujo de agua consumida. El diseño y la lógica operacional fueron diseñadas con el fin de garantizar una respuesta confiable y eficiente entre el procesamiento de información, adquisición de datos y la actuación en el entorno de acuerdo con los requerimientos del sistema planteados.

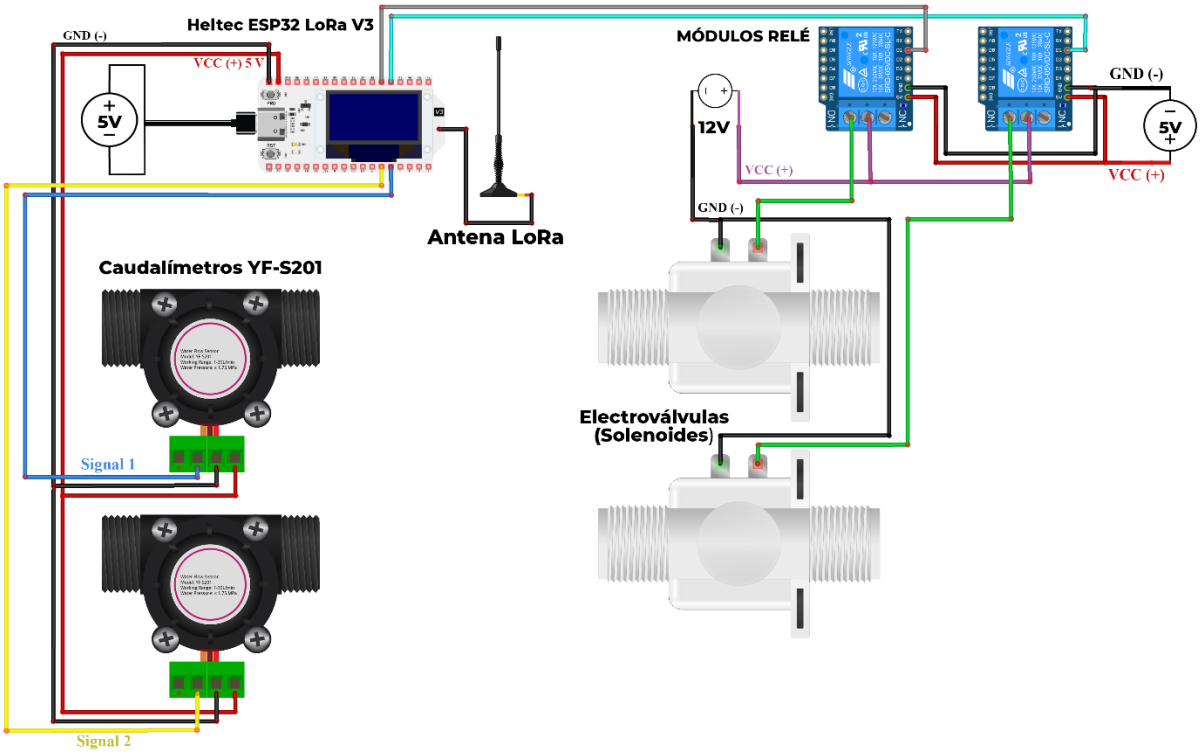
#### 3.7.4.1 Diagrama de Conexión del Nodo Actuador

La arquitectura básica del Nodo Actuador es la recopilación de datos de los caudalímetros YF-S201 para evaluar el consumo del recurso hídrico, a su vez, este Nodo recibe la orden procesada con lógica difusa desde el Gateway que activa o desactiva las

electroválvulas. Los datos de los sensores se procesan mediante el microcontrolador Heltec ESP 32 LoRa V3 proporcionando información que en enviada al Gateway y posteriormente a la par; al servidor local y al servicio de gestión en la nube. En la Figura 48 se representa el diagrama de conexiones de los componentes que integran este Nodo.

**Figura 48**

*Diagrama de conexiones del Nodo Actuador*




Fuente: Autoría

La Tabla 33 especifica cada pin de conexión con su respectivo número en el caso del microcontrolador, sensores y actuadores (relés). La Tabla en cuestión suministra la información para construir el prototipo de manera eficiente y ordenada, estableciendo un modelo sólido y fácil de interpretar en caso de mantenimientos preventivos o correctivos.

**Tabla 33**

*Pines de conexión del Nodo Actuador*

| Conexiones del Nodo Actuador | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Pines ESP32 LoRa** | **YF-S201 (1)** | **YF-S201 (2)** | **Relé (1)** | **Relé (2)** | **Color** |
| VCC (5v) | PIN 3 | PIN 3 | 5V | 5V | Rojo |
| GND | PIN 2 | PIN 2 | GND | GND | Negro |
| GPIO48 | PIN 1 | --- | ---- | --- | Amarillo |
| GPIO47 | ---- | PIN 1 | ---- | ---- | Azul |
| GPIO3 | --- | ---- | D1 | --- | Celeste |
| GPIO2 | --- | ---- | ---- | D1 | Gris |

Fuente: Autoría

### 3.7.4.2 Diagrama de Flujo del Nodo Actuador

En cuanto al Nodo Actuador la secuencia lógica de programación viene establecida por el diagrama de flujo presentado en la Figura 49 Las secuencias de inicialización de los procesos de programación son similares a las de los Nodos Sensores, teniendo en cuenta de que se trata del mismo microcontrolador Heltec ESP32 LoRa V3.

Este Nodo se caracteriza por realizar la parte de control del sistema y tomar datos de flujo del agua mediante caudalímetros integrados al microcontrolador, el control del recurso hídrico se realiza mediante electroválvulas que se integran a módulos relé, estableciendo un sistema eficiente y apegado a los requerimientos planteados en el diseño.

El proceso de inicio del programa establece la declaración de librerías de comunicación, parámetros de transmisión y asignación de pines tanto para los sensores de caudal como para los relés.

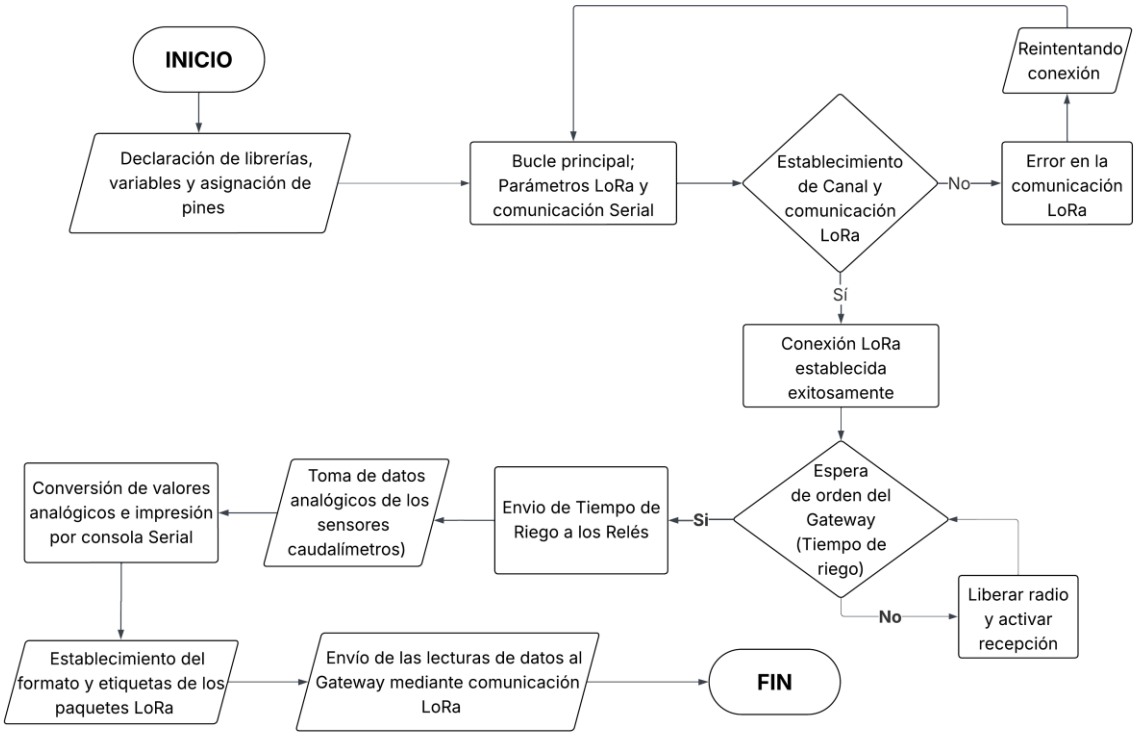
Posteriormente, el proceso de decisión implica establecer el canal y la comunicación LoRa, estableciendo dos procesos de decisión, si se cumple la condición la conexión LoRa será

exitosa, caso contrario se reintenta la conexión. Posteriormente cuando el microcontrolador establezca esa comunicación, está en modo espera a la orden del Gateway que es básicamente el tiempo de riego calculado por la lógica difusa. Este comando u orden se genera en el servidor local que está corriendo Node-Red. Una vez que se haya recibido el comando se procede a encender los pines que controlan los relés y consecutivamente los medidores de caudal toman los datos analógicos y los envían al microcontrolador.

El próximo proceso es la conversión de estos valores analógicos de la magnitud medida en formato del proceso inherente, en este caso es la conversión a litros. Una vez obtenidas estas magnitudes se establece el formato de las etiquetas LoRa que serán enviadas hacia el Gateway.

**Figura 49**

*Diagrama de Flujo del Nodo Actuador*




Fuente: Autoría

### 3.7.4.3 Lectura y Calibración de Sensores del Nodo Actuador

Garantizar la adquisición de las magnitudes, en este caso del caudal consumido en cada riego, es fundamental para saber el consumo real del recurso hídrico, mediante el sensor YFS-201 implementado en una parte estratégica del cultivo. Los métodos de calibración de este sensor fundamentan la precisión de las mediciones a través de métodos descritos por el fabricante. La correcta calibración y adquisición de datos de caudal proporcionan variables al sistema para su respectiva interpretación y análisis a posteriori.

- **Adquisición de datos y calibración del sensor YF-S201**

La fase de construcción del sistema se basa fundamentalmente en la integración del sensor de caudal YF-S201, este dispositivo es un transductor que se basa en el efecto Hall, es decir que transforma el caudal en una señal digital variable. Si bien las especificaciones del fabricante establecen un coeficiente para la conversión nominal, existen factores que pueden afectar la operación y mediciones del sensor, como la presión o la forma de la tubería.

La implementación y correcta obtención del factor de calibración resulta fundamental para obtener un valor de magnitudes lo más preciso posible, en este apartador de detalla la calibración experimental para obtener el coeficiente adecuado y reducir errores sistemáticos en el sistema.

El primer paso para la obtención de datos es establecer el código de programación, en donde, la sección de calibración se define mediante una variable (dependiendo del número de sensores), aquí se toma el valor del factor de calibración que por especificaciones del fabricante se define en 7.5 como se muestra en la Figura 50.

**Figura 50**

*Factor de calibración del Sensor YF-S201*

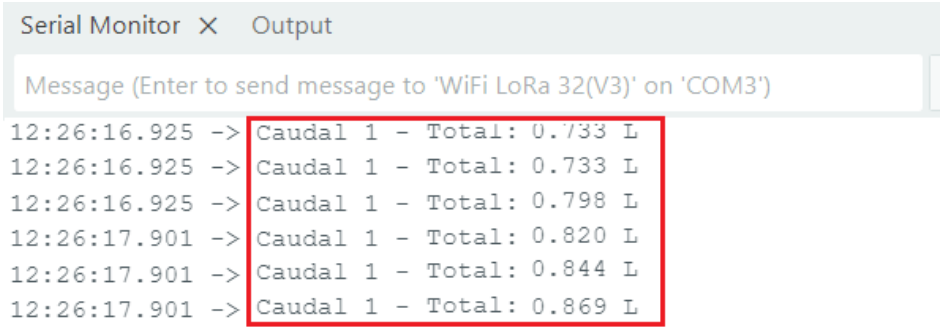
```
float calibrationFactor1 = 7.5;  // Ajustar según tu sensor 1
float calibrationFactor2 = 7.5;  // Ajustar según tu sensor 2
```

Fuente: Autoría

Al hacer circular líquido por el sensor se muestra en la consola serial, el caudal total medido, sin embargo, como se señaló antes, este factor es el que recomienda el fabricante, más no es exacto, eso depende de cada sensor. La Figura 51 muestra la adquisición de datos del caudal calculando el total de litros.

**Figura 51**

*Medición del sensor YF-S201*




Fuente: Autoría

El proceso de calibración abarca el cálculo del factor mencionado en la sección anterior en función de los litros exactos que atraviesan el sensor. En este caso se debe disponer de un recipiente con capacidad exacta para un litro. Según (Adafruit & Foshan Shunde Zhongjiang Energy Saving Electronics Co., 2021) al hacer circular esta cantidad exacta de líquido por el sensor, se toma en cuenta el valor total que marca en la consola serial; si el valor mostrado es igual al valor vertido del líquido, entonces el factor de calibración es correcto, caso contrario se debe calcular con la ecuación 7:

$$F = FA \times \frac{D}{R} \tag{7}$$

Donde:

$F$: $Nuevo\ Factor$

$FA$: $Factor\ Actual$

$D$: $Litros\ Detectados$ (en consola serial)

$R$: $Litros\ Reales$ (cantidad física real)

En este sentido, el valor que se obtuvo en consola serial al hacer circular un litro de líquido fue 0.924 Litros, si bien el valor se acerca bastante al valor real vertido, se procede con el cálculo para aproximar aún más la lectura del sensor. Por lo tanto:

$$F = 7.5 \times \frac{0.924\ L}{1\ L}$$

$$F = 6.93$$

El factor actual que se configura en el código será de 6.93, lo que proporciona una exactitud mayor en las lecturas del sensor.

#### 3.7.4.4 Programación del Nodo Actuador

Esta sección es parte fundamental de la arquitectura del sistema propuesto, el firmware de este Nodo integra funciones de recepción LoRa de comandos remotos que permiten el control de los actuadores y del caudal. El funcionamiento se basa en un esquema maestro-esclavo, el Gateway (maestro) es el encargado de enviar la trama con el tiempo de riego hacia el Nodo Actuador, mismo que ejecuta la operación de carácter no bloqueante, esto garantiza la ejecución al mismo tiempo otros procesos como la medición constante del caudal, activación de las electroválvulas e interrupciones externas.

De esta forma es como el Nodo Actuador proporciona un feedback en términos cuantitativos del sistema automático y la supervisión de los parámetros de control y monitoreo, garantizando la constante comunicación y toma de decisiones autónomas del sistema.

La programación del Nodo sigue una estructura muy similar a la de los anteriores Nodos Sensores en términos de inicialización y configuración de parámetros de la comunicación LoRa ya que se una el mismo microcontrolador. Se puede consultar la sección 3.7.2.4 para revisar las librerías de comunicación y los parámetros de comunicación LoRa usados ya que son los mimos en todos los Nodos.

Una vez definidos los parámetros mencionados en el párrafo anterior, se procede con la definición de los pines de comunicación entre sensores, actuadores y el microcontrolador, se definen dos secciones; pines de caudal y pies de actuadores como se aprecia en la Figura 52.

**Figura 52**

*Declaración de variables del Nodo Actuador*

```
// PINES CAUDAL
// ================================================
#define SENSOR1_PIN 48              // Pin del caudalímetro 1
#define SENSOR2_PIN 47              // Pin del caudalímetro 2

// ================================================
// PINES VALVULAS (ACTUADORES)
// ================================================
#define VALVE1_PIN 5                // Pin de control válvula 1
#define VALVE2_PIN 6                // Pin de control válvula 2
```

Fuente: Autoría

Para la adquisición y procesamiento de los datos recolectados por los sensores de caudal se definen las variables necesarias, en este caso pulseCount1 y pulseCount2 se declaran como volatile ya que son expuestas a modificación en las rutinas de interrupción de los pulsos generados por cada sensor de flujo, esto garantiza que en el proceso no se optimice su valor, si no una lectura correcta y real del programa. A continuación, se declaran los factores de calibración, valor que se calculó mediante la ecuación (7), permitiendo convertir la señal digital del sensor en una magnitud física. Por último, se definen las variables que almacenan el caudal que instantáneo, y las variables que acumulan el volumen total del agua durante cada activación del sistema de riego.

**Figura 53**

*Variables de caudal definidas del Nodo Actuador*

```
// ================================================
// VARIABLES CAUDAL
// ================================================
volatile int pulseCount1 = 0;       // Contador de pulsos del sensor 1
volatile int pulseCount2 = 0;       // Contador de pulsos del sensor 2

float calibrationFactor1 = 6.9;     // Factor de calibración sensor 1
float calibrationFactor2 = 6.9;     // Factor de calibración sensor 2

float flowRate1 = 0.0, flowRate2 = 0.0;       // Caudal instantáneo en L/min
float totalLitres1 = 0.0, totalLitres2 = 0.0; // Volumen total acumulado en litros
```

Fuente: Autoría

La estructura del programa continúa en el void setup se inicializa el Nodo Actuador, esto incluye la configuración de la comunicación LoRa y parte muy importante, la definición de los pines de salida. Los pines asociados los sensores de caudal, se establecen en modo INPUT_PULL, esta función habilita las resistencias internas de polarización estableciendo una detección correcta de los pulsos por flanco descendente. Los pines definidos como OUTPUT permiten controlar el accionamiento de los actuadores.

**Figura 54**

*Definición de Pines de Salida del Nodo Actuador*

```
// Pines
pinMode(SENSOR1_PIN, INPUT_PULLUP);   // Sensor 1 como entrada con pull-up
pinMode(SENSOR2_PIN, INPUT_PULLUP);   // Sensor 2 como entrada con pull-up
pinMode(VALVE1_PIN, OUTPUT);          // Válvula 1 como salida
pinMode(VALVE2_PIN, OUTPUT);          // Válvula 2 como salida

digitalWrite(VALVE1_PIN, LOW);        // Válvula 1 inicialmente apagada
digitalWrite(VALVE2_PIN, LOW);        // Válvula 2 inicialmente apagada

// Configuración de interrupciones por flanco descendente
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR1_PIN), pulseCounter1, FALLING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR2_PIN), pulseCounter2, FALLING);
```

Fuente: Autoría

El void loop inicia con la implementación del control del regadío de forma no bloqueante, esto se define mediante una temporización basada en el parámetro “millis()”, en la variable llamada “now” se guarda el tiempo actual del sistema para después comparar ese tiempo con el instante en que se inició el ciclo de riego, si la diferencia alcanza la duración programada, se desactiva el sistema de riego sin interferir en la operación general del programa. Para lograr esta funcionalidad se cambia la bandera “riegoActivo” a falso lo que apaga los pines que controlan los módulos relé y por ende las electroválvulas traduciendose en el apagado de estos dispositivos como se ve en la Figura 55.

**Figura 55**

*Control de riego basado en temporización*

```
void loop() {
  unsigned long now = millis();   // Tiempo actual del sistema

  // --------------------------------
  // CONTROL DE RIEGO NO BLOQUEANTE
  // --------------------------------
  if (riegoActivo && (now - inicioRiego >= duracionRiego)) {
    riegoActivo = false;              // Desactiva bandera de riego
    digitalWrite(VALVE1_PIN, LOW);    // Apaga válvula 1
    digitalWrite(VALVE2_PIN, LOW);    // Apaga válvula 2

    Serial.println("RIEGO FINALIZADO (tiempo cumplido)");
  }
```

Fuente: Autoría

La medición del caudal se realiza cada 5 segundos por temporización no bloqueante con el fin de preservar el rendimiento del microcontrolador y no interrumpir las demás tareas. El momento en que se cumple el intervalo de tiempo se inhabilita temporalmente las interrupciones pertenecientes a los sensores, evitando fluctuaciones en los contadores durante el procesamiento, asegurando así la lectura de los pulsos.

A posteriori, los valores guardados se copian y se convierten a caudal instantáneo expresado el L/min (Litros por minuto) usando los factores de calibración adecuados, y

finalmente los contadores se reinician actualizando así la referencia temporal, definiendo un ciclo de medición periódico si perder la estabilidad y la precisión en la funcionalidad del Nodo Actuador. Estos parámetros se pueden evidencia en la Figura 56 mostrada a continuación.

**Figura 56**

*Estructura y rutinas de la medición de caudal*

```
if (now - oldTime >= 5000) {     // Cada 5 segundos

  detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR1_PIN));  // Desactiva interrupción 1
  detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR2_PIN));  // Desactiva interrupción 2

  float frequency1 = pulseCount1;  // Copia pulsos sensor 1
  float frequency2 = pulseCount2;  // Copia pulsos sensor 2

  flowRate1 = frequency1 / calibrationFactor1;  // Calcula caudal L/min
  flowRate2 = frequency2 / calibrationFactor2;

  totalLitres1 += flowRate1 / 60.0;  // Acumula litros
  totalLitres2 += flowRate2 / 60.0;

  Serial.println("================================");
  Serial.printf("Caudal 1: %.2f L/min | Total: %.3f L\n", flowRate1, totalLitres1);
  Serial.printf("Caudal 2: %.2f L/min | Total: %.3f L\n", flowRate2, totalLitres2);
  Serial.println("================================");

  pulseCount1 = 0;   // Reinicia contador 1
  pulseCount2 = 0;   // Reinicia contador 2
  oldTime = now;     // Actualiza referencia de tiempo
```

Fuente: Autoría

La siguiente sección de código abarca la rutina de recepción o más conocida como “OnRxDone”, esta sección se encarga de recibir y procesar la orden de riego, es decir el tiempo que el sistema va a activarse dependiendo de las inferencias difusas. Al inicio los datos del paquete con la orden de riego se copian en el buffer “rxpacket” convirtiéndose en una cadena válida para ser interpretada por el sistema. Finalizado el proceso anterior, el sistema verifica que el mensaje enviado desde el Gateway se reciba con la etiqueta “RIEGO@” esto verifica sí que el comando recibido sea la orden de riego y no algún otro comando inválido, en base a este comando recibido se extrae el tiempo en segundos que el sistema decidió.

En caso de que el tiempo sea mayor a cero suceden tres procesos esenciales; primero se activa la bandera de riego, segundo se registra el inicio del regadío y por último se energizan los actuadores, en caso de que el tiempo sea menor o igual a cero, se marca la bandera "lora_idle" como verdadera (true) lo que reinicia la recepción y mantiene al Nodo en modo recepción de una nueva orden de riego. Todo este proceso se evidencia en la sección de código presentada en la Figura 57.

**Figura 57**

*Rutinas de recepción del Nodo Actuador*

```
// RX LORA → ORDEN DE RIEGO
// ================================================
void OnRxDone(uint8_t *payload, uint16_t size, int16_t rssi, int8_t snr) {
  memcpy(rxpacket, payload);         // Copia datos recibidos
  rxpacket[size] = '\0';             // Finaliza cadena

  Serial.println("================================");
  Serial.println("ORDEN RECIBIDA POR LoRa");
  Serial.printf("Mensaje: %s\n", rxpacket);

  if (strncmp(rxpacket, "RIEGO@", 6) == 0) {   // Verifica si es comando de riego
    int tiempo = atoi(rxpacket + 6);           // Extrae tiempo en segundos

    Serial.printf("Tiempo recibido: %d s\n", tiempo);

    if (tiempo > 0) {
      duracionRiego = (unsigned long)tiempo * 1000UL;  // Convierte a ms
      inicioRiego = millis();                          // Guarda inicio

      digitalWrite(VALVE1_PIN, HIGH);  // Enciende válvula 1
      digitalWrite(VALVE2_PIN, HIGH);  // Enciende válvula 2

      Serial.println("RIEGO ACTIVADO");
      Serial.println("Valvulas GPIO5 y GPIO6 ENCENDIDAS");
    } else {
      riegoActivo = false;             // Desactiva riego
      digitalWrite(VALVE1_PIN, LOW);   // Apaga válvula 1
      digitalWrite(VALVE2_PIN, LOW);   // Apaga válvula 2

      Serial.println("RIEGO DESACTIVADO POR COMANDO");
    }
  } else {
    Serial.println("Mensaje recibido no es comando de riego");
  }
```

Fuente: Autoría

Finalmente la rutina “OnTXDone” se ejecuta al final del programa cuando el módulo LoRa da por finalizada la transmisión de los paquetes de datos. La Figura 58 describe las líneas de código fundamentales en esta función, el objetivo principal es confirmar mediante un mensaje en consola Serial el envío y reestablecer internamente el estado del sistema de comunicación. De esta forma la bandera “lora_idle” se reestablece a verdadero (true) indicando que el transceptor se libera y está disponible para futuras operaciones, finalmente sellama a la función “”Radio.Rx(0)” reactivando el modo contínuo de recepción.

**Figura 58**

*Rutina de transmisión final del Nodo Actuador*

```
// TX DONE
// ================================================
void OnTxDone(void) {
  Serial.println("Paquete enviado por LoRa");  // Confirma envío
  lora_idle = true;                            // Marca LoRa libre
  Radio.Rx(0);                                 // Reinicia recepción
}
```

Fuente: Autoría

### 3.7.5 Diseño y Funcionamiento del Gateway

El núcleo principal del sistema definido por la arquitectura es el Gateway, la lógica operativa que se encarga de gestionar la comunicación entre los Nodos, la plataforma de visualización y control en la nube, así como de forma local se concentran en este dispositivo central. En esta sección se describen los criterios de la configuración del microcontrolador LoRa, conectividad inalámbrica y la integración de servicios IoT en la nube como de manera local lo que garantiza la transmisión-recepción y procesamiento confiable de los datos, estableciendo escalabilidad, interoperabilidad y estabilidad del sistema.

Básicamente el Gateway sirve como puente de datos entre los dispositivos finales (Nodos) y los servicios de visualización y procesamiento (ThingerIO y NodeRed) implementado una arquitectura híbrida conocida como Cloud-Edge, esto garantiza la conexión

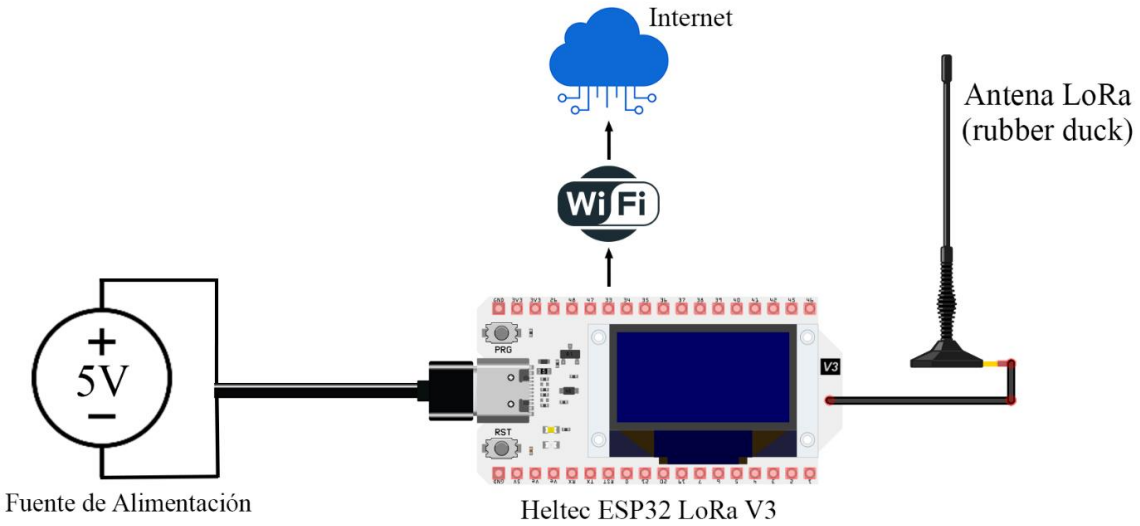
a la Nube mediante HTTP, así como de manera local mediante MQTT, creando un respaldo de datos y visualización que en caso de no disponibilidad de algún servicio está disponible el otro de respaldo.

### 3.7.5.1 Diagrama de Conexión del Gateway

La placa de desarrollo del Gateway es al igual que los demás Nodos la Heltec ESP32 LoRa V3 como se puede observar en la Figura 59, este dispositivo se energiza con 5 voltios proporcionados por una fuente de alimentación conectada a la red eléctrica, en cuanto a la comunicación se establece una conexión hacia Internet mediante la tecnología Wi-Fi incluida en la placa, además se adapta la antena para la comunicación LoRa tipo rubber duck.

**Figura 59**

*Diagrama de Conexión del Gateway*




Fuente: Autoría

### 3.7.5.2 Diagrama de Flujo del Gateway

La lógica operacional del nodo viene definida por el diagrama de flujo presentado en la Figura 60, describe estructuradamente el funcionamiento del sistema central de comunicación.

En el inicio del programa está definido por la declaración de las librerías, parámetros LoRa y las credenciales de configuración de la conexión Wifi seguido de los parámetros de inicialización de la conexión con la nube y el servidor local.

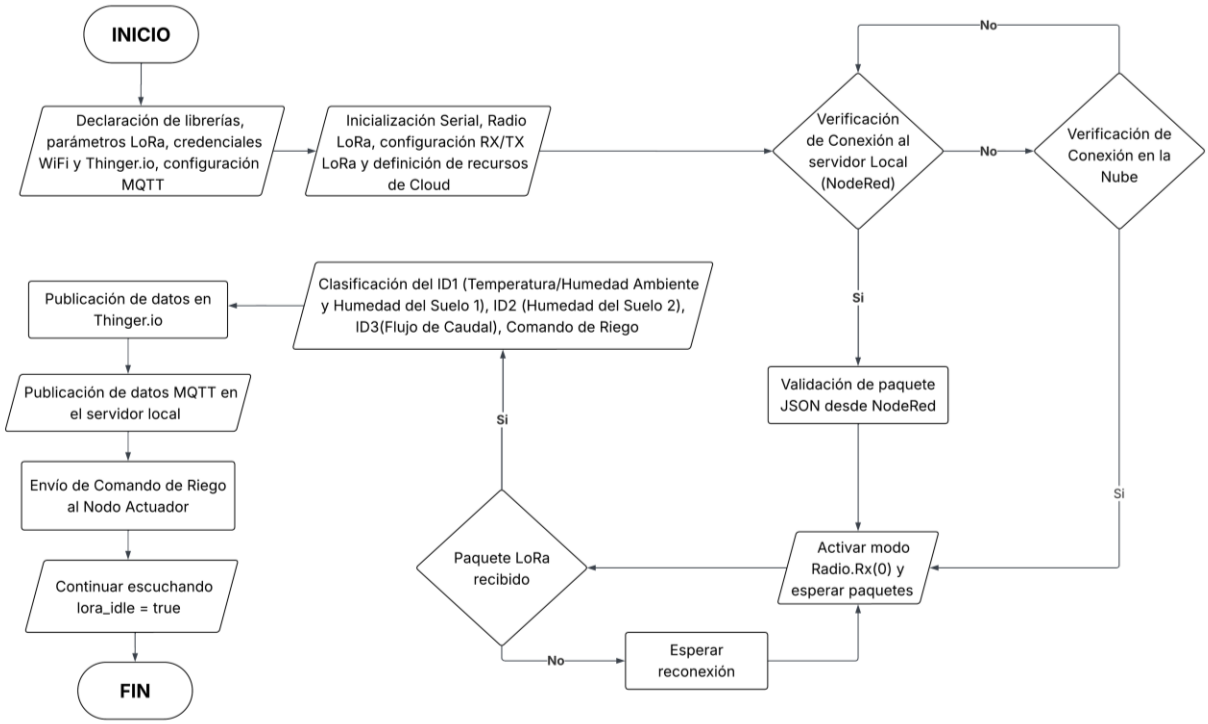
El proceso consecutivo es la inicialización de la comunicación serial, radio LoRa, configuración de funciones de transmisión y recepción y recursos de conexión con la plataforma en la nube. Una vez iniciados los procesos anteriormente mencionados, el Gateway se configura el modo escucha de paquetes MQTT que son enviados desde el servidor local, específicamente desde NodeRed, estos paquetes contienen la orden de riego que se reenvía al Nodo Actuador desde el Gateway.

A continuación, se inicial dos procesos de decisión, esto es lo que garantiza la toma de los datos en caso de que uno de los servicios ya sea local o en la nube falle o no esté disponible, estos procesos crean una redundancia de datos, punto que es importante según los requerimientos del sistema. Cuando se valida la conexión al servidor local, a la nube o bien a ambos el Gateway entra en modo de recepción de paquetes “Radio.Rx(0)” con dos opciones posibles; si no se recibe el paquete, el sistema entra en espera de reconexión y vuelve a activar el modo escucha, por el contrario, si el paquete es recibido, el Gateway clasifica los paquetes con su respectivo ID.

Los ID son las etiquetas de cada paquete que contienen las variables ambientales enviadas por los Nodos Sensores, estas son posteriormente enviadas a la plataforma en la nube, publicados mediante MQTT en NodeRed, aquí es donde se procesa la lógica difusa y el sistema toma decisiones, enviando el comando de riego al Nodo Actuador, una vez realizado este proceso el Gateway establece el modo de recepción a modo activo, estableciendo un componente que garantiza la constante interoperabilidad y disponibilidad de conexión.

**Figura 60**

*Diagrama de Flujo del Gateway*




Fuente: Autoría

### 3.7.5.3 Programación del Gateway

La presente sección describe la estructura lógica de programación del Gateway central, y se explica los elementos fundamentales que componen el código. El Gateway es un eje crítico que compone la arquitectura de la red IoT se desarrolló sobre la Heltec ESP32 LoRa V3 proponiendo una funcionalidad híbrida, permitiendo interoperabilidad entre los servicios en la nube, servicios locales y los nodos.

El firmware del microcontrolador fue diseñado con un enfoque modular, es decir, integra la configuración del dispositivo RX/TX LoRa para las respectivas tramas, la conexión hacia internet mediante Wifi, enlace con la plataforma Thinger.io para la visualización remota y la integración del protocolo MQTT para la comunicación con el servidor local y Node-RED. Ante fallos parciales de conectividad se programaron funciones para la reconexión automática,

procesamiento de datos y continuidad operativa demostrando la capacidad de control y gestión del sistema.

Abordando el inicio del programa, las librerías utilizadas se muestran en la Tabla 34, estos recursos son seis en particular y proporcionan configuraciones desde la conectividad LoRa hasta el manejo de datos en formato JSON, la integración obedece a los requerimientos y funcionalidades del sistema en base a los requerimientos planteados.

**Tabla 34**

*Librerías de programación del Gateway*

| Librería | Propietario |
|---|---|
| LoRaWan_APP.h | Heltec Automation |
| Arduino.h | Arduino |
| WiFi.h | Espressif Systems |
| ThingerESP32.h | Thinger.io |
| PubSubClient.h | Nick O'Leary |
| ArduinoJson.h | Benoit Blanchon |

Fuente: Autoría

De la misma forma la Figura 61 muestra las librerías en el IDE de programación, siguiendo la sintaxis establecida por el lenguaje C++, las seis librerías en cuestión administran las funcionalidades descritas más adelante.

**Figura 61**

*Librerías de programación para el Gateway*

```
#include "LoRaWan_APP.h"      // Librería para manejo del transceptor LoRa en placas Heltec
#include "Arduino.h"          // Núcleo principal de Arduino
#include <WiFi.h>             // Librería para conexión WiFi en ESP32
#include <ThingerESP32.h>     // Librería para conexión con la plataforma Thinger.io
#include <PubSubClient.h>     // Librería para cliente MQTT
#include <ArduinoJson.h>      // Librería para manejo y parseo de datos en formato JSON
```

Fuente: Autoría

En este caso por cuestiones prácticas y no redundar en explicaciones que anteriormente se mencionaron, los parámetros de configuración LoRa se pueden revisar en la sección 3.7.2.4 ya que al usar los mismos microcontroladores los parámetros se configuran igual, a excepción de la potencia de transmisión que se establece en 20 dBm.

A continuación, se declaran las funciones para la conectividad tanto Wifi, servicios en la nube y servidor local, en el caso de las funciones de Thinger.io se solicita el Usuario, Device ID y la credencial del dispositivo, por otra parte, para la conexión Wifi se establece el SSID de la red, así como la contraseña siguiendo la respectiva sintaxis y por último se agrega las funciones y credenciales referente al servicio de MQTT, siendo estas la ip del servidor, el puerto, usuario y contraseña. Como se muestra en la Figura 62, estos parámetros se ocultan para preservar la integridad y seguridad del sistema.

**Figura 62**

*Funciones y credenciales de conexión en el Gateway*

```
// ================================================
// THINGER.IO
// ================================================
#define USERNAME "te                    // Usuario de Thinger.io
#define DEVICE_ID "GatewayLora"         // ID del dispositivo en Thinger.io
#define DEVICE_CREDENTIAL "+sfc         // Credencial del dispositivo

// ================================================
// WIFI
// ================================================
#define SSID "Saitel_Cisco Router"      // Nombre de la red WiFi
#define SSID_PASSWORD "                 // Contraseña de la red WiFi

// ================================================
// MQTT CONFIG (NODE-RED LOCAL)
// ================================================
#define MQTT_SERVER "192.168.0.111"     // Dirección IP del broker MQTT local
#define MQTT_PORT   1883                // Puerto del broker MQTT
#define MQTT_USER   "                   // Usuario MQTT (vacío si no requiere)
#define MQTT_PASS   "                   // Contraseña MQTT (vacío si no requiere)
```

Fuente: Autoría

Secuencialmente, se realiza el control MQTT, función que permite controlar y validar las reconexiones mediante un tiempo en específico. Conjuntamente mediante la función de

callback establecida el Gateway central recepta los mensajes del tópico correspondiente a la orden de riego generada en Node-RED, se reconstruye el payload y el decodificado del formato JSON validando la estructura. Posteriormente, si la orden pertenece a la activación del riego, el tiempo recibido se verifica, lo que construye una trama tipo LoRa que se envía hacia el Nodo Actuador, garantizando la comunicación en ambas direcciones dentro de la arquitectura propuesta.

**Figura 63**

*Callback MQTT de Rx y validación de comando de riego*

```
void mqttCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {

  String msg;  // Variable para reconstruir el mensaje recibido

  for (int i = 0; i < length; i++)
    msg += (char)payload[i];  // Conversión de bytes a String

  Serial.printf(" MQTT [%s]: %s\n", topic, msg.c_str()); // Muestra mensaje recil

  StaticJsonDocument<128> doc; // Documento JSON estático
  DeserializationError error = deserializeJson(doc, msg); // Parseo del JSON

  if (error) {
    Serial.println(" JSON inválido"); // Error si el JSON no es válido
    return;
  }

  if (doc["cmd"] == "riego") { // Si el comando es riego

    int tiempoRiego = (int) doc["tiempo"]; // Obtiene tiempo de riego

    if (tiempoRiego <= 0) {
      Serial.println(" Tiempo de riego inválido"); // Validación del tiempo
      return;
    }

    char loraMsg[32];
    sprintf(loraMsg, "RIEGO@%d", tiempoRiego); // Construye mensaje para LoRa

    Serial.printf(" LoRa → Actuador: %s\n", loraMsg); // Muestra mensaje enviado

    Radio.Sleep(); // Coloca radio en modo reposo antes de transmitir
    Radio.Send((uint8_t*)loraMsg, strlen(loraMsg)); // Envía mensaje por LoRa
    lora_idle = false; // Marca LoRa como ocupado
```

Fuente: Autoría

El Gateway una vez que se conecta a la plataforma Node-RED mediante MQTT procede a publicar los datos con los respectivos tópicos como se observa en la Figura 64, en base a los datos de los sensores se realiza la inferencia de la lógica difusa mediante funciones en el Flujo creado en la plataforma local.

**Figura 64**

*Tópicos de Publicación generados en el Gateway*

```
void publishMQTT() {

  if (!mqttConnected) return; // Solo publica si está conectado

  char payload[160]; // Buffer para mensajes JSON

  sprintf(payload,
          "{\"Humedad\":%.2f,\"Temp\":%.2f,\"Suelo\":%d}",
          hmd1, tmp1, suelo1); // Construye JSON Nodo 1
  mqttClient.publish("gateway/nodo1/data", payload); // Publica datos Nodo 1

  sprintf(payload, "{\"Suelo\":%.2f}", suelo2); // JSON Nodo 2
  mqttClient.publish("gateway/nodo2/data", payload); // Publica datos Nodo 2

  sprintf(payload,
          "{\"F1\":%.2f,\"F2\":%.2f,\"T1\":%.3f,\"T2\":%.3f}",
          flow1, flow2, total1, total2); // JSON Nodo 3
  mqttClient.publish("gateway/nodo3/data", payload); // Publica datos Nodo 3
}
```

Fuente: Autoría

La Figura 65 muestra el proceso del envío hacia la plataforma de Thinger.io para cumplir con el requerimiento de monitoreo remoto. Haciendo uso de las variables asociadas a cada recurso, es decir, la información en formato tipo JSON en la que es envía los datos de los sensores correspondientes a variables de temperatura/humedad ambiente, humedad del suelo y caudal.

Esta configuración interactúa en la comunicación entre el Gateway y la plataforma en la Nube respaldando la disponibilidad de los datos en tiempo real para el monitoreo y análisis respectivo.

**Figura 65**

*Formato de envío de datos de sensores hacia Thinger.io*

```
thing["Nodo1"] >> [](pson &out){
  out["Humedad"] = hmd1;
  out["Temperatura"] = tmp1;
  out["Suelo"] = suelo1;
};

thing["Nodo2"] >> [](pson &out){
  out["Suelo"] = suelo2;
};

thing["Nodo3"] >> [](pson &out){
  out["Flow1"] = flow1;
  out["Flow2"] = flow2;
  out["Total1"] = total1;
  out["Total2"] = total2;
};
```

Fuente: Autoría

La función correspondiente al “void loop ()” es el centro operativo del Gateway, es por lo que gestiona de manera continua la comunicación y sincronización del sistema. Inicialmente se pone en marcha activa la conexión con la plataforma de gestión en la Nube con la función “thing.handle()” para posteriormente verificar y mantener el cliente MQTT en el servidor de maneral local. Publicar periódicamente los datos es parte fundamental para preservar el procesamiento del microcontrolador y la ejecución inicial, esto se realiza mediante la función “millis ()”.

Por último, el estado del módulo LoRa es supervisado para cambiar de estado de recepción activo en el momento en que se encuentre disponible y procesar las interrupciones haciendo uso de la función “Radio.IrqProcess()” validando que los eventos sean no bloqueantes durante la comunicación inalámbrica y no incurrir en desbordamiento del procesamiento o saturación del canal LoRa, el código de esta implementación se muestra en la Figura 66.

**Figura 66**

*Gestión de comunicación y eventos del Gateway*

```
void loop() {

  thing.handle(); // Mantiene conexión con Thinger.io

  reconnectMQTT(); // Verifica y reconecta MQTT si es necesario
  mqttClient.loop(); // Mantiene activo el cliente MQTT

  static unsigned long lastPub = 0; // Control de tiempo de publicación
  if (millis() - lastPub > 5000) {  // Cada 5 segundos
    publishMQTT();                  // Publica datos por MQTT
    lastPub = millis();
  }

  if (lora_idle) {  // Si LoRa está libre
    lora_idle = false;
    Radio.Rx(0);    // Activa modo recepción continuo
  }

  Radio.IrqProcess(); // Procesa interrupciones del módulo LoRa
}
```

Fuente: Autoría

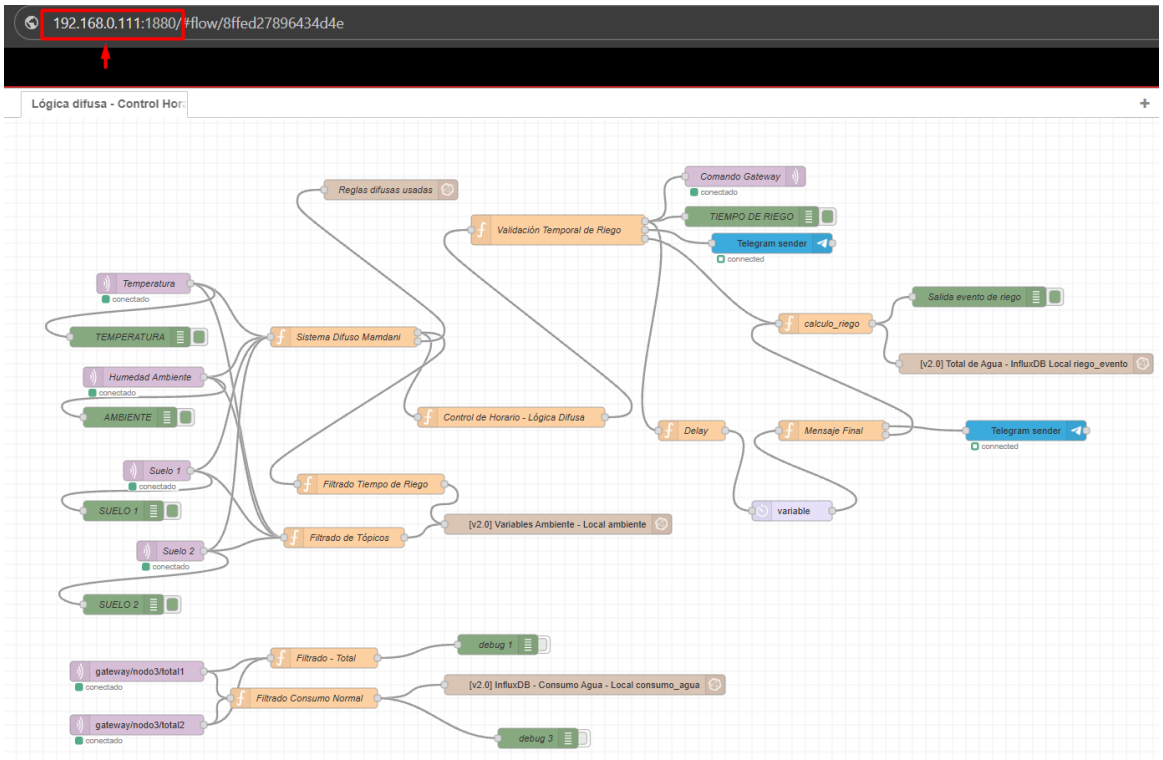
### 3.7.5.4. Conexión Local hacia Node-Red

La presente sección es fundamental en el bloque de procesamiento de los datos obtenidos de los sensores, a través de una arquitectura cliente-servidor, se permite la gestión y supervisión de los datos mediante una interfaz basada en flujos.

El núcleo de procesamiento local se integra con funciones de verificación, validación y control, como se observa en la Figura 67, los datos de los sensores ingresan mediante MQTT hacia una función que procesa la lógica difusa que contiene las reglas establecidas, a continuación, se establecen dos funciones; una función de control horario y otra de validación temporal que serán descritos más adelante. Por último, el sistema de procesamiento local contempla dos salidas fundamentales; la primera envía el comando de la orden de riego mediante una función “mqttout” y la segunda función envía una notificación hacia Telegram, cumpliendo con los requerimientos establecidos del sistema.

**Figura 67**

*Flujo de procesamiento del sistema en Node-RED*



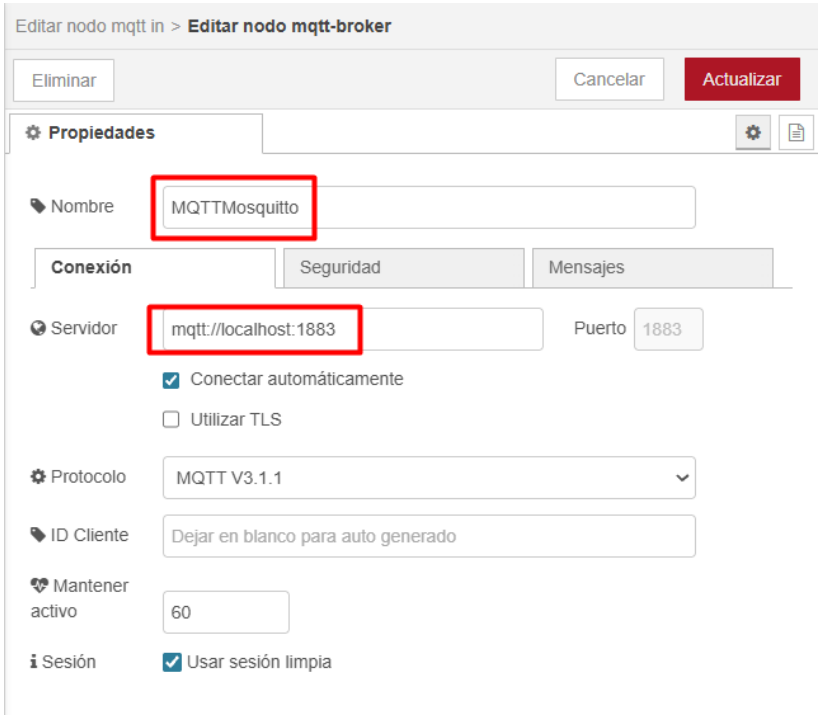

Fuente: Autoría

La estructura de los flujos inicia con la adquisición de los datos de los sensores mediante el protocolo MQTT, para esto se instaló el broker MQTT Mosquitto, y se integra a Node-RED como servidor, como se presenta la Figura 68, se define la ruta de conexión, en este caso la dirección mqtt://localhost:1883; esto indica que el equipo local es el anfitrión y opera por el puerto 1883, puerto que comúnmente es utilizado para el protocolo en cuestión, además las propiedades del protocolo en su versión 3.1.1.

El reconocimiento de la versión del broker MQTT es de suma importancia, ya que si se especifica o configura una versión diferente, los datos no llegan a ser recibidos por la plataforma.

**Figura 68**

*Parámetros del Servidor MQTT en Node-RED*



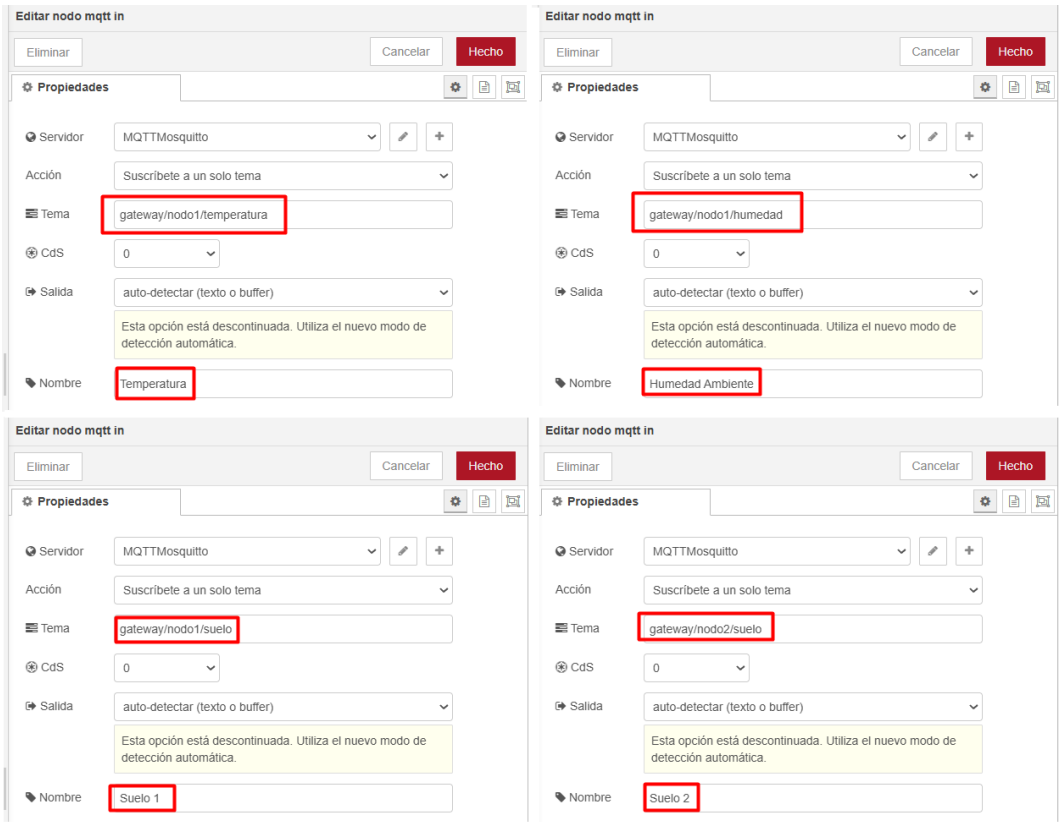

Fuente: Autoría

Tras haber configurado el servidor, es pertinente estructurar los nodos “mqtt in” para cada variable ambiental, en este contexto se establecen los parámetros que requiere el nodo, es decir, el servidor (configurado en la sección anterior), acción, tema o tópico.

La acción seleccionada es Suscribirse a un solo tema, y se hace referencia a que el nodo de entrada toma un rol de cliente suscriptor ante el servidor MQTT y se indica al sistema que va a recibir mensajes de una única ruta o tema, este parámetro es básicamente la estructura con que se emite cada dato desde el Gateway hacia el servidor local, se estableció para cada variable. La Figura 69 expone los temas correspondientes a cada variable ambiental, para la temperatura ambiental (gateway/nodo1/temperatura), humedad ambiental (gateway/nodo1/humedad), humedad del suelo del Nodo 1 (gateway/nodo1/suelo), humedad del suelo Nodo 2 (gateway/nodo2/suelo).

**Figura 69**

*Configuración mqtt in de las variables de entrada*




Fuente: Autoría

- **Función Sistema Difuso Mamdani**

Esta función es el núcleo del sistema de procesamiento inteligente de riego mediante un conjunto de reglas difusas que se basan en el modelo Mamdani. La función se encarga del procesamiento de las variables ambientales de entrada, como son temperatura/humedad ambientales y humedad del suelo normalizadas en el proceso anterior, se aplica un mecanismo de inferencia difusa min-max y la etapa de defuzzificación calculando el tiempo de riego adecuado traduciendo las condiciones imprecisas en control cuantificable frente a escenarios de incertidumbre que son normales en este tipo de sistemas inteligentes. A continuación, se explica el código de la función probado y funcional adaptado al sistema.

La Figura 70 ilustra la sección de código de la etapa de toma, sincronización y definición de las funciones de pertenencia del sistema difuso Mamdani. La primera sección del código se encarga de identificar el origen de cada mensaje en base al topico, además almacena los valores numéricos de las variables ambientales TMP, HA, HS1 y HS2, esto garantiza que temporalmente estén disponibles para realizar el control difuso. Al disponer de dos variables ambientales iguales como lo son la humedad del suelo, se calcula un valro promedio entre ambas para proporcionar al sistema más precisión y valores estables. A continuación, se declaran las unciones de pertenencia, estas pueden ser triangulares (tri) o trapezoidales (trap) y se definieron en la sección 3.6.3.

**Figura 70**

*Toma de variables y Funciones de Pertenencia en Node-RED*

```
/* SISTEMA DIFUSO MAMDANI */

if(msg.topic.includes("temperatura")) context.set("TMP", Number(msg.payload));
if(msg.topic.includes("humedad")) context.set("HA", Number(msg.payload));
if(msg.topic.includes("nodo1/suelo")) context.set("HS1", Number(msg.payload));
if(msg.topic.includes("nodo2/suelo")) context.set("HS2", Number(msg.payload));

let TMP=context.get("TMP"), HA=context.get("HA"), HS1=context.get("HS1"), HS2=context.get("HS2");
if([TMP,HA,HS1,HS2].includes(undefined)) return null;

let HS=(HS1+HS2)/2;

function tri(x,a,b,c){if(x<=a||x>=c)return 0;if(x==b)return 1;return x<b?(x-a)/(b-a):(c-x)/(c-b)}
function trap(x,a,b,c,d){if(x<=a||x>=d)return 0;if(x>=b&&x<=c)return 1;return x<b?(x-a)/(b-a):(d-x)
```

Fuente: Autoría

La continuación del código de la función corresponde a la fuzzificación, en esta sección las variables de entrada se convierten en conjuntos lingüísticos, cada uno con sus grados de pertenencia. Los rangos establecidos corresponden a los definidos en la sección 3.6.3, específicamente en la Tabla 27.

En el código, para cada propiedad del objeto se encarga de almacenar el grado de pertenencia de la categoría en específico, esto modela la matemática propia de las condiciones ambientales. De esta forma las variables están preparadas para la inferencia en base a las reglas

donde se aplica la decisión de control del sistema. En la Figura 71 mostrada a continuación presenta las funciones de pertenencia respectivas para el sistema difuso.

**Figura 71**

*Implementación en código de las Funciones de Pertenencia*

```
let TMPf = {
    G: trap(TMP, 0, 0, 6, 12),
    F: tri(TMP, 6, 12, 18),
    TE: tri(TMP, 15, 20, 26),
    AB: tri(TMP, 24, 30, 36),
    C: trap(TMP, 34, 38, 45, 45)
};

let HAf = {
    IN: trap(HA, 0, 0, 10, 20),
    AM: tri(HA, 10, 20, 35),
    AR: tri(HA, 30, 45, 60),
    PM: tri(HA, 55, 70, 85),
    PC: trap(HA, 80, 90, 100, 100)
};


let HSf = {
    SE: trap(HS, 0, 0, 15, 30),
    S: tri(HS, 20, 35, 55),
    H: tri(HS, 45, 60, 80),
    SA: tri(HS, 70, 85, 95),
    O: trap(HS, 90, 95, 100, 100)
};
```

Fuente: Autoría

Siguiendo con la estructura del código, la siguiente sección constituye la matriz computacional de la inferencia concebida en el diseño teórico como se ilustra en la Figura 72. Cada arreglo representa las reglas difusas y componen un vector que estructura cuatro componentes; temperatura, humedad ambiental, humedad del suelo (promedio) y el tiempo de riego. De esta manera las 44 reglas borrosas constituyen el núcleo lógico en el proceso de inferencia y se permitirá calcular la salida del sistema en base a los grados de pertenencia compuestos en la fuzzificación.

**Figura 72**

*Codificación de la Base de datos de las reglas borrosas*

```
let rules = [

    ['G', 'IN', 'SE', 'E'],['F', 'AR', 'SE', 'E'],['TE', 'PM', 'SE', 'E'],['AB', 'AR', 'SE', 'E'],
    ['C', 'IN', 'SE', 'E'],['G', 'PM', 'S', 'B'],['F', 'AR', 'S', 'B'],['TE', 'PM', 'S', 'M'],
    ['AB', 'AM', 'S', 'M'],['C', 'IN', 'S', 'E'],['G', 'PC', 'H', 'N'],['F', 'PM', 'H', 'MB'],
    ['TE', 'PM', 'H', 'MB'],['AB', 'AR', 'H', 'B'],['C', 'IN', 'H', 'B'],['G', 'PC', 'SA', 'N'],
    ['F', 'PM', 'SA', 'N'],['TE', 'AR', 'SA', 'N'],['AB', 'AR', 'SA', 'MB'],['C', 'IN', 'SA', 'MB'],
    ['G', 'PC', 'O', 'N'],['F', 'PM', 'O', 'N'],['TE', 'PM', 'O', 'N'],['AB', 'AR', 'O', 'N'],
    ['C', 'IN', 'O', 'N'],['TE', 'AR', 'S', 'M'],['TE', 'AR', 'H', 'B'],['AB', 'PM', 'S', 'M'],
    ['AB', 'PM', 'H', 'B'],['F', 'PM', 'S', 'MB'],['C', 'AR', 'S', 'E'],['TE', 'AM', 'S', 'M'],
    ['AB', 'AM', 'H', 'B'],['F', 'AM', 'SE', 'E'],['G', 'AR', 'SE', 'E'],['F', 'PC', 'S', 'MB'],
    ['TE', 'PC', 'S', 'MB'],['AB', 'PC', 'S', 'B'],['AB', 'IN', 'H', 'B'],['AB', 'IN', 'H', 'B'],
    ['TE', 'AM', 'SE', 'E'],['AB', 'IN', 'SE', 'E'],['AB', 'IN', 'SA', 'N'],['TE', 'AM', 'SA', 'N']

];
```

Fuente: Autoría

La etapa de inferencia difusa corresponde a la sección de código implementada en Node-RED que se muestra en la Figura 73, en esta parte se evalúan las reglas definidas en la sección anterior con el fin de establecer o determinar el grado de activación de los conjuntos de salida. Inicialmente el objeto “out” guarda el nivel de activación de cada variable lingüística perteneciente al Tiempo de Riego, en este caso (N, MB, B, M, E) las mismas que se inicializan en cero. Consecuentemente, por medio de iteraciones sobre las reglas, es calculado el grado de disparo (mu) perteneciente a cada regla empleando el operador mínimo (AND) y tomando en cuenta los grados de pertenencia.

El arreglo “reglasActivadas” guarda las reglas que son activadas, en tanto que “reglaDominante” realiza la identificación de la regla con mayor grado de pertenencia y el sistema recorre de manera secuencial todas las reglas difusas en la base de conocimiento con la función “rules.forEach”. Para cada regla el grado de activación μ es calculado mediante el operador mínimo “Math.min” que representa la conjunción lógica AND del método de inferencia Mamdani.

**Figura 73**

*Proceso de Inferencia Difusa en Node-RED*

```
// ===== INFERENCIA =====

let out = { N: 0, MB: 0, B: 0, M: 0, E: 0 };
let reglasActivadas = [];
let reglaDominante = { numero: 0, mu: 0, texto: "" };

rules.forEach((r, i) => {

    let mu;

    if (r[1] === "ANY") {
        mu = Math.min(TMPf[r[0]], HSf[r[2]]);
    } else {
        mu = Math.min(TMPf[r[0]], HAf[r[1]], HSf[r[2]]);
    }

    if (mu > 0) {
        let texto = `Regla ${i + 1}: IF TMP=${r[0]} AND HA=${r[1]} AND HS=${r[2]} THEN WR=${r[3]} (μ=${mu.toFixed(3)})`;
        reglasActivadas.push(texto);

        if (mu > reglaDominante.mu) {
            reglaDominante = {
                numero: i + 1,
                mu: mu,
                texto: texto
            };
        }
    }

    out[r[3]] = Math.max(out[r[3]], mu);
});
```

Fuente: Autoría

La sección final corresponde a la etapa de defuzzificación del sistema, y la estructura de salida que será reenviada al Nodo Actuador por medio del Gateway mediante MQTT. En esta etapa se emplea el método del centroide que convierte la salida difusa en un valor numérico que corresponde al tiempo de riego. Para esto, el sistema recorre el universo de discurso, desde los 0 hasta los 3600 segundos con una resolución que se define por una variable de "paso", esta variable representa el intervalo con el que el sistema recorre el rango de valores en el proceso de defuzzificación, en la Figura 74 se representa con el valor de 1 segundo lo que indica al sistema que el cálculo se realiza cada segundo proporcionando una mayor precisión del tiempo de riego.

Cada iteración calcula el grado de pertenencia agregado μ con los operadores máximos y mínimos esto combina tanto las salidas difusas (N, MB, B, M y E) con las respectivas

funciones de membresía. A continuación los valores necesarios para el cálculo del centroide se acumulan en las variables “num” y “den”. En caso de no existir activación de reglas difusas se aplica (den = = 0), en este caso el sistema asigna un valor mínimo de 60 segundos, por el contrario calcula el tiempo final de riego mediante la relación num/den.

Por último, se construye un mensaje MQTT con el tópico “gateway/cmd” y una carga útil que transmite el tiempo de riego calculado hacia el Gateway activando el sistema.

**Figura 74**

*Proceso de Defuzzificación y mensaje de control MQTT hacia el Gateway*

```
// ===== DEFUZZIFICACIÓN COMPLETA =====
let num = 0;
let den = 0;
// Resolución (ajustar)
let paso = 1;

for (let x = 0; x <= 3600; x += paso) {

    let mu = Math.max(
        Math.min(out.N, muN(x)),
        Math.min(out.MB, muMB(x)),
        Math.min(out.B, muB(x)),
        Math.min(out.M, muM(x)),
        Math.min(out.E, muE(x))
    );
    num += x * mu;
    den += mu;
}

let t;
if (den === 0) {
    node.warn("⚠ Ninguna regla difusa activada");
    t = 60;
} else {
    t = Math.round(num / den);
}
node.warn("Defuzzificación completa activada");

// ===== SALIDA MQTT =====
msg.topic = "gateway/cmd";
msg.payload = {
    cmd: "riego",
    tiempo: t
```

Fuente: Autoría

- **Función Control de Horario**

Esta función permite controlar el horario en que va a actuar el sistema de riego en base a la decisión del sistema difuso empleando una restricción temporal, esto da paso a que la ejecución de control difuso esté programada por días y horas en específico. La Figura 75 ilustra

el código implementado en esta función, primero se definen los parámetros correspondientes a los días de operación implementado una representación numérica del objeto “Date” en JavaScript. Después, el sistema toma la hora y fecha actual del servidor para evaluar dos condiciones: cumplimiento del intervalo de hora definido y verificación del día al conjunto autorizado. Si las dos condiciones se cumplen, el mensaje resultante continúa a las siguientes funciones, caso contrario el proceso es interrumpido, evitando la activación del riego fuera de los horarios programados. De esta forma se integra una capa de control adicional garantizando los criterios de diseño y requerimientos del sistema.

**Figura 75**

*Implementación del Control Horario en Node-RED*

```
// Configuración de días
const diasPermitidos = [4];
// 0=Domingo, 1=Lunes ... 6=Sábado

// Definir horas y minutos
const horaInicio = 19;
const minutoInicio = 15;

const horaFin = 20;
const minutoFin = 15;

// Hora actual
let ahora = new Date();
let dia = ahora.getDay();
let hora = ahora.getHours();
let minuto = ahora.getMinutes();

// Convertir todo a minutos (más preciso)
let tiempoActual = hora * 60 + minuto;
let tiempoInicio = horaInicio * 60 + minutoInicio;
let tiempoFin = horaFin * 60 + minutoFin;

// Validación
let diaOK = diasPermitidos.includes(dia);
let horaOK = tiempoActual >= tiempoInicio && tiempoActual < tiempoFin;

if (diaOK && horaOK) {
    return msg;
} else {
    node.warn("⏱ Fuera de horario de riego");
    return null;
}
```

Fuente: Autoría

- **Función Validación Temporal de Riego**

Esta función representa la validación de la estructura del mensaje de control, aquí se garantiza la integridad del comando previo a autorizar el riego. En la Figura 76 se muestra la primera sección del código de esta función, y empieza verificando que el objeto *msg.payload*

tenga las propiedades de cmd y tiempo, esto es lo que garantiza que el mensaje tenga la estructura JSON esperada. A continuación, el código realiza una verificación del comando recibido con la instrucción *riego* y que el valor que se asocia a este parámetro sea numérico y válido.

En caso de no cumplirse estas condiciones, el flujo del programa se detiene y retorna un valor *null* realizando una advertencia, esto introduce otro mecanismo de protección ante datos incompletos o errores de transmisión.

**Figura 76**

*Estructura de Validación del Payload*

```
// ===== VALIDAR PAYLOAD =====
if (!msg.payload.hasOwnProperty("cmd") ||
    !msg.payload.hasOwnProperty("tiempo")) {
    node.warn("JSON incompleto");
    return null;
}

if (!msg.payload.cmd || !msg.payload.tiempo) {
    node.warn("JSON incompleto");
    return null;
}

if (msg.payload.cmd !== "riego") {
    node.warn("Comando distinto de riego");
    return null;
}

let t = Number(msg.payload.tiempo);

if (isNaN(t) || t < TIEMPO_MIN) {
    node.warn("Tiempo de riego inválido: " + t);
    return null;
}
```

Fuente: Autoría

Siguiendo con la estructura del código, la sección mostrada en la Figura 77 provee un mecanismo de bloqueo temporal, esta parte evita que el sistema tenga activaciones consecutivas en un intervalo establecido. La variable *lockUntil* almacena la variable que indica al sistema el tiempo que debe permanecer inactivo y se compara con el tiempo actual que se obtiene mediante *Date.now().* Si la hora actual es menor que el límite que se almacenó, el flujo retorna un valor *null* indicando la hora hasta la cual el riego permanece bloqueado.

La capa introducida en esta sección es de seguridad operativa referente a evitar sobre irrigación, solapamiento de tiempos y control sobre los ciclos de riego.

**Figura 77**

*Bloqueo Temporal para Prevención de Riegos Repetitivos*

```
let lockUntil = context.get("lockUntil") || 0;
let now = Date.now();

if (now < lockUntil) {
    node.warn(
        "Riego bloqueado hasta: " +
        new Date(lockUntil).toLocaleTimeString()
    );
    return null;
}
```

Fuente: Autoría

Para activar formalmente el periodo de bloqueo y confirmación del riego se actualiza la variable *lockUntil,* sumando al tiempo actual el intervalo que se define por (BLOQUEO_MS) generando así un periodo de inactividad obligatorio. Posteriormente, el mensaje informativo con la aprobación del riego y el tiempo en segundos se compone para mostrarse en el debug. Finalmente, se estructura un objeto tipo (mqttMsg), preservando el payload y topic originales, garantizando la integridad del mensaje previo a su envío al broker MQTT y en reenvío del Gateway hacia el actuador.

**Figura 78**

*Estructura lógica del periodo de bloqueo y confirmación de comando de riego*

```
// ===== ACTIVAR BLOQUEO =====
context.set("lockUntil", now + BLOQUEO_MS);

node.warn("ORDEN DE RIEGO APROBADA: " + t + " s");

// ================================
// SALIDA 1 → MQTT (SIN CAMBIOS)
// ================================
let mqttMsg = {
    topic: msg.topic,
    payload: msg.payload   // JSON original intacto
};
```

Fuente: Autoría

- **Conexión a la base de datos InfluxDB**

EL almacenamiento de datos local es un requerimiento del sistema para tener respaldo de los datos en caso de que a conexión a la Nube falle o no se encuentre disponible. La integración de Node-RED con InfluxDB garantiza este requerimiento implementando un flujo que toma los datos de ingreso de los tópicos, se filtran y posteriormente se envían a la base de datos.

Como se muestra en la Figura 79, el código de esta función inicia separando la cadena del tópico MQTT, esto permite extraer cada variable en específico. El valor obtenido en msg.payload se transforma a un valor tipo numérico garantizando la compatibilidad con la base de datos de series temporales. Y como última instancia se construye un objeto tipo JSON en el que, la etiqueta de la variable se usa como clave y el valor como dato asociado, estableciendo una estructura bien definida para el registro en InfluxDB.

**Figura 79**

*Filtrado de tópicos para registro de variables en InfluxDB*

```
// Separar el topic
let partes = msg.topic.split("/");

// gateway/nodo1/temperatura
let variable = partes[2];

// Convertir SIEMPRE a número
let valor = Number(msg.payload);

// Crear objeto para Influx
msg.payload = {
    [variable]: valor
};

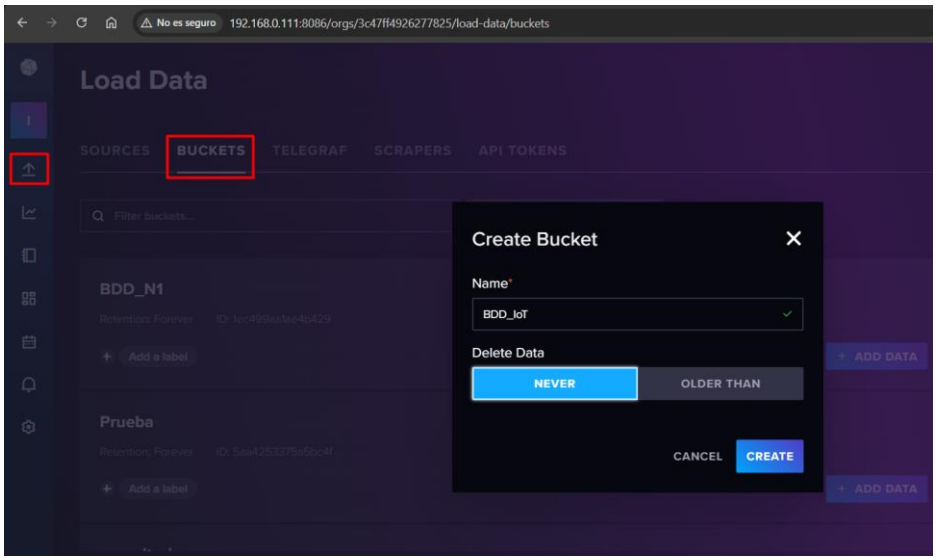
return msg;
```

Fuente: Autoría

Se ingresa a la interfaz de gestión de InfluxDB para crear la base de datos y generar las credenciales correspondientes que se configuran en Node-RED. En este caso se le asigna el nombre de BDD_IoT como se muestra en la Figura 80.

**Figura 80**

*Creación de la base de datos en InfluxDB*

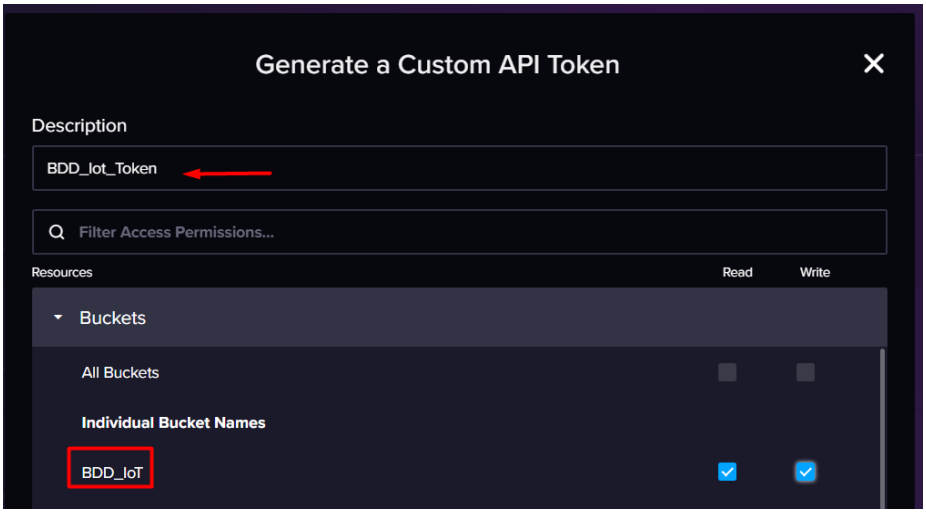



Fuente: Autoría

A continuación, se genera el Token de acceso que permitirá enlazar la base de datos con Node-Red, dando permisos de lectura y escritura a la base de datos creada anteriormente. La Figura 81 permite comprobar este proceso, el Token generado se debe guardar para utilizarlo en la integración con la plataforma de gestión.

**Figura 81**

*Generación de permisos y Token de la base de datos*

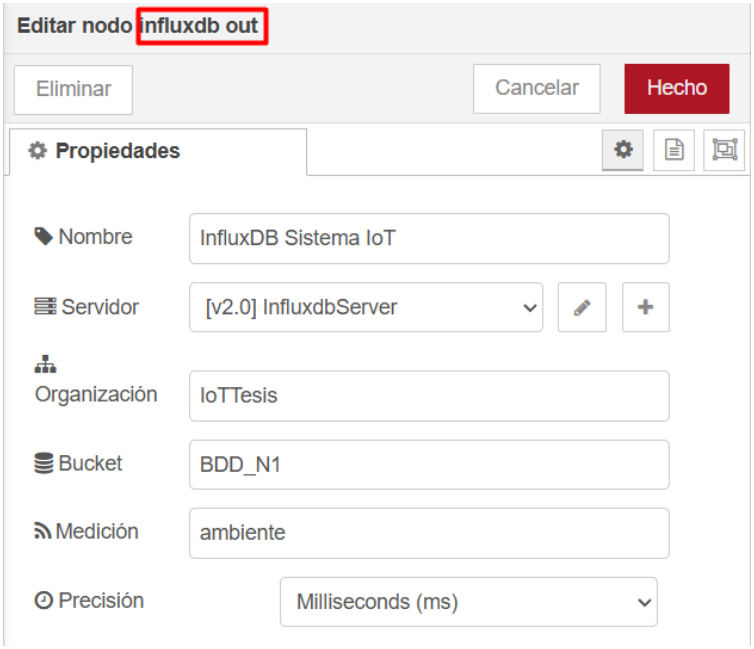



Fuente: Autoría

Para realizar la conexión con el flujo de Filtrado de Tópicos, se emplea la función influxdb out, aquí se configura la etiqueta del nodo, el servidor (que se detalla en el siguiente párrafo), la organización, nombre de Bucket y la etiqueta de medición.

**Figura 82**

*Configuración del nodo influxdb out*




Fuente Autoría

El servidor se configura editando el campo correspondiente, la configuración requiere un nombre, la versión del servidor que en este caso es el 2.0, la dirección de red que hace referencia al local host en el puerto 8086 usado por InfluxDB y el token que se generó de la correspondiente base de datos.

La Figura 82 muestra los campos correspondientes con los parámetros requeridos. Es pertinente señalar que si realiza un respaldo del flujo de Node-RED, los tokens no se incluyen, por lo que se debe considerar realizar un respaldo de estos en un archivo de texto plano.

**Figura 83**

*Credenciales de configuración del servidor de InfluxDB*

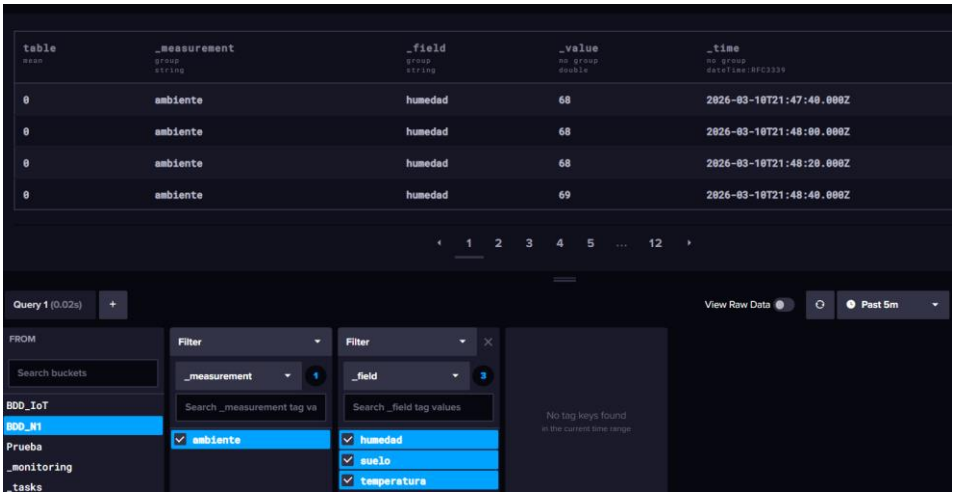



Fuente: Autoría

El resultado de la configuración y después de instanciar los flujos en Node-RED, es la visualización en la interfaz de monitoreo de InfluxDB los datos obtenidos y que se están almacenando, visualizados en la Figura 84.

**Figura 84**

*Registro de datos en InfluxDB*




Fuente: Autoría

Este procedimiento se realiza para la creación de las demás bases de datos necesarias que requiera el proyecto.

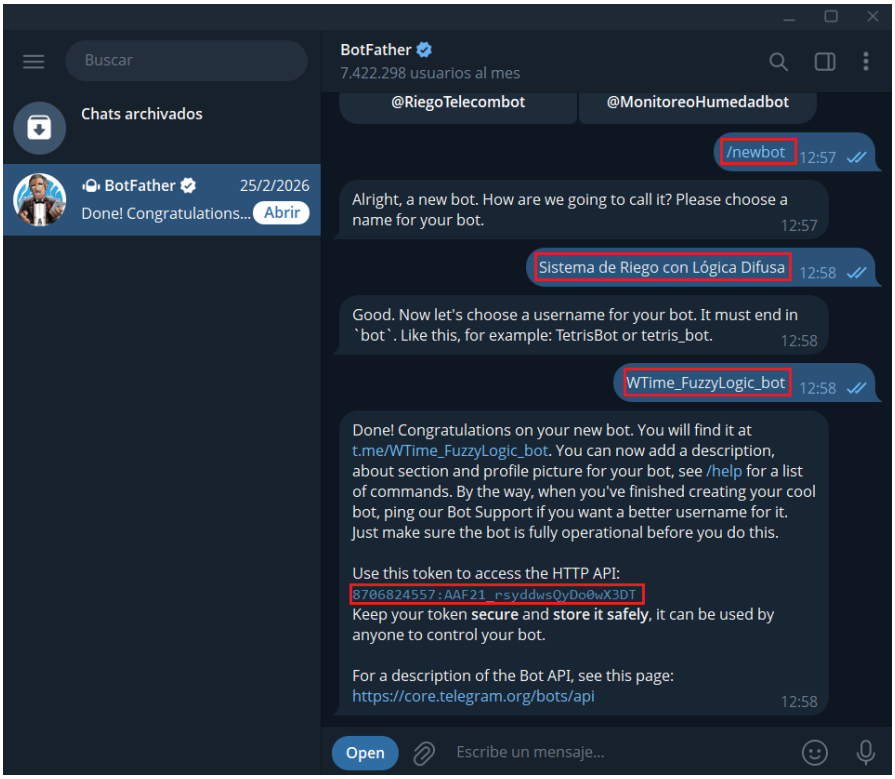
- **Configuración de Alertas mediante Telegram**

Parte integral del sistema es la alerta o notificación mediante mensajes hacia una aplicación de mensajería móvil, mediante un Bot de Telegram, específicamente “BotFather”, se procede a crear un nuevo, iniciando el chat con el comando “/newbot”, se solicita que se defina un nombre para el nuevo bot, en este caso se establece como “Sistema de Riego con Lógica Difusa” y finalmente la aplicación solicita que se ingrese un nombre de usuario, el cual es “WTime_FuzzyLogic_bot”.

Una vez que se completa el registro, BotFather devuelve un Token que se utilizará en la configuración de Node-RED usando los nodos correspondientes a Telegram. El proceso anteriormente descrito se puede visualizar en la Figura 85.

**Figura 85**

*Creación del Bot en Telegram para notificaciones del Sistema*




Fuente: Autoría

De la misma amanera se integra una sección de código a la función “Validación Temporal de Riego”, primero se crea otra salida en el flujo con el fin de conectar un nodo llamado “Telegram Sender”.

Y en la sección final de la función mencionada anteriormente se agrega el código mostrado en la Figura 86.

La estructura del código en cuestión construye un objeto “telegramMsg” mismo que contiene en el payload los parámetros como el Chat ID (que se ocultó por motivos de seguridad) y el contenido que se enviará por mensaje y se establecen las dos salidas en el return.

**Figura 86**

*Integración del código para alertas en Telegram*

```
// ===== MENSAJE TELEGRAM =====
let telegramMsg = {
    payload: {
        chatId: 188[redacted],
        type: "message",
        content:
            "📣 RIEGO ACTIVADO\n\n" +
            "⏱ Tiempo: " + tiempoTexto + "\n" +
            "🗓 " + new Date().toLocaleString()
    }
};

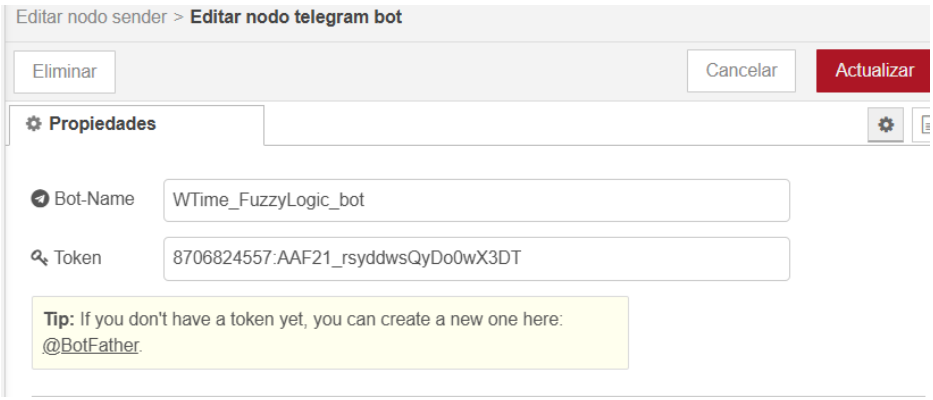
// Se devuelven dos salidas
return [mqttMsg, telegramMsg];
```

Fuente: Autoría

Por último, en el procedimiento documentado en la Figura 87 se realiza la configuración del nodo “Telegram Sender” se establece el nombre del Bot y el Token generado al inicio de la configuración, para posteriormente instanciar los flujos.

**Figura 87**

*Configuración de credenciales del Bot*




Fuente: Autoría

### 3.7.5.5 Conexión hacia la plataforma en la nube Thinger.io

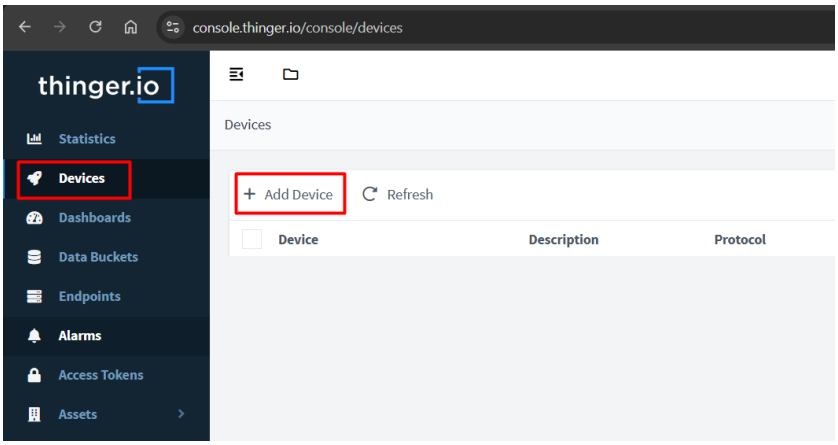
De acuerdo con los requerimientos del sistema que se está desarrollando, la implementación del monitoreo y control de manera remota forma parte integral del proyecto. La presente sección describe el proceso de conexión e integración hacia la plataforma en la nube como lo es Thinger.io.

Los nodos sensores que recolectan los datos ambientales envían esa información, la misma que es procesada en el Gateway y posteriormente enviada a la plataforma. Esta etapa define los parámetros y mecanismos de autenticación, protocolo de comunicación y recursos para publicar las variables ambientales como temperatura y humedad ambientales y humedad del suelo, asegurando una sincronización periódica, monitoreo y disponibilidad de los datos desde la nube. Thinger.io es una plataforma IoT que provee dos versiones, una gratuita y una pagada, para la integración del proyecto, la versión gratuita cumple con las funcionalidades requeridas en los requerimientos StSR10, StSR14 y StSR15 establecidos en la Tabla 6.

Una vez que se ha realizado el debido registro se procede a agregar un dispositivo nuevo, la versión gratuita permite sólo dos dispositivos, en este caso solo se agrega el Gateway. En la barra lateral izquierda se ingresa *Devices* y posteriormente a *Add Device.*

**Figura 88**

*Sección para agregar dispositivo en Thinger.io*

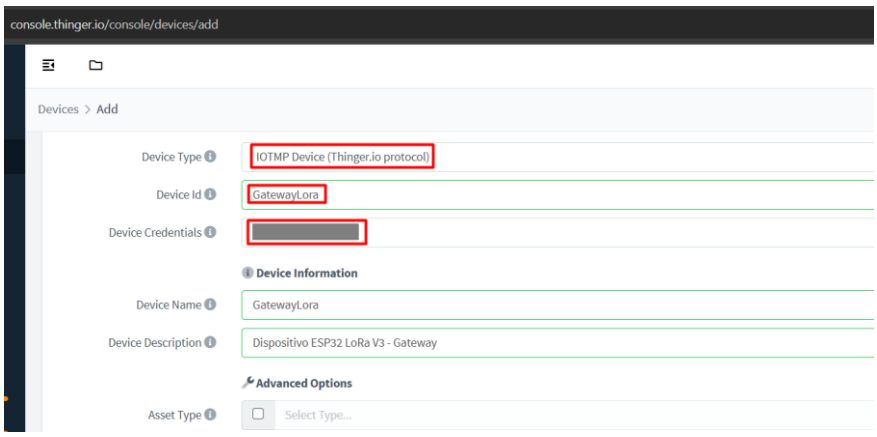



Fuente: Autoría

A continuación, en la ventana desplegada se muestran los parámetros a ingresar para agregar un nuevo dispositivo, en este caso el Gateway, el protocolo mediante el que trabajará es el IOTMP Device (Thinger.io protocol), se asigna una identificación conocida como el *Device ID* que es la credencial utilizada en el código de programación como se puede evidenciar en la Figura 62, finalmente se agrega información acerca del dispositivo como el nombre y una breve descripción, todos estos parámetros se ilustran en la Figura 89.

**Figura 89**

*Parámetros del Gateway en Thinger.io*

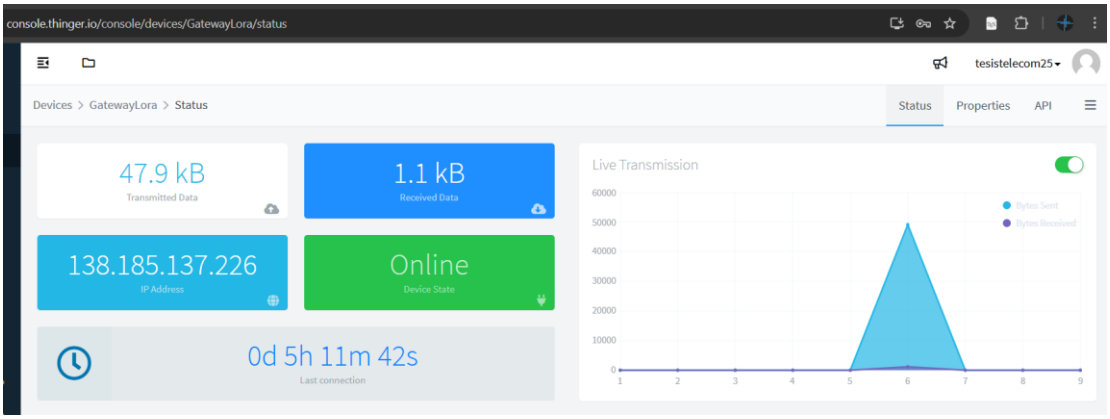



Fuente: Autoría

Cuando el dispositivo se haya agregado correctamente se muestra el panel de monitoreo, aquí se visualiza el estado de operación del Gateway que presenta las métricas de comunicación en tiempo real. La Figura 90 muestra los parámetros como el volumen de datos recibidos y transmitidos, estado de conexión, dirección Ip (del carrier), tiempo de actividad y una gráfica con las transmisiones que el dispositivo realiza de manera constante. Estos elementos facilitan la supervisión remota, el rendimiento del dispositivo y el seguimiento dentro de la arquitectura IoT del sistema.

**Figura 90**

*Interfaz de monitoreo del Gateway en Thinger.io*

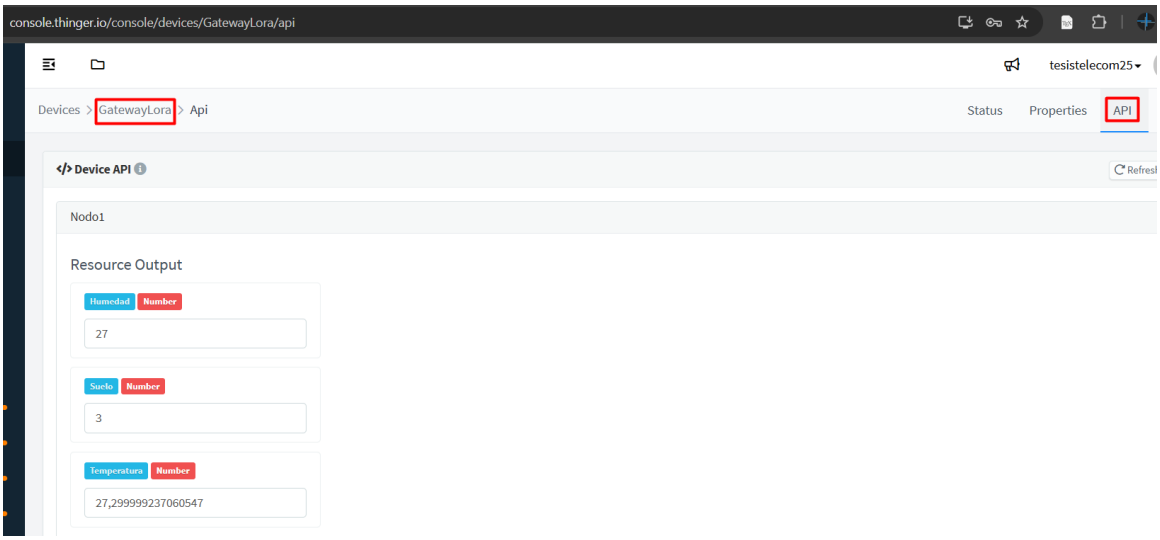



Fuente: Autoría

En este punto, el código desarrollado en la sección 3.7.5.3 ya se encuentra cargado en el microcontrolador, la plataforma IoT provee una API que permite revisar y validar los recursos que están definidos en el firmware del equipo. Conocidos como resource outputs, la Figura 91, muestra una salida correspondiente a cada dato numérico de las variables ambientales asociadas al Nodo Sensor 1.

**Figura 91**

*Verificación de recursos y salidas del Gateway en la API de Thinger.io*




Fuente: Autoría

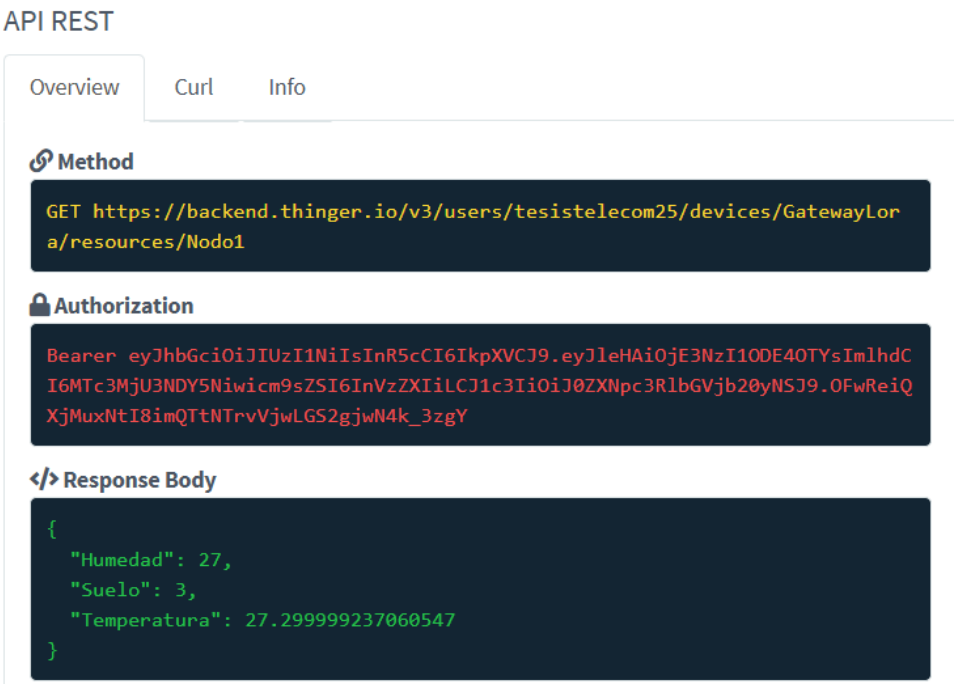
De esta manera se evidencia que los datos de los sensores están siendo recibidos por la plataforma IoT, en la sección de API REST se muestra el acceso a los recursos del Gateway mediante peticiones HTTP.

En la Figura 91 se observa la subsección Method donde se especifica la solicitud de tipo GET juntamente con la URL del endpoint del Nodo 1. En la sección Authorization, el esquema de autenticación se basa en un token Bearer lo que permite ingresar solo a los usuarios autorizados al dispositivo.

Al final el apartado de Response Body se ilustra en formato JSON la respuesta de la petición GET, se puede evidenciar que las variables de Humedad del ambiente, Humedad del suelo y Temperatura ambiental se expresan con sus valores numéricos.

**Figura 92**

*Consulta al Gateway mediante API REST*




Fuente: Autoría

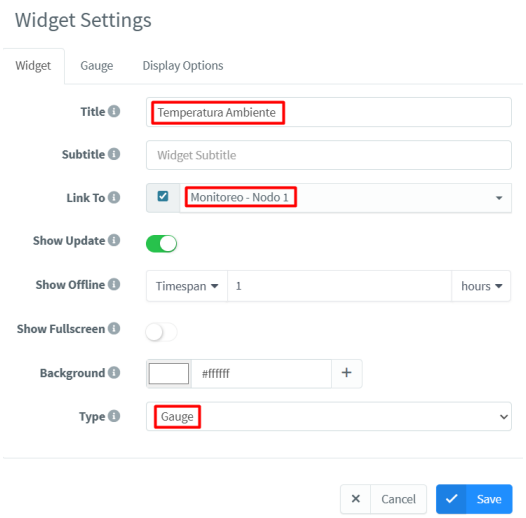
- **Creación de Dashboards**

La plataforma Thinger.io permite crear hasta cuatro dashboards en su versión gratuita, es importante destacar que se crearán tres tableos de monitoreo correspondientes a cada Nodo del sistema. En la sección de la barra lateral izquierda, apartado Dashboards se agrega mediante el botón “Add Dashboard”, los parámetros que aquí se ingresan son: Dashboard id, Dashboard name y Dashboard description. Para este proyecto se sigue una nomenclatura que facilita la identificación de cada Dashboard, es esencia, cada interfaz está vinculada a cada Nodo en el mismo orden numérico.

Los Dashboards de monitoreo comúnmente poseen widgets tipo Gauge, o gráficas de líneas temporales que permiten observar el cambio inmediato y a largo plazo de las variables, en este caso se agregan ambos. En el apartado de agregar Widget se despliega una ventana ilustrada en la Figura 92 y se configura un gauge para la Temperatura Ambiental.

**Figura 93**

*Creación de Widget tipo Gauge en Thinger.io*

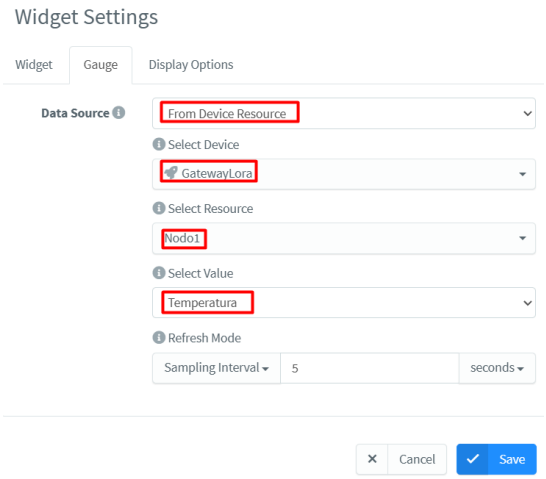



Fuente: Autoría

La función de configuración más esencial está en la sección perteneciente a cada widget en específico, en este caso en la sección de gauge, se configura desde donde se toman los datos, el dispositivo, recurso (Nodo) y la variable a representar en el widget, en este caso la temperatura ambiental, este proceso se debe realizar para cada variable que se requiera mostrar en el Dashboard.

**Figura 94**

*Configuración del origen de datos del Widget*

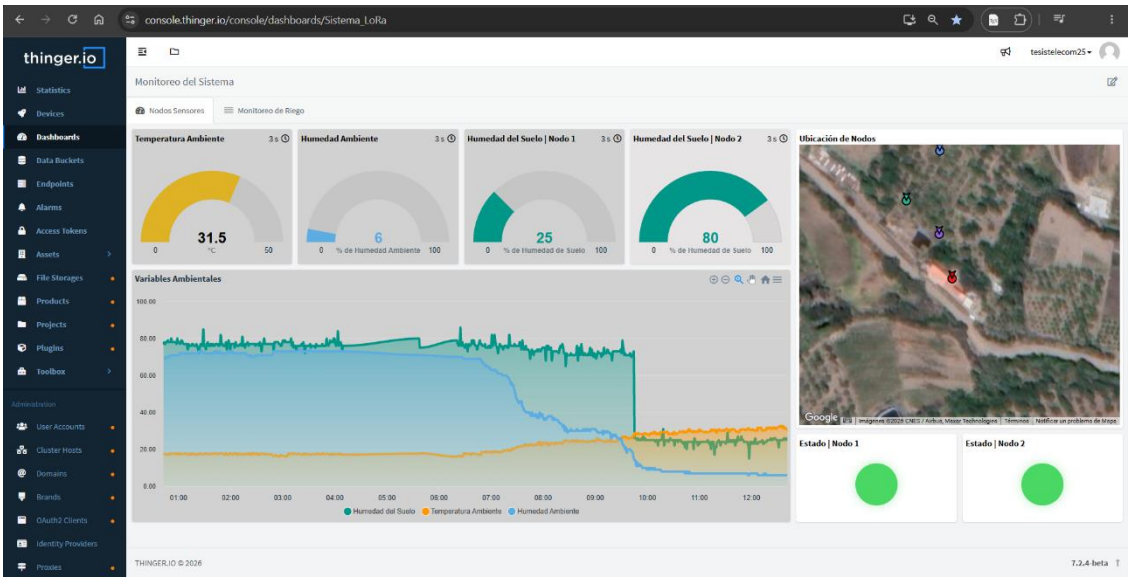



Fuente: Autoría

En la sección de “Display Options” se parametriza los rangos que se requiere mostrar de la variable, es decir el rango de la magnitud, para el caso de la temperatura ambiente, el rango es de 0 a 50 °C. Además, en este apartado de configuración se personaliza el color, tamaño y unidades. Finalmente, tras haber agregado los respectivos widgets, el Dashboard principal se ilustra en la Figura 95 mostrada a continuación.

**Figura 95**

*Dashboard del Sistema en Thinger.io*



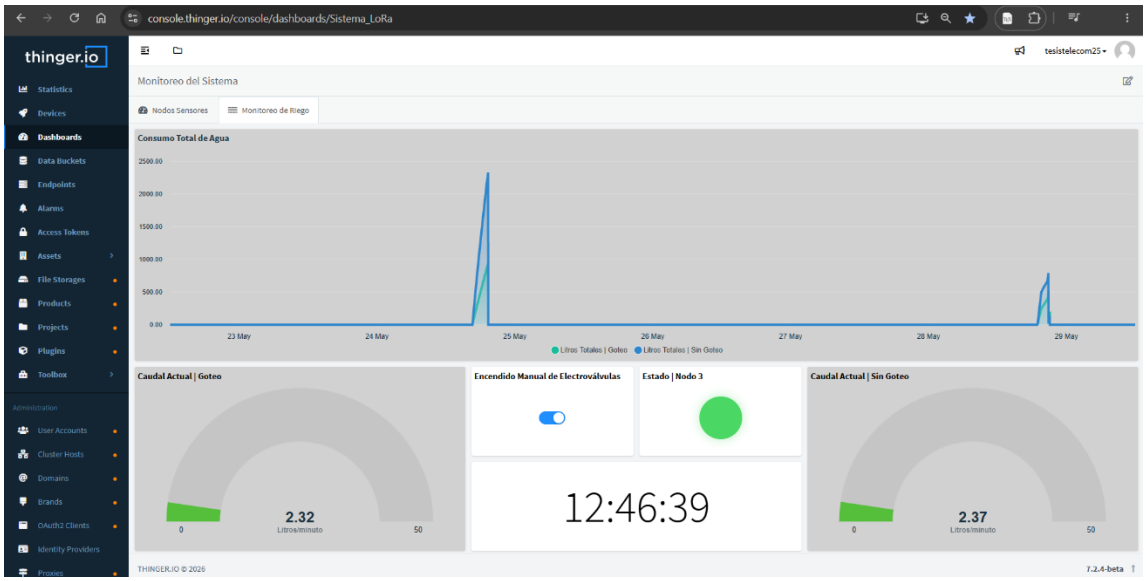

Fuente: Autoría

La sección “Monitoreo de Riego” incluida en el mismo dashboard, se encarga de la visualización y control del Nodo Actuador como se ilusra en la Figura 96 presentando los respectivos controles de las electroválvulas y visualización histórica de eventos de riego.

Se opta por integrar el monitoreo en dos secciones en específico ya que se de esta manera se optimiza el acceso inmediato a los diferentes controles y visualizaciones del sistema, lo que porporciona una solución eficaz y óptima al momento de conocer el estado de las variables ambientales y de humedad del suelo presentes en el cultivo.

**Figura 96**

*Dashboard del Nodo 2*

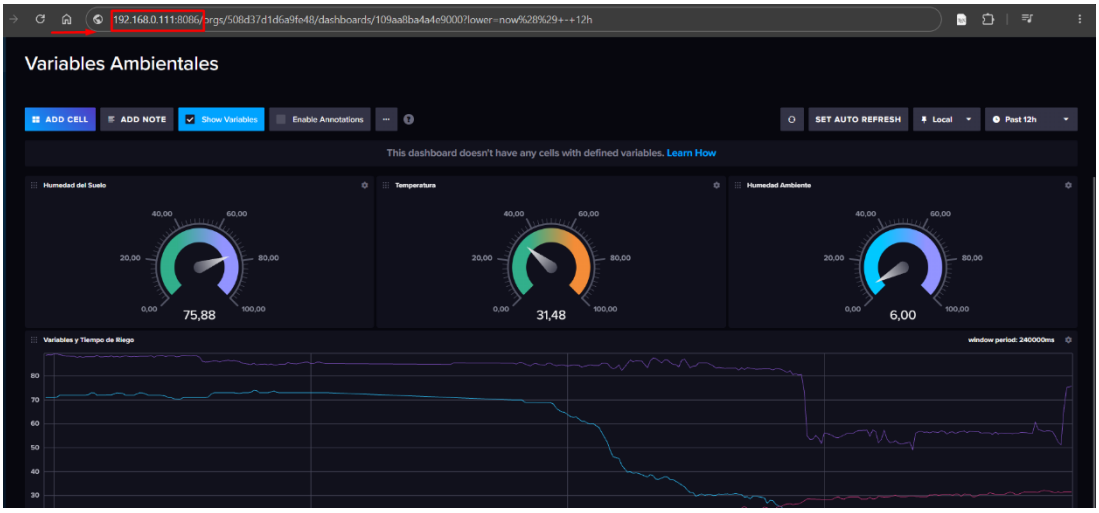



Fuente: Autoría

Un punto clave a mencionar es que el monitoreo también se realiza de manera local, mediante la herramienta “Dashboards” que incluye la base de datos InfluxDB, como se muestra en la Figura 97 se realiza la creación de un dashboard para visualizar las variables ambientales monitoreadas por el sistema, función esencial cuando no exista disponibilidad de internet.

**Figura 97**

*Dashboard para el monitoreo Local*




Fuente: Autoría

### 3.8 Implementación de los Nodos sensores y Gateway

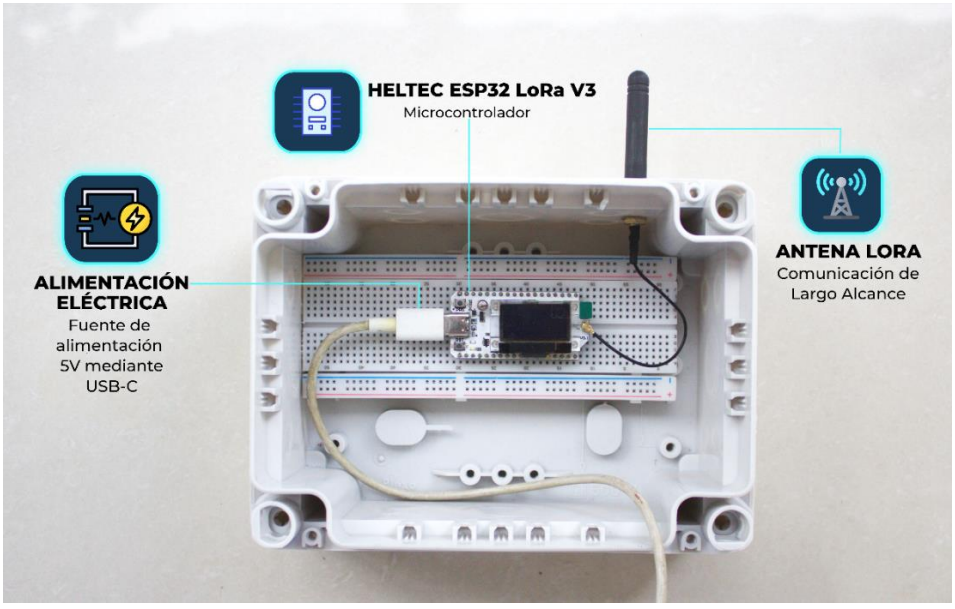
Esta sección presenta la construcción física y estructural de cada elemento de la arquitectura definida, como lo es el Gateway, Nodos Sensores y Nodo Actuador, evidenciando los componentes que los integran. De la misma manera se registra el proceso de instalación in situ, siguiendo los criterios técnicos de ubicación y montaje definidos al inicio de este capítulo, con el objetivo de avalar una correcta adquisición de datos y un enlace de comunicación entre los Nodos Sensores y Nodo Actuador con el Gateway.

#### 3.8.1 Implementación del Gateway

La Figura 98, muestra la implementación física del Gateway, los componentes están instalados dentro de una caja plástica de protección con certificación IP55 para uso en campo abierto y exposición a lluvia. En el interior, la placa Heltec ESP32 LoRa V3 se monta sobre una protoboard, y se alimenta mediante la conexión USB tipo C con 5V, se conecta a una antena LoRa externa que se fija en la parte superior derecha de la carcasa protectora para optimizar la transmisión inalámbrica.

**Figura 98**

*Implementación física Gateway*




Fuente: Autoría

De la misma forma, la implementación en campo se realizó considerando las coordenadas geográficas establecidas en la Tabla 22, correspondientes al punto de ubicación previamente definido para este dispositivo. La ubicación responde a los criterios de diseño del enlace inalámbrico con el fin de optimizar la cobertura y calidad de la comunicación LoRa con los nodos sensores. El Gateway se instaló en la parte superior de la vivienda situada dentro del predio, con el objetivo de alcanzar la máxima altura y generar línea de vista óptima con los otros Nodos. Esta disposición se evidencia en la Figura 99, garantizando estabilidad en la transmisión de datos y mejorando el desempeño general de la red LoRa del sistema.

**Figura 99**

*Instalación en campo del Gateway*



Fuente: Autoría

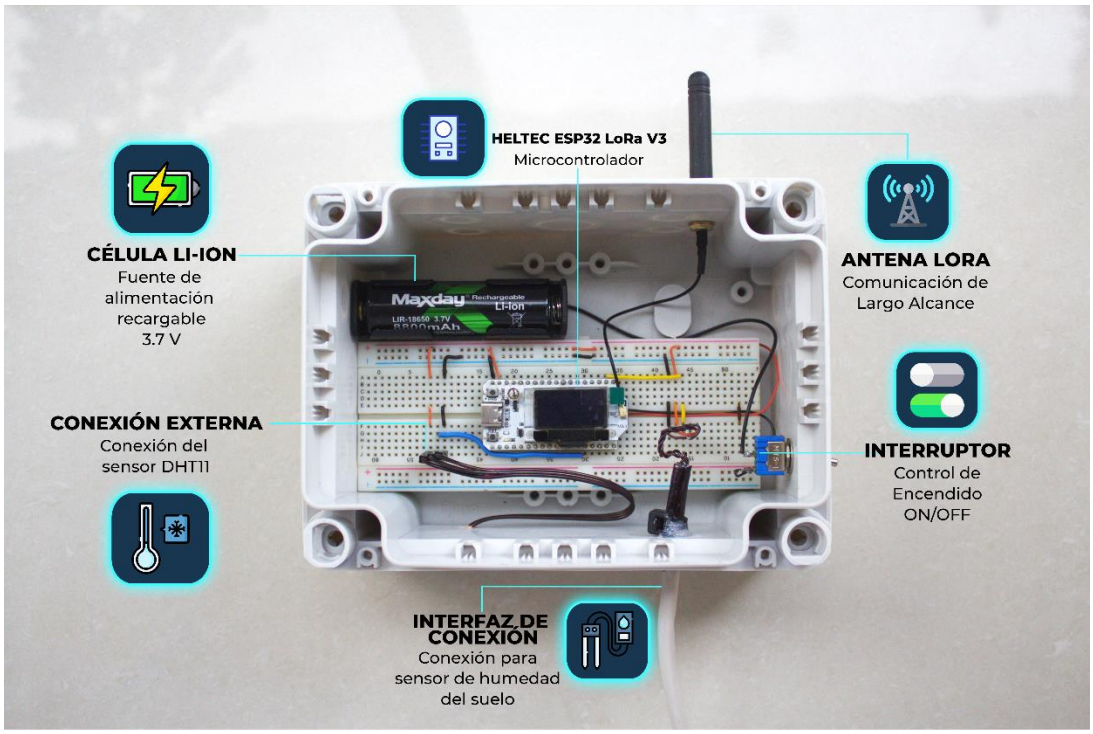
### 3.8.2 Implementación del Nodo Sensor 1

El Nodo Sensor 1, se implementó de manera similar al Gateway, los componentes de hardware se disponen al interior de una carcasa para proteger la electrónica de las condiciones climáticas de campo como ilustra la Figura 100. Los componentes de este Nodo se describieron en la sección 3.7.2.1 por lo que sería redundante detallarlos otra vez, sin embargo, cabe señalar

algunos puntos importantes, el sensor DHT11 se coloca fuera de la carcasa con el fin de obtener los datos precisos del ambiente exterior. La alimentación energética del nodo es suministrada de manera autónoma mediante una celda de iones de litio de 3.7 V, y el circuito es gestionado por un interruptor de encendido y apagado general ensamblado en parte inferior derecha.

**Figura 100**

*Implementación física del Nodo Sensor 1*




Fuente: Autoría

En consecuencia, se procede a la implementación física en campo del Nodo como se aprecia en la Figura 101. La carcasa protectora se monta en la parte superior de un poste con soporte vertical. El cable externo está destinado a la conexión del sensor de humedad del suelo, mismo que es enterrado en la zona radicular. Esta integración asegura una protección robusta del hardware contra el entorno, al mismo tiempo que ubica al componente de la red IoT de manera óptima para la monitorización de las condiciones de temperatura/humedad ambiental y humedad del suelo.

**Figura 101**

*Instalación en campo del Nodo Sensor 1*



Fuente: Autoría

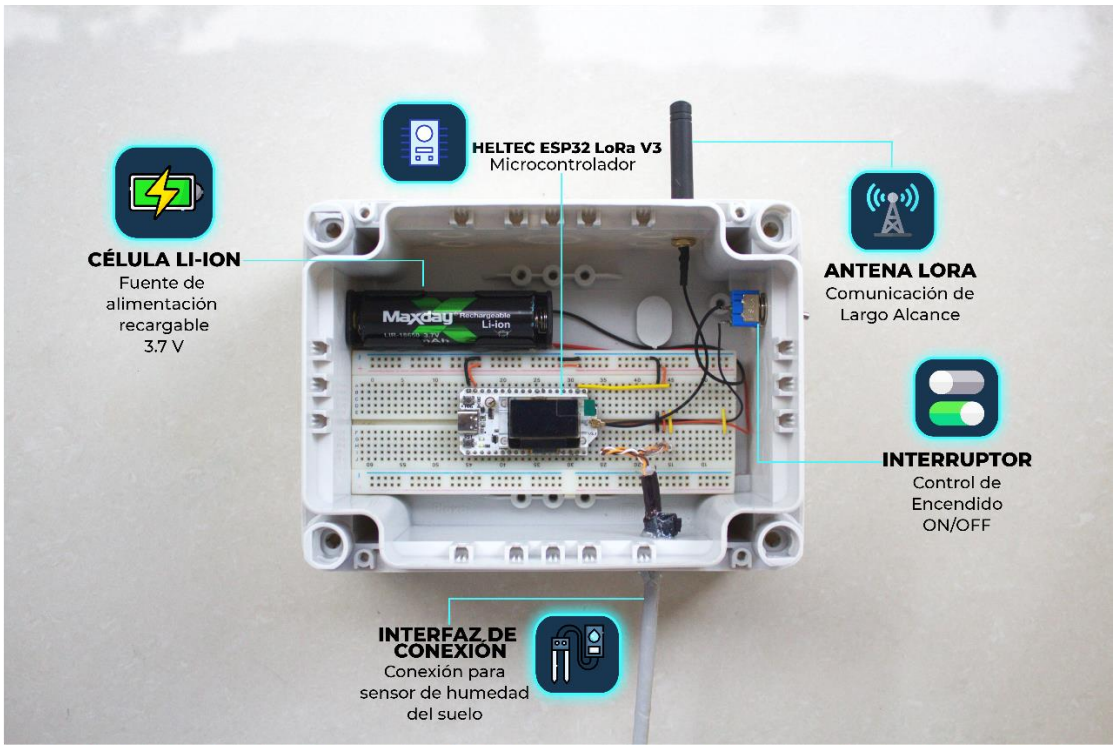
### 3.8.3 Implementación del Nodo Sensor 2

La integración de hardware del Nodo Sensor 2 se muestra en la Figura 102. Los componentes electrónicos se encuentran dispuestos en una carcasa igual a las anteriores mencionadas. La principal diferencia con el primer nodo está en la configuración de los sensores ya que, este Nodo solo está destinado a la adquisición de datos de humedad del suelo; y la conexión cableada del sensor de humedad del suelo se enruta hacia el exterior de la caja para inserción en la zona radicular del cultivo de aguacate.

El sistema integra alimentación autónoma, utilizando una batería de litio de 3.7 V dispuesta en un socket y acoplada a un interruptor de encendido/apagado para el control manual del flujo energético en caso de sacar de operación al Nodo.

**Figura 102**

*Implementación física del Nodo Sensor 2*




Fuente: Autoría

Finalmente, en la Figura 103 se evidencia el despliegue en campo del Nodo Sensor 2 dentro del cultivo de aguacate. Al igual que el Nodo 1, este se ancla en un poste de metal resistente, buscando optimizar la línea de vista para la propagación de las señales de radiofrecuencia LoRa, evitando posibles obstáculos como la densidad foliar o la topografía irregular del terreno.

Al mismo tiempo, se observa la línea de conexión a lo largo de la estructura metálica la cual se dirige al suelo para comunicar el sensor, asegurando la integridad y operatividad del hardware en el entorno agrícola abierto.

**Figura 103**

*Instalación en campo del Nodo Sensor 2*



Fuente: Autoría

La integración de los sensores de humedad del suelo, por recomendación del experto y como se evidencia en el Anexo 3, son integrados a una profundidad de 30 centímetros en la zona de proyección de la copa (donde cae la sombra de las ramas más externas), lo que permite obtener una mejor precisión de las lecturas de humedad del suelo y permitir al sistema ajustarse a las necesidades hídricas del cultivo.

### 3.8.4 Implementación del Nodo Actuador

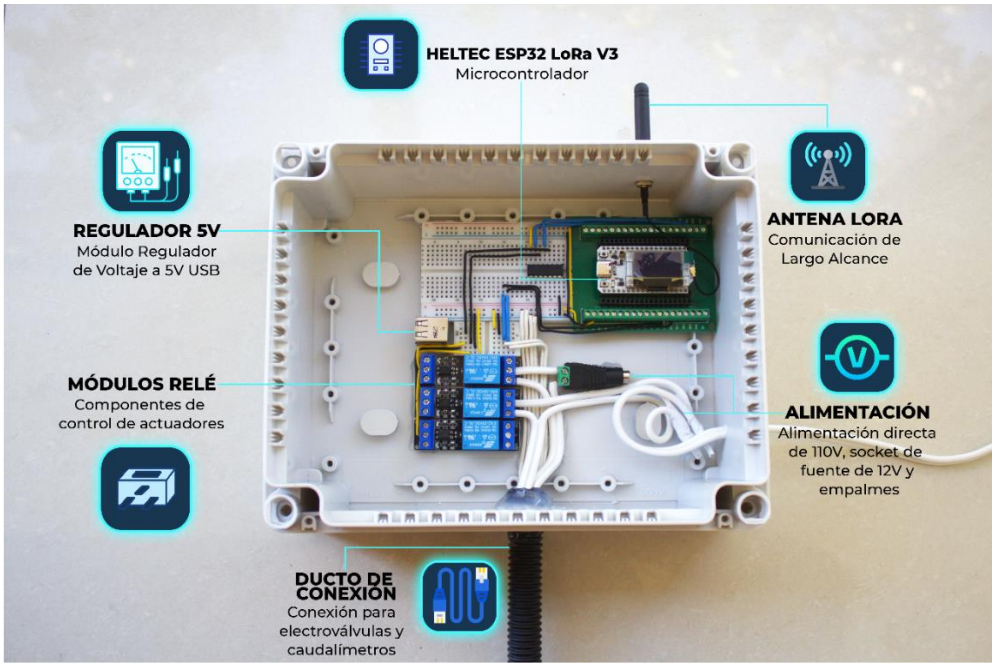
El Nodo Actuador define la parte de control encargada de activar el sistema de riego en función de la inferencia difusa. Este nodo integra un microcontrolador Heltec ESP32 LoRa V3 montado directamente sobre un Shield y anclado en una carcasa plástica de protección, a su vez, se integran los módulos Relé distribuidos en la parte inferior como se ilustra en la Figura 104 y a su vez se implementan las respectivas conexiones eléctricas dentro de la carcasa.

Las conexiones hacia el exterior se distribuyen por medio de la manguera corrugada, que tienen como destino las electroválvulas y los sensores de caudal anclados al sistema de

tubería que se adaptó al sistema existente. La integración de estos componentes asegura la calidad operativa del sistema en términos de funcionalidad y resistencia a las condiciones ambientales existentes en la zona.

**Figura 104**

*Implementación física del Nodo Actuador*




Fuente: Autoría

Finalmente, para terminar la parte de implementación física in situ, se adapta el sistema de control al sistema de riego existente en el predio, tomando en cuenta los requerimientos StSR7, StSR8, SySR16, SRSH6 y SRSH15 detallados en la sección 3.3. La Figura 105 ilustra la integración la cual se implementó mediante un módulo de tubería PVC en donde se integran las electroválvulas y los sensores de caudal, cabe destacar que las múltiples derivaciones controlan un suministro de agua considerable distribuyendo el recurso hídrico a las diferentes zonas del predio, garantizando la automatización y el control para una mejor gestión del recurso disponible.

En lo que corresponde a la parte eléctrica y de alimentación, el Nodo Actuador se energiza mediante la red eléctrica del predio a 110V, esto provee la cantidad de voltaje

necesario para controlar las electroválvulas y el microcontrolador mismo que se encuentra encapsulado con los componentes en la carcasa de protección que está anclada en la parte superior del soporte lateral izquierdo, al poseer una protección contra agua, todas las conexiones se encuentran protegidas evitando el riesgo de cortocircuito.

**Figura 105**

*Adaptación del Nodo Actuador al sistema de Riego*



Fuente: Autoría

# Capítulo IV: Pruebas de Funcionamiento, Evaluación y Análisis

El presente capítulo evalúa el funcionamiento mediante pruebas operativas de campo y se realiza un análisis de los datos recolectados demostrando la factibilidad así como la eficiencia y funcionalidad del sistema. Inicialmente las de pruebas de comunicación inalámbrica validan el alcance efectivo de la transmisión de la transmisión LoRa, calidad del enlace mediante los parámetros RSSI y SNR, y pruebas de latencia y jitter a diferentes distancias. Conjuntamente la validación de la operación y precisión de los sensores en la adquisición de datos de temperatura/humedad ambiente, humedad del suelo y caudal del agua, mediante métodos comparativos proveen lecturas válidas y coherentes permitiendo al sistema mejorar su precisión y en las decisiones automatizadas con lógica difusa. Posteriormente, se evalúa el riego automatizado y manual; en el modo automático, el sistema respondió de manera oportuna en función de las condiciones climáticas de entrada. Por otra parte el modo manual permitió al usuario tomar decisiones oportunas que se ajustan a necesidades agrícolas en específico. Se propuso un escenario para evaluar la sensibilidad de la lógica difusa y la adaptación a las condiciones ambientales en un periodo de prueba de varios días. Se evidenció que el sistema es ajustable en el tiempo de riego (salida difusa) y la frecuencia de este mantiene al sistema en equilibrio según las necesidades hídricas y el uso de manera eficiente del recurso hídrico. De igual manera, se evaluó la plataforma IoT donde se muestran y almacenan los datos. Se verificó la estabilidad en la transmisión de datos, disponibilidad y monitoreo en tiempo real, estas métricas registradas durante el periodo de pruebas confirman el comportamiento estable que garantiza la confiabilidad en el monitoreo y supervisión del sistema. Finalmente la interpretación de los resultados permite resumir la calidad y validez del sistema adjunto con los costos que implicaron el desarrollo e integración del sistema demostrando que es económicamente accesible en despliegues a pequeña y gran escala para aplicaciones de agricultura inteligente.

### 4.1 Pruebas de comunicación inalámbrica LoRa

Esta sección comprende las pruebas operacionales del desempeño integral del sistema en condiciones reales de campo, evaluando en primer lugar el alcance efectivo de la transmisión LoRa mediante la pérdida de paquetes. Como segunda sección se evalúa la calidad del enlace que básicamente implica registrar el RSSI y SNR determinando la fiabilidad y robustez de la señal recibida. Por último, se pone a prueba la latencia y el jitter parámetros que son indicadores de una red estable permitiendo valorar la efectividad de la tecnología LoRa en el contexto de este sistema.

#### 4.1.1 Alcance efectivo de transmisión LoRa

Para evaluar el alcance efectivo de la transmisión se establece un escenario en donde el Gateway permanece en una posición fija y los Nodos se alejan gradualmente a determinadas distancias. Los Nodos envían paquetes de datos constantemente hacia el Gateway, el objetivo es registrar y medir el número de paquetes enviados y los paquetes recibidos hasta observar en qué punto se mantiene una comunicación confiable. Dado que los Nodos se basan todos en el mismo microcontrolador, se considera realizar la prueba con uno solo, configurado con los parámetros del enlace inalámbrico detallados en la Tabla 23 que son los parámetros utilizados en el entorno real para todos los Nodos.

Para calcular la perdida de paquetes, se hace uso de la ecuación (8) mostrada a continuación, lo que proporciona el porcentaje de pérdida permitiendo evaluar el desempeño del alcance de la transmisión.

$$Pérdida\ (\%) = \frac{Enviados - Recibidos}{Enviados} \times 100 \qquad (8)$$

Consecuentemente, para la lógica de programación se implementa un incremento de paquetes en el Nodo, además de modificar el payload para enviar el ID correspondiente y que el que el Gateway reciba y calcule los paquetes enviados, recibidos y perdidos durante la transmisión. Como se puede ilustrar en el fragmento de código presentado en la Figura 106.

**Figura 106**

*Extracción de paquetes y estadísticas en el Gateway*

```
// Incrementar paquetes recibidos
pkt_recibidos++;

// Actualizar último paquete
if (currentPkt > ultimo_pkt) {
    ultimo_pkt = currentPkt;
}

// Paquetes Enviados
pkt_esperados = ultimo_pkt;

// Paquetes Perdidos
pkt_perdidos = pkt_esperados - pkt_recibidos;

// %
if (pkt_esperados > 0) {
    pkt_loss_pct = ((float)pkt_perdidos / pkt_esperados) * 100.0;
}
  //Impriir estadísticas en la consola Serial
    Serial.println(" ===== ESTADÍSTICAS LoRa =====");
    Serial.printf("Enviados: %d\n", pkt_esperados);
    Serial.printf("Recibidos: %d\n", pkt_recibidos);
    Serial.printf("Perdidos: %d\n", pkt_perdidos);
    Serial.printf("Pérdida: %.2f %%\n", pkt_loss_pct);
```

Fuente: Autoría

Las ubicaciones de los puntos en que se realiza estas pruebas se observan en la Figura 107, estableciendo un mínimo de 50 metros y un máximo de 300.

**Figura 107**

*Ubicaciones del nodo a diferentes distancias*




Fuente: Adaptado de Google Maps (2025)

Los resultados de la pérdida de paquetes se comprueban en la Tabla 35 mostrada a continuación, a diferentes distancias y con obstáculos propios de la topografía de la zona mostrada en la Figura 107.

**Tabla 35**

*Resultados experimentales de la pérdida de paquetes*

| Distancia (m) | Paquetes enviados | Paquetes recibidos | Pérdida (%) |
|---|---|---|---|
| 50 | 50 | 50 | 0 |
| 100 | 50 | 50 | 0 |
| 150 | 50 | 49 | 2 |
| 200 | 50 | 48 | 4 |
| 250 | 50 | 46 | 8 |
| 300 | 50 | 45 | 10 |

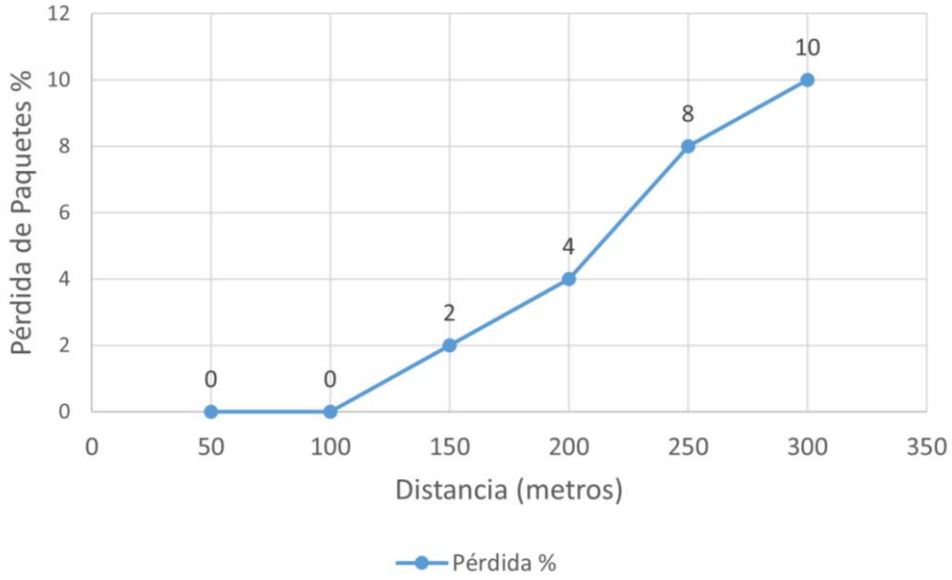
Fuente: Autoría

Como se mostró en la Tabla 35, el mismo número de paquetes es transmitido en cada escenario, con una cantidad fija de 50 paquetes. Los resultados evidencian una relación directamente proporcional entre la distancia y la pérdida de paquetes en algunos casos, es decir cuando la distancia entre el Nodo (transmisor) y Gateway (receptor) aumenta, existe más pérdida de paquetes, si bien la pérdida no es significativa, sigue existiendo comunicación y transmisión de datos.

Como se ilustra en la Figura 108, se representa el porcentaje de pérdida de paquetes en función de la distancia, a medida que la distancia aumenta, existe un incremento de la pérdida, estableciendo valores de 2% a 150 metros, 4% a 200 metros, 8% a 250 metros y 10% a 300 metros. Estos porcentajes confirman el potencial de la tecnología LoRa para comunicaciones de mediano y largo alcance. En consecuencia, el sistema provee una validez y desempeño factible en aplicaciones IoT de monitoreo agrícola, en un escenario real como este, las pérdidas de datos no ponen en riesgo significativo la estabilidad de la red.

**Figura 108**

*Porcentaje de Pérdida de Paquetes vs. Distancia*




Fuente: Autoría

### 4.1.2 Calidad del Enlace

En el diseño de las redes LoRa evaluar el RSSI (Received Signal Strength Indicator) y la SNR (Signal-to-Noise Ratio) representa verificar la calidad del enlace. El RSSI , por su significado en español “Indicador de Intensidad de Señal Recibida” representa a la potencia de la señal que recibe el receptor, en este caso el Gateway, se expresa en dBm comúnmente, posibilita la cobertura eficaz del sistema y estimación de la atenuación del canal. Por otro lado, la Relación Señal/Ruido calcula la relación de la potencia útil de la señal y el nivel de ruido que presenta el canal, permitiendo definir la integridad y confiabilidad de la comunicación inalámbrica.

La Tabla 36 muestra los resultados obtenidos a diferentes distancias de estos parámetros presentando variaciones y permitiendo definir hasta qué punto es estable y confiable la conexión.

**Tabla 36**

*Resultados experimentales del RSSI y SNR*

| Distancia (m) | RSSI (dBm) | SNR (dB) |
|---|---|---|
| 50 | -102 | 11 |
| 100 | -108 | 9 |
| 150 | -113 | -3 |
| 200 | -113 | -4 |
| 250 | -114 | -5 |
| 300 | -115 | -8 |

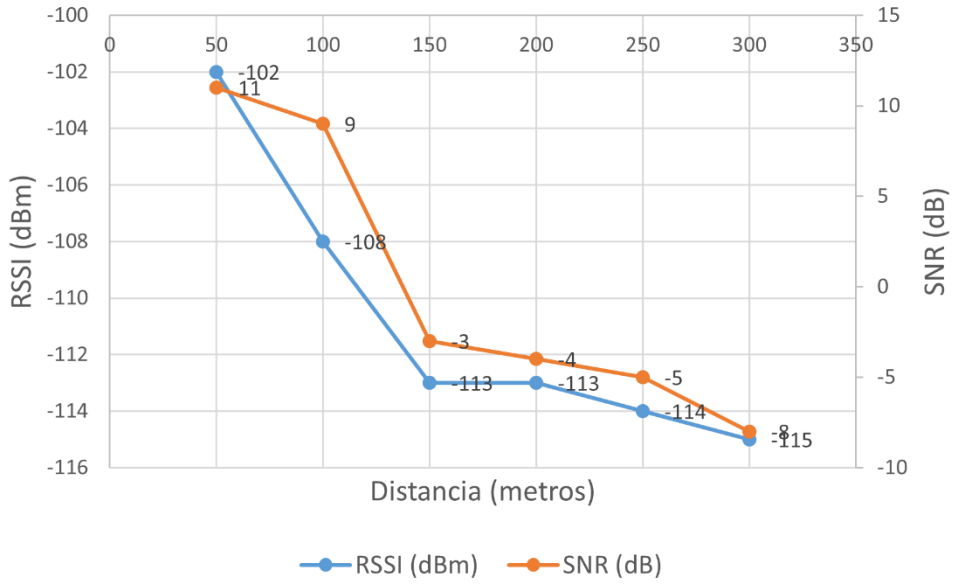
Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos de estos parámetros reflejan un comportamiento congruente esperado en enlaces LoRa, valores que son directamente proporcionales a la distancia entre transmisor y receptor. El parámetro RSSI mostró valores desde los -102 dBm hasta -115 dBm en 50 y 300 metros respectivamente, lo que evidencia que la señal se va degradando de manera gradual. De la misma forma, la Relación Señal a Ruido (SNR) alcanzó un descenso desde los 11 dB hasta -8 dB valores que indican la reducción de este parámetro a mayor distancia, esto comprueba la capacidad de la tecnología LoRa para recibir señales aun con niveles bajos de este parámetro.

En la Figura 109 representa el RSSI y SNR en función de la Distancia permitiendo apreciar mejor el comportamiento de estos parámetros. Esto permite evaluar el comportamiento del chip LoRa SX1262. Acorde con la documentación de Semtech este chip posee una sensibilidad en modo recepción de -137 dBm, configurado con un factor de dispersión de 12 y un ancho de banda de 125 KHz y decodifica señales con SNR de hasta -20 dB en despliegues grandes y redes robustas.

**Figura 109**

*RSSI y SNR en función de la Distancia*




Fuente: Autoría

Consecuentemente, los resultados de esta prueba y valores obtenidos están en el rango óptimo de operación, reafirmando que el sistema desarrollado está dentro de las condiciones adecuadas de operación de aplicaciones del Internet de las Cosas aplicado a entornos agrícolas en las distancias previamente evaluadas.

### 4.1.3 Pruebas de Latencia y Jitter

El análisis del desempeño de la red IoT se establece en base a la latencia y al jitter presente en la comunicación entre los Nodos Sensores y el Gateway, esto es fundamental en aplicaciones de control y monitoreo en tiempo real. Por un lado, la latencia, definida como el tiempo en que un paquete de datos es enviado por el nodo sensor (transmisor) y llega al Gateway (receptor), en tanto que el jitter es la variación del mencionado retardo entre las transmisiones consecutivas. A continuación, se presentan las pruebas realizadas para evaluar estos parámetros del enlace.

Con el fin de obtener la magnitud de los parámetros mencionados anteriormente, se implementa en el lado del Nodo Sensor, un Timestamp o marca de tiempo para enviar al

Gateway y extraer las métricas correspondientes, como se observa en la Figura 110, la función declarada “ unsigned long timestamp = millis();” obtiene el tiempo transcurrido de un evento en específico y lo almacena en la variable timestamp.

**Figura 110**

*Implementación del timestamp*

```
char txpacket[BUFFER_SIZE];
bool lora_idle = true;
int packetCount = 0; //contador de paquetes

unsigned long timestamp = millis(); // función para medir latencia y jitter


static RadioEvents_t RadioEvents;
```

Fuente: Autoría

En el void loop, se construye el payload correspondiente, mismo que incluye la variable de la marca de tiempo, para ser recibida en el Gateway, como se ilustra en la Figura 111.

**Figura 111**

*Construcción del Payload con marca de tiempo*

```
// Payload con timesstamp
    sprintf(txpacket, "ID1@PKT@%d@TS@%lu@Hmd@%.2f@Tmp@%.2f@Slo@%d",
        packetCount, timestamp, hum, temp, soil);
```

Fuente: Autoría

En el lado del receptor (Gateway), se programa la rutina ilustrada en la Figura 112, que localiza la etiqueta “@TS@” dentro del payload recibido, para determinar el valor numérico del timestamp y convertirlo a un número usando “unsigned long”.

**Figura 112**

*Extracción del Timestamp en el Gateway*

```
// ==============================
// EXTRACCIÓN DE TIMESTAMP
// ==============================
int p_ts1 = data.indexOf("@TS@");        // Busca inicio de "@TS@"

unsigned long ts = 0;                   // Inicializa timestamp

if (p_ts1 >= 0) {                       // Verifica si existe "@TS@"

    int p_ts2 = data.indexOf("@", p_ts1 + 4); // Busca fin del timestamp

    if (p_ts2 == -1) {                  // Si no encuentra "@"
        p_ts2 = data.length();          // Usa fin del string
    }

    ts = data.substring(p_ts1 + 4, p_ts2).toInt(); // Extrae y convierte a número

    #if DEBUG
        Serial.printf("TS recibido: %lu\n", ts);    // Imprime en modo debug
    #endif
}
```

Fuente: Autoría

Finalmente se envía ese valor a Node-RED haciendo uso de la función MQTT de publicación, es específico la línea de código “mqttClient.publish("gateway/nodo1/timestamp", String(ts).c_str());”. Posteriormente haciendo uso de una función en Node-RED se calcula la latencia y jitter, las pruebas de estas métricas se realizaron de la misma forma que en los apartados 4.1.1 y 4.1.2, a diferentes distancias, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 37.

**Tabla 37**

*Resultados de Latencia y Jitter*

| Distancia (m) | Latencia (ms) | Jitter (ms) |
|---|---|---|
| 50 | 2189 | 4 |
| 100 | 3174 | 7 |
| 150 | 6040 | 10 |
| 200 | 6093 | 14 |

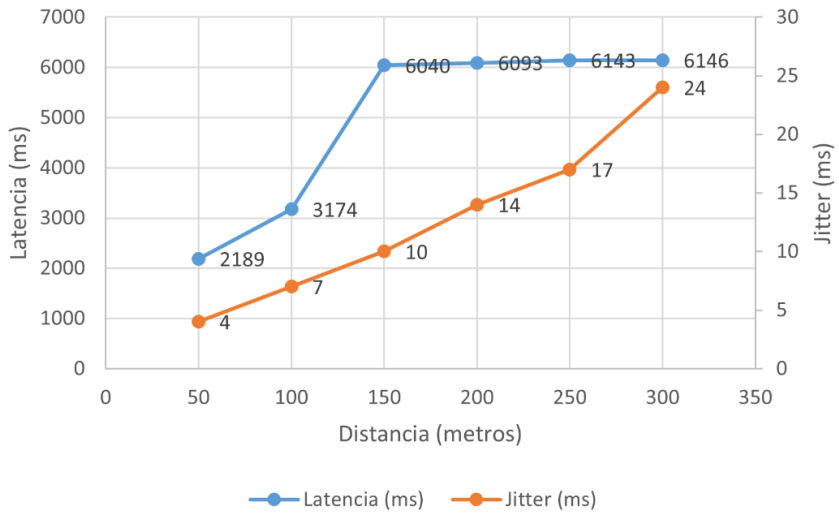
| | | |
|---|---|---|
| 250 | 6143 | 17 |
| 300 | 6146 | 24 |

Fuente: Autoría

Estos resultados muestran un progresivo incremento en función de la distancia entre Nodo y Gateway. Aquí es necesario mencionar que el Nodo fue configurado para enviar información cada 3 segundos antes de realizar la siguiente retransmisión, es por esto por lo que los valores obtenidos de latencia están influenciados por el intervalo de transmisión señalado. La latencia registrada durante las pruebas muestra valores de 2189 ms a 50 metros y 3174 ms a 100 metros, en tanto que los valores a distancias superiores muestran un promedio de 6000 ms, esto se atribute a retrasos adicionales causados por la calidad del enlace, línea de vista y vegetación de la zona. En lo que respecta al parámetro del jitter, la variación es mínima gradual que va incrementado desde los 4 ms hasta los 24 ms, en la Figura 113 se ilustra los valores tanto de latencia como jitter señalando mínimas fluctuaciones en el tiempo de arribo de los paquetes. Ya que las aplicaciones agrícolas no requieren comunicación en tiempo real estricto, el aumento de estos parámetros es reducido y estable para una red LoRa de este tipo.

**Figura 113**

*Evolución de Latencia y Jitter respecto a la Distancia*




Fuente: Autoría

Por ende, pese a que la latencia presenta un valor elevado por consecuencia del periodo de envío de datos configurada en el Nodo, el sistema establece un comportamiento sólido en procesos de monitoreo y control en los que el retardo de pocos segundos resulta despreciable.

### 4.2 Pruebas de adquisición y precisión de sensores

Las pruebas de adquisición de los sensores evalúan su precisión y la consistencia de los datos transmitidos con el objetivo de garantizar su exactitud en las mediciones. Se analiza el sensor de humedad de suelo HW-390, sensor de temperatura y humedad ambientales DHT11 y el sensor de caudal YF-S201, además se compara las mediciones con valores de referencia en plataformas especializadas en medir las variables ambientales.

#### 4.2.1 Evaluación del sensor de temperatura y humedad ambiental

Con el fin de validar los datos obtenidos por el sensor DHT11, se emplea como referencia una estación meteorológica, la información será proporcionada por la estación The Weather Channel, en este sentido se considera las condiciones climáticas del cantón Pimampiro, por una parte, las temperaturas promedio oscilan entre los 17 °C y 25 °C, y en lo que corresponde a la humedad relativa, varía entre 50 % y 80 %. Se realizó mediciones simultáneas tomando en cuenta las siguientes condiciones:

- **Ubicación**: Sensor ubicado en campo abierto, sin exposición a fuentes de calor ni directamente al sol.
- **Duración de prueba:** 45 minutos.
- **Frecuencia de muestreo:** Cada 10 segundos.
- **Disposición:** El sensor y la estación meteorológica de referencia recaban datos en el mismo horario y los valores obtenidos por ambas se registran cronológicamente, esto permitirá observar la variación de una frente a la otra para establecer y calcular el error del sensor respecto de la estación.

A continuación, en la Tabla 38 se evidencian los resultados pertinentes obtenidos de esta prueba de evaluación del sensor.

**Tabla 38**

*Resultados de la Validación de la Temperatura Ambiental*

| Tiempo | Sensor Temp (°C) | Referencia (°C) | Error (°C) |
|---|---|---|---|
| 0 min | 21.8 | 22.1 | -0.3 |
| 10 min | 22.0 | 22.3 | -0.3 |
| 20 min | 22.4 | 22.6 | -0.2 |
| 30 min | 22.3 | 22.9 | -0.6 |
| 40 min | 23.0 | 23.2 | -0.3 |

Fuente: Autoría

De la misma manera se realiza los resultados para la Humedad Ambiente, como se muestra en la Tabla 39.

**Tabla 39**

*Resultados de la Validación de la Humedad Ambiental*

| Tiempo | Sensor Hum (%) | Referencia (%) | Error (%) |
|---|---|---|---|
| 0 min | 65 | 67 | -2 |
| 10 min | 64 | 66 | -2 |
| 20 min | 63 | 65 | -2 |
| 30 min | 62 | 64 | -2 |
| 40 min | 61 | 63 | -2 |

Fuente: Autoría

Los resultados experimentales indican que el sensor presenta estabilidad durante el periodo de pruebas, teniendo variaciones mínimas en relación con el valor de referencia proporcionado. Para la temperatura, el error promedio fue de ±0.24 °C aproximadamente, este valor de variación es admisible en el campo de aplicaciones agrícolas, además según la hoja de datos del sensor DHT11 la precisión varía en ±0.2 °C validando así las pruebas con las especificaciones y precisión. La humedad relativa del ambiente presentó una variación en torno a -2 %, de la misma forma, la hoja de datos del sensor especifica que la Humedad Relativa (RH) presenta una precisión de ±5 % validando así la precisión de adquisición de datos para el sistema, es pertinente revisar el Anexo 4.

### 4.2.2 Verificación del sensor de humedad del suelo

Obtener mediciones consistentes con poco margen de error de esta variable es esencial para la inferencia del sistema difuso, con el objetivo de verificar que las mediciones no sean erróneas, es necesario tener un método de referencia, en este caso el que se utiliza es la medición de humedad gravimétrica. El método de gravimetría para calcular la humedad del suelo consiste en obtener una muestra de suelo húmedo y registrar su masa, para después extraer el agua mediante evaporación y registrar la masa del suelo seco. (Cherlinka, 2026)

En este contexto, la fórmula para calcula la humedad por el método gravimétrico se expresa en la ecuación (9).

$$GWC\ (\%) = \frac{M_{húmedo} - M_{seco}}{M_{seco}} \times 100 \tag{9}$$

Donde:

$GWC\ (\%)$: Contenido Gravimétrico de Agua

$M_{húmedo}$: Masa de suelo húmedo

$M_{seco}$: Masa de suelo seco

Para la validación del sensor de humedad del suelo se toma cinco muestras de suelo húmedo, primero se registra el valor de humedad con el sensor para posteriormente aplicar el

método gravimétrico, los cálculos se evidencian en el Anexo 5 para cada caso y la Tabla 40 mostrada a continuación, muestra las cinco diferentes pruebas y los valores obtenidos en comparación con el valor del sensor.

**Tabla 40**

*Resultados de la Validación del sensor de Humedad del Suelo*

| Nro. de Prueba | Valor Sensor (%) | GWC (%) | Error Absoluto |
|---|---|---|---|
| 1 | 86 | 85,185 | 0,815 |
| 2 | 67 | 66,667 | 0,333 |
| 3 | 47 | 47,059 | 0,059 |
| 4 | 17 | 16,279 | 0,721 |
| 5 | 6 | 6,383 | 0,383 |

Fuente: Autoría

Los resultados corroboran lecturas reales y con un mínimo margen de error presente en los valores de humedad del suelo medidos por el sensor y calculados por gravimetría, esto permite validar el desenvolvimiento del sensor en los rangos establecidos. Por consecuencia, el error absoluto se mantuvo por debajo del 1% con variaciones mínimas en cada caso, durante las cinco pruebas realizadas estos valores señalan la correcta calibración física de los sensores, mismos que proveen una fidelidad alta de la humedad real presente en el suelo del predio.

Disponer de este nivel de precisión en las lecturas de este sensor es de trascendental importancia ya que se asegura la correcta operación de cualquier regla de lógica difusa u orden de control que impliquen esta variable, permitiendo al sistema actuar de manera confiable en el riego automatizado inteligente.

### 4.2.3 Validación de los sensores de caudal

La validación de los sensores YF-S201 se desarrolló en la sección 3.7.4.3 mediante calibración y comparación experimental. Por consecuencia en esta sección se evalúa el

desempeño en condiciones reales de funcionamiento dentro del sistema de riego automático adaptado al proyecto y se comprueba la estabilidad de las lecturas e integración con la plataforma de control y monitoreo.

Para ejecutar las pruebas controladas, se emplea el modo de activación manual en la plataforma de monitoreo en la nube Thinger.io, esto permite observar el comportamiento de los sensores en las dos secciones planteadas (goteo y sin goteo). En el desarrollo de las pruebas se registraron valores de caudal, volumen total acumulado y la respuesta gráfica en el Dashboard.

- **Prueba de repetibilidad**

Con el fin de verificar la consistencia de operación, se ejecuta consecutivamente tres ciclos de activación con una duración de 2 minutos cada uno. Las lecturas registradas en la Tabla 41 evidenciaron un comportamiento similar entre cada ciclo, existiendo variaciones minúsculas que se relacionan con los cambios que sufre la presión en la red hidráulica.

**Tabla 41**

*Resultados de ciclos repetitivos de riego*

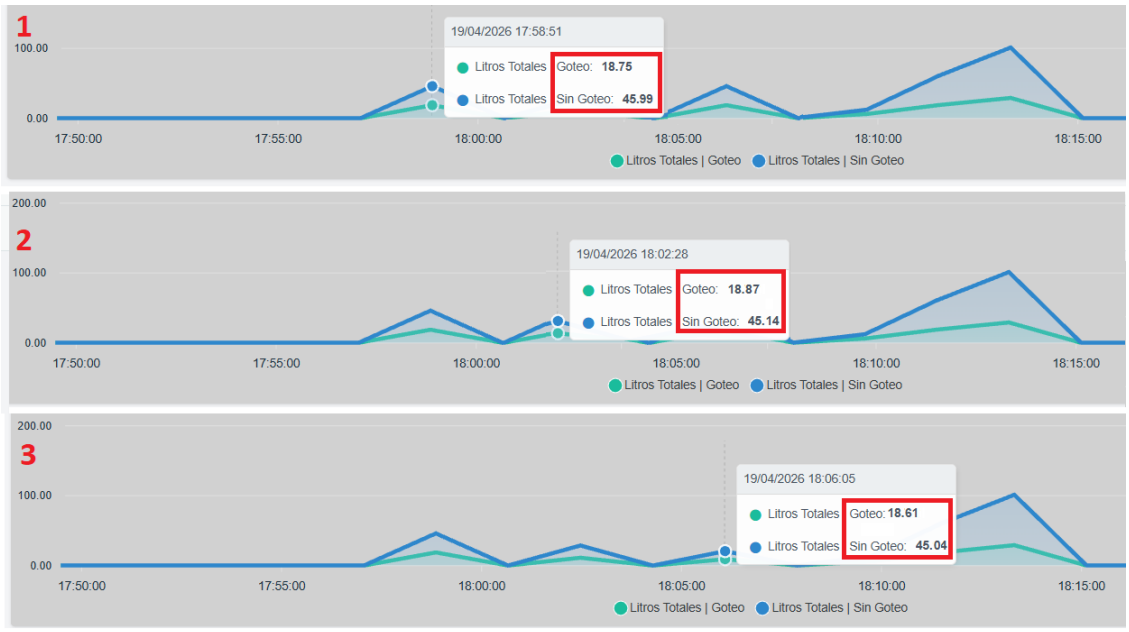
| Ciclo | Tiempo (min) | Total Riego Goteo (L) | Total Riego sin Goteo (L) |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 18.75 | 45.99 |
| 2 | 2 | 18.87 | 45.14 |
| 3 | 2 | 18.61 | 45.04 |

Fuente: Autoría

De la misma manera, los datos registrados históricamente en el dashboard muestran la consistencia en la adquisición de datos de forma visual como se ilustra en la Figura 114 con el fin de obtener una referencia gráfica del consumo total del agua.

**Figura 114**

*Registro visual del consumo total en cada ciclo de prueba*




Fuente: Autoría

- **Prueba de Caudal Máximo y Estabilización**

Para finalizar con la validación de los sensores de caudal se realizó una prueba que identifica el comportamiento inicial y se determina el valor de caudal máximo, punto en el que alcanza una medición estable. El tiempo de prueba duró 5 minutos y se comprobó las variaciones iniciales que son causada inicialmente por el llenado de tuberías y la presión hidráulica alcanzando progresivamente una estabilización del caudal.

**Tabla 42**

*Caudal registrado durante prueba de 5 minutos*

| Tiempo (s) | Caudal sin goteo (L/min) | Caudal goteo (L/min) |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 10 | 18,48 | 17,36 |
| 30 | 25,84 | 20,24 |
| 60 | 24,59 | 7,57 |

| | | |
|---|---|---|
| 120 | 24,19 | 7,01 |
| 300 | 24,77 | 7,04 |
| 310 | 0 | 0 |

Fuente: Autoría

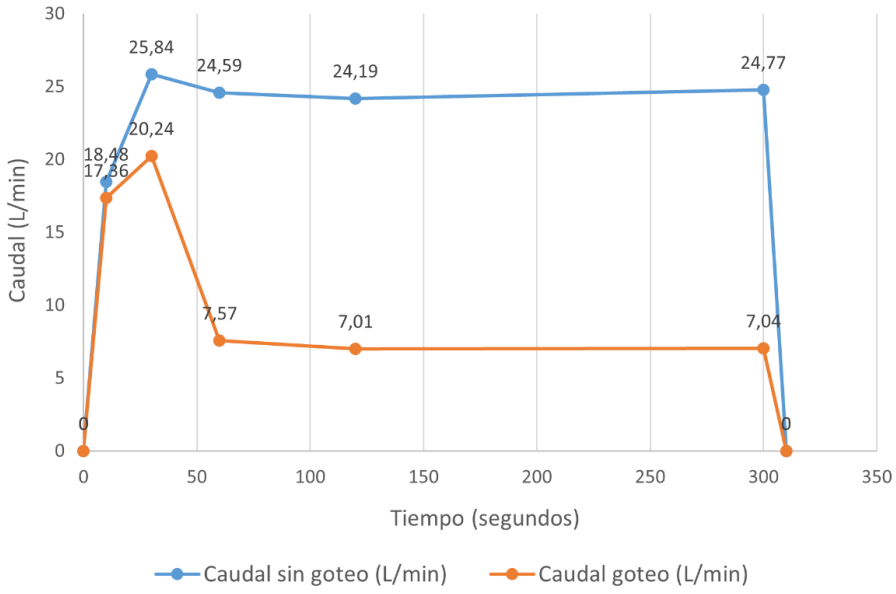
Los resultados obtenidos en la Tabla 42 muestran la respuesta transitoria del sistema en los primeros segundos de actividad dando paso a la estabilización de los valores de caudal. En lo que corresponde al a la sección sin goteo, en un inicio el caudal adopta un valor de 0 a 18.48 L/min, alcanzando el máximo pico a los 30 segundos con un valor de 25.84 L/min. A partir de los 60 segundos de operación se alcanza una estabilidad del caudal, situándose alrededor de los 24.5 L/min. Del lado opuesto, la sección que no implementa el sistema de goteo, el caudal inicial se eleva a su punto máximo con un valor de 20.24 L/min a los 30 segundos, no obstante, el caudal se estabiliza a los 60 segundos de operación con valores que rondan los 7.0 L/min, este comportamiento reafirma que las pérdidas del sistema a goteo son menores en comparación con el sistema que no lo implementa.

La Figura 115 ilustra de manera gráfica el comportamiento y tendencia del caudal en función del tiempo, en ambos casos se observa un ciclo inicial de ajuste de caudal debido al llenado de las tuberías y fijación de la presión, tras lo cual se estabiliza el caudal. La línea azul que muestra el caudal sin goteo mantiene una trayectoria horizontal cerca de los 24.5 L/min, un confiable indicador de que el suministro del recurso hídrico es estable.

En consecuencia, la línea naranja representa a la sección implementada goteo que desciende desde su pico a los 30 segundos para colocarse con un valor estable alrededor de los 7.0 L/min denotando el consumo moderado y constante. Al final se observa un descenso del caudal a 0 L/min, esto corresponde al apagado del sistema verificando y validando el cierre del sistema para esta prueba. En el Anexo 6 se muestra el caudal en cada instante de tiempo de realización de la prueba, validando los datos expuestos en esta sección.

**Figura 115**

*Estabilización del Caudal en función del Tiempo*




Fuente: Autoría

### 4.3 Pruebas del sistema de riego automatizado

Con el objetivo de verificar y validar el desempeño del sistema, se establece un periodo de pruebas desde el 1 al 30 de abril del 2026. Durante el periodo mencionado se monitoreó el cultivo y a su vez el comportamiento del sistema automático en condiciones de campo y operación real cabe señalar que la recomendación y criterio del experto, señala una frecuencia de riego de una semana en un cultivo de estas características. Las variables analizadas en esta prueba son inherentes a la activación mediante la lógica difusa diseñada, el tiempo de riego calculado y el consumo de agua en cada evento.

#### 4.3.1 Activación automática mediante lógica difusa

En este punto, el sistema realizó activaciones en base a la lógica difusa como se aprecia en la Tabla 43, constatando el comportamiento de periodicidad para el cultivo. Además se prioriza la activación del sistema cuando las condiciones ambientales y de suelo lo requieran,

como salida del sistema difuso se tiene el tiempo de irrigación mismo que se registra junto al consumo total de agua cuando el evento ha finalizado.

**Tabla 43**

*Registro de pruebas del sistema de riego automatizado*

| N° | Fecha | Tipo de activación | Regla difusa aplicada | Tiempo de riego (min) | Volumen Total de Goteo (L) | Volumen Total Sin Goteo (L) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 02/04/2026 | Automática | Regla 2 | 60 | 365.55 | 1180.94 |
| 2 | 09/04/2026 | Automática | Regla 8 | 53 | 325.67 | 1048.46 |
| 3 | 16/04/2026 | Automática | Regla 4 | 27 | 173.43 | 544.072 |
| 4 | 23/04/2026 | Automática | Regla 15 | 60 | 364.6 | 1183.2 |
| 5 | 30/04/2026 | Automática | Regla 14 | 20 | 137.69 | 406.20 |

Fuente: Autoría

Los eventos registrados durante el periodo de pruebas evidencian la operación mediante lógica difusa, y el consumo de agua en cada evento, se evidencia un consumo hídrico controlado en los dos diferentes casos, donde se comprueba la eficiencia de consumo de agua mediante el sistema implementado. Estos comportamientos controlados mediante las reglas difusas permiten al sistema realizar las inferencias de manera controlada evitando irrigaciones no contempladas fuera de horarios pertinentes.

### 4.3.2 Respuesta del sistema ante condiciones normales y críticas

Como se observó en la sección anterior, las pruebas de riego automatizado se realizaron durante un mes con una frecuencia de siete días por recomendación del experto. En esta sección se analiza el sistema frente a condiciones climáticas críticas y normales dependiendo del día, hora y estación climática, registrando los eventos acordes a la decisión de la lógica difusa permitiendo validar las reglas de mayor grado de pertenencia y observar el comportamiento de

la salida del sistema. Para esta prueba se hace uso de la base de datos creada en InfluxDB donde se registran las variables ambientales Temperatura, Humedad Ambiente, Humedad del Suelo y Tiempo de Riego, esto permite analizar los casos críticos y evaluar la tendencia del sistema. Cabe resaltar que estas pruebas evalúan la inferencia del sistema difuso solamente, más no se realiza el riego, esto con el fin de evitar el desperdicio del recurso hídrico y sobre irrigar al cultivo.

Se estableció un periodo de evaluación de seis días, en este periodo se adquirieron datos en diferentes franjas horarias, el principal objetivo del planteamiento de este enfoque permitió obtener varios datos ambientales para establecer conjuntos propios de las variables y realizar el análisis pertinente de la salida del sistema difuso evitando un monitoreo prolongado, principalmente por que el comportamiento del sistema depende de las variables ambientales de entrada, mas no del tiempo de monitoreo. En función de estos antecedentes, la Tabla 44 muestra el esquema de mediciones que se empleará para la toma de datos de manera estructurada y justificable, cabe mencionar que estos escenarios se definen en un entorno "ideal" sin embargo dependiendo de las condiciones del día se adaptarán a los cambios y justificaciones técnicas como por ejemplo, si el día está lluvioso, caluroso, húmedo, parcialmente nublado, etc.

**Tabla 44**

*Horarios de medición por día*

| Medición | Horario | Justificación Técnica |
|---|---|---|
| 1 | 06:00 – 07:00 | Baja temperatura, alta humedad; condición no crítica |
| 2 | 8:30 – 10:30 | Baja humedad ambiental, temperatura media; condición no crítica |
| 3 | 12:00 – 13:30 | Pico térmico; condición crítica alta |
| 4 | 16:00 – 17:30 | Transición térmica; evaluación de adaptación |

| | | |
|---|---|---|
| 5 | 20:00 – 21:30 | Recuperación ambiental; validación de reducción o aumento de riego |

Fuente: Autoría

- **Día 1 – Condiciones Normales**

Con el fin de realizar una adquisición de datos exacta, se procede a realizar la extracción de datos en horas intermedias o dentro de los intervalos planteados en la Tabla 44, esto con el fin de que las variables se estabilicen antes de la transición horaria entre cada intervalo. El día 1 de la prueba presentó una condición climática normal, la tendencia en la mañana fue un tanto soleado, en tanto que en la tarde se presentó nubosidad moderada considerando los valores como estables, con base en estas condiciones, las variables tomadas en las horas especificadas se muestran en la Tabla 45 representando el sistema difuso con sus variables de entrada y la salida.

**Tabla 45**

*Variables ambientales y salida del sistema – Día 1*

| Día | Hora | Temperatura (°C) | Humedad Ambiente (%) | Humedad del Suelo (%) | Tiempo de Riego (s) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 06:30 | 17.32 | 89 | 37.54 | 300 |
| | 9:00 | 22.45 | 52.2 | 42.12 | 600 |
| 04/05/2026 | 12:30 | 29.35 | 12.5 | 41 | 800 |
| | 17:30 | 23.44 | 24 | 42.69 | 800 |
| | 21:30 | 19.45 | 66 | 43.98 | 1200 |

Fuente: Autoría

El análisis de los resultados pertenecientes al Día 1 de pruebas, se presenta una tendencia coherente y que se adapta al sistema de riego en base a las reglas de lógica difusa en

función de las condiciones ambientales de cada hora del día. En lo que respecta a las primeras horas del día, la generación de tiempos de riego reducido se debe a las bajas temperaturas y alta humedad relativa, en tanto que en horas posteriores la temperatura aumento y la humedad relativa disminuyó esto genera una transición progresiva en el tiempo de riego proporcionando una respuesta concreta ante los escenarios de mayor demanda del recurso hídrico. Finalmente, ya llegada la noche, si bien es cierto que la temperatura presenta una reducción significativa y la humedad ambiente elevó su magnitud, el sistema provee un tiempo de riego elevado, esto justifica la inferencia del sistema difuso en considerar la influencia predominante de la humedad del suelo. Estos resultados demuestran la dinámica y comportamiento no lineal del sistema y evalúan la capacidad en la toma de decisiones acorde a las variables climáticas de entrada.

Adicionalmente, en la Tabla 46 se muestran las reglas de lógica difusa que actúan en cada caso, esto permite identificar que el sistema difuso responde según las funciones de pertenencia definidas en base a las condiciones de entrada del sistema difuso.

**Tabla 46**

*Reglas difusas activadas – Día 1*

| Día | Hora | Regla Difusa Empleada |
|---|---|---|
| 04/05/2026 | 06:30 | Regla 37: IF TMP=TE AND HA=PC AND HS=S THEN WR=MB |
| | 9:00 | Regla 26: IF TMP=TE AND HA=AR AND HS=S THEN WR=M |
| | 12:30 | Regla 9: IF TMP=AB AND HA=AM AND HS=S THEN WR=M |
| | 17:30 | Regla 32: IF TMP=TE AND HA=AM AND HS=S THEN WR=M |
| | 21:30 | Regla 8: IF TMP=TE AND HA=PM AND HS=S THEN WR=M |

Fuente: Autoría

En la primera medición tomada a las 06:30, la regla activada corresponde al número 37 que está asociada a una temperatura templada, la humedad ambiental se cubre parcialmente y

la humedad del suelo figura como suelo seco, lo que genera un tiempo de riego muy bajo. Esta respuesta en específico se debe a las condiciones de alta humedad relativa en primeras horas de la mañana, aquí la necesidad hídrica del cultivo es menor. Para las 09:00 la regla activada fue la número 26 en tanto que a las 12:30 y 17:30 las reglas predominantes fueron las número 9 y 32 respectivamente, lo que se asocia a estados de humedad del suelo seco (S), como consecuencia los tiempos de riego compensan el incremento de la temperatura y disminución de la humedad ambiental. Por último, a las 21:30 se activó la regla 8, manteniendo la condición de temperatura templada y humedad ambiente parcial y un tiempo de riego medio, por la presencia de bajos niveles de humedad en el suelo. La activación de múltiples reglas en los diferentes horarios demuestra la capacidad del sistema difuso para modificar su salida, garantizando la toma de decisiones correcta y coherente.

- **Día 2 – Condiciones de Repetibilidad**

El día 2 de la prueba presentó condiciones climáticas similares a las del día 1 teniendo una presencia luz solar parcial con nubosidad moderada y ambiente seco en la mañana, en tanto que en la tarde se presentó baja nubosidad y presencia solar de intensidad media-alta, estas variables se muestran en la Tabla 47. En las primeras horas de la mañana la temperatura fue aumentando hasta alcanzar su pico a las 12:30 en tanto que la humedad del suelo se mantuvo en un rango de 44 a 55 % en todo el día. La salida difusa del sistema responde acorde a la necesidad hídrica del cultivo, manteniéndose en rangos de Bajo (B) y Moderado (M) durante el día.

**Tabla 47**

*Variables ambientales y salida del sistema – Día 2*

| Día | Hora | Temperatura (°C) | Humedad Ambiente (%) | Humedad del Suelo (%) | Tiempo de Riego (s) |
|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 06:30 | 16.28 | 63 | 44.68 | 1101 |
| | 9:00 | 24.33 | 31 | 45.12 | 300 |
| 05/05/2026 | 12:30 | 31.37 | 9.1 | 55.63 | 194 |
| | 17:30 | 24.8 | 22 | 38 | 703 |
| | 21:30 | 18.34 | 62.6 | 48.69 | 477 |

Fuente: Autoría

La Tabla 48 evidencia las reglas difusas que se activaron en cada caso, lo que permite relacionar el comportamiento del sistema en base al conocimiento que posee. Los rangos del tiempo de riego variaron entre bajo (B) y Moderado (M), mostrando la repetibilidad en comparación con el día 1.

**Tabla 48**

*Reglas difusas activadas – Día 2*

| Día | Hora | Regla Difusa Empleada |
|---|---|---|
| | 06:30 | Regla 8: IF TMP=TE AND HA=PM AND HS=S THEN WR=M |
| | 9:00 | Regla 27: IF TMP=TE AND HA=AR AND HS=H THEN WR=B |
| 05/05/2026 | 12:30 | Regla 39: IF TMP=AB AND HA=IN AND HS=H THEN WR=B |
| | 17:30 | Regla 32: IF TMP=TE AND HA=AM AND HS=S THEN WR=M |
| | 21:30 | Regla 8: IF TMP=TE AND HA=PM AND HS=S THEN WR=M |

Fuente: Autoría

- **Día 3 – Evaluación bajo condiciones de alta humedad ambiental**

Para el día 3 se registró condiciones climáticas críticas de humedad ambiental en gran parte del día, en la mañana se tuvo presencia de chubascos acompañado de vientos fuertes lo que posteriormente proporcionó una lluvia corta pero perfecta para proveer al sistema difuso de las variables ambientales con valores altos, dando paso a un escenario real y poder evaluar

el sistema bajo estas condiciones, para la tarde se presentó alta nubosidad y un descenso de temperatura con sensación térmica fría manteniéndose esta última hasta la noche de realizada la última medición. La Tabla 49 muestra las variables climáticas obtenidas y se resalta la alta humedad ambiental, así como la magnitud constante de la humedad del suelo.

**Tabla 49**

Variables ambientales y salida del sistema – Día 3

| Día | Hora | Temperatura (°C) | Humedad Ambiente (%) | Humedad del Suelo (%) | Tiempo de Riego (s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 06/05/2026 | 06:30 | 16.52 | 72 | 46.22 | 593 |
| | 9:00 | 19.56 | 57.45 | 46.81 | 650 |
| | 12:30 | 21.5 | 60.47 | 46.06 | 685 |
| | 17:30 | 22.42 | 17 | 44.88 | 701 |
| | 21:30 | 19.3 | 35 | 44.42 | 700 |

Fuente: Autoría

La salida difusa del sistema para el día 3 de pruebas se mantuvo en el rango Moderado (M) como se evidencia en las reglas activadas en la Tabla 50. Este comportamiento del sistema indica que la humedad ambiental y a humedad del suelo inciden directamente en la salida plateada por el sistema.

**Tabla 50**

*Reglas difusas activadas – Día 3*

| Día | Hora | Regla Difusa Empleada |
|---|---|---|
| 06/05/2026 | 06:30 | Regla 8: IF TMP=TE AND HA=PM AND HS=S THEN WR=M |
| | 9:00 | Regla 26: IF TMP=TE AND HA=AR AND HS=S THEN WR=M |

| | |
|---|---|
| 12:30 | Regla 8: IF TMP=TE AND HA=PM AND HS=S THEN WR=M |
| 17:30 | Regla 32: IF TMP=TE AND HA=AM AND HS=S THEN WR=M |
| 21:30 | Regla 26: IF TMP=TE AND HA=AR AND HS=S THEN WR=M |

Fuente: Autoría

- **Día 4 – Condiciones de transición térmica**

Como se muestra en la Tabla 51, este día existe una transición térmica presentando condiciones climáticas con presencia de nubosidad, pequeños chubascos y sensación térmica templada en la mañana, en tanto que en la tarde se presentó un alza de temperatura con presencia de luz solar, esto se interpreta como una transición en la temperatura ambiental que permite evaluar el sistema ante estas condiciones.

**Tabla 51**

*Variables ambientales y salida del sistema – Día 4*

| Día | Hora | Temperatura (°C) | Humedad Ambiente (%) | Humedad del Suelo (%) | Tiempo de Riego (s) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 06:30 | 18.41 | 42.9 | 41.27 | 687 |
| | 9:00 | 21.4 | 32.7 | 40.96 | 708 |
| 07/05/2026 | 12:30 | 26.7 | 19 | 37 | 696 |
| | 17:30 | 25.11 | 15.46 | 38.23 | 702 |
| | 21:30 | 23.4 | 71.41 | 41.75 | 687 |

Fuente: Autoría

Las reglas prominentes activadas en este día de pruebas presentan cambios respecto al día 3, estableciéndose en el rango Bajo (B) y Moderado (M), además, la relación con las condiciones ambientales establece un escenario de condiciones críticas para la temperatura, permitiendo analizar los cambios respecto a la salida difusa del sistema.

**Tabla 52**

*Reglas difusas activadas – Día 4*

| Día | Hora | Regla Difusa Empleada |
|---|---|---|
| 07/05/2026 | 06:30 | Regla 26: IF TMP=TE AND HA=AR AND HS=S THEN WR=M |
| | 9:00 | Regla 27: IF TMP=TE AND HA=AR AND HS=H) THEN WR=B |
| | 12:30 | Regla 9: IF TMP=AB AND HA=AM AND HS=S THEN WR=M |
| | 17:30 | Regla 32: IF TMP=TE AND HA=AM AND HS=S THEN WR=M |
| | 21:30 | Regla 8: IF TMP=TE AND HA=PM AND HS=S THEN WR=M |

Fuente: Autoría

- **Día 5 – Alta temperatura - transición suelo seco**

Condiciones soleadas todo el día altas temperaturas, baja humedad ambiental, reducción significativa de la humedad del suelo. Para el quinto día de pruebas se evidenció un cambio significativo en las variables ambientales como lo muestra la Tabla 53, aquí se presenta una temperatura alta, baja humedad ambiente y la transición de los valores de humedad del suelo a niveles bajos. A partir de este día es que se evalúa el estrés hídrico del cultivo y la respectiva salida del sistema para contrarrestar estas condiciones.

**Tabla 53**

*Variables ambientales y salida del sistema – Día 5*

| Día | Hora | Temperatura (°C) | Humedad Ambiente (%) | Humedad del Suelo (%) | Tiempo de Riego (s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 08/05/2026 | 06:30 | 14.52 | 65 | 40.95 | 67 |
| | 9:00 | 26.55 | 16.35 | 40.11 | 697 |
| | 12:30 | 30.44 | 8.1 | 43.28 | 60 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 17:30 | 25.52 | 9 | 12.55 | 2306 |
| 21:30 | 19.39 | 65.01 | 21.89 | 2257 |

Fuente: Autoría

Los cambios en las reglas difusas activadas presentan el aumento de la magnitud de salida del sistema, es decir, el tiempo de riego (WR). Como se muestra en la Tabla 54, los conjuntos de salida usados en este día son 4 de los 5 planteados en el sistema difuso, esto quiere decir que el sistema se comporta de forma eficaz ante condiciones de mayor estrés hídrico.

**Tabla 54**

*Reglas difusas activadas – Día 5*

| Día | Hora | Regla Difusa Empleada |
|---|---|---|
| 08/05/2026 | 06:30 | Regla 30: IF TMP=F AND HA=PM AND HS=S THEN WR=MB |
| | 9:00 | Regla 9: IF TMP=AB AND HA=AM AND HS=S THEN WR=M |
| | 12:30 | Regla 17: IF TMP=F AND HA=PM AND HS=SA THEN WR=N |
| | 17:30 | Regla 41: IF TMP=AB AND HA=IN AND HS=SE THEN WR=E |
| | 21:30 | Regla 3: IF TMP=TE AND HA=PM AND HS=SE THEN WR=E |

Fuente: Autoría

- **Día 6 - Condiciones extremas de estrés hídrico**

La humedad del suelo para este día bajó gradual y significativamente, hasta alcanzar un valor mínimo de 19.84 % como se muestra en la Tabla 55, esto representa una condición crítica de estrés hídrico en el cultivo, adicionalmente, se puede evidenciar que la humedad ambiental alcanzó valores mínimos ente las 09:00 hasta las 17:30 representando una mayor evapotranspiración del cultivo ligada a la alta temperatura en estos horarios.

**Tabla 55**

*Variables ambientales y salida del sistema – Día 6*

| Día | Hora | Temperatura (°C) | Humedad Ambiente (%) | Humedad del Suelo (%) | Tiempo de Riego (s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 09/05/2026 | 06:30 | 16.47 | 55.54 | 36.62 | 618 |
| | 9:00 | 27.08 | 15.71 | 23.01 | 1835 |
| | 12:30 | 29.58 | 9 | 21.12 | 3050 |
| | 17:30 | 27.43 | 11.2 | 20.07 | 3200 |
| | 21:30 | 18.45 | 60.6 | 19.84 | 2800 |

Fuente: Autoría

Como se evidenció en la Tabla 55, la salida difusa, en su gran mayoría, presenta valores de tiempo de riego entre 2800 y 3050, estos valores pertenecen al conjunto Elevado (E) de la función de pertenencia Tiempo de riego (WR), las reglas difusas activadas en este día de pruebas presentadas en la Tabla 56 validan el comportamiento del sistema difuso en función de las variables de entrada, estableciendo un modelo coherente, no lineal y adaptativo a los cambios críticos de los parámetros.

**Tabla 56**

*Reglas difusas activadas – Día 6*

| Día | Hora | Regla Difusa Empleada |
|---|---|---|
| 09/05/2026 | 06:30 | Regla 26: IF TMP=TE AND HA=AR AND HS=S THEN WR=M |
| | 9:00 | Regla 41: IF TMP=AB AND HA=IN AND HS=SE THEN WR=E |
| | 12:30 | Regla 41: IF TMP=AB AND HA=IN AND HS=SE THEN WR=E |
| | 17:30 | Regla 41: IF TMP=AB AND HA=IN AND HS=SE THEN WR=E |

| | |
|---|---|
| 21:30 | Regla 3: IF TMP=TE AND HA=PM AND HS=SE THEN WR=E |

Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos en los seis días de evaluación demuestran la validez del comportamiento adaptativo y estabilidad del sistema de riego automático con lógica difusa cambiando frente a los escenarios ambientales. Las variaciones en la salida difusa del sistema evidencian una respuesta proporcional y coherente ante condiciones normales y críticas. De la misma forma, se confirmó la capacidad del sistema en la toma dinámica de decisiones, lo que modela un sistema de respuesta no lineal que ante pequeñas variaciones, cambia recurrentemente.

Por ende, es imperativo concluir que el modelo difuso implementado optimiza el uso del suministro del recurso hídrico disponible aplicando ajustes automáticos del tiempo de irrigación, lo que garantiza la operación estable y se adapta a las necesidades meramente hídricas del cultivo en función de las variables de entrada, en este caso las condiciones climáticas.

### 4.3.3 Funcionamiento del control manual remoto

Para la validación de la operación remota del sistema se efectuaron pruebas de activación/desactivación desde el Dashboard de monitoreo y control en Thinger.io. Las pruebas consistieron en el envío constante de comandos de activación y desactivación hacia el Nodo Actuador, lo que permitió evidenciar los tiempos de respuesta, actualización de los sensores de caudal y la ejecución correcta del comando. Como parte del desarrollo es imprescindible señalar que el control automático es un requerimiento del usuario, además sirve como mecanismo de intervención oportuno ante necesidades no consideradas por el modo automático.

- **Activación Manual Remota**

Esta prueba consistió en realizar cinco operaciones de encendido mediante el envío del comando de activación desde el Dashboard haciendo uso de un switch como se observa en la Figura 116, en un estado inicial los actuadores se encuentran apagados (off). Mediante la ayuda de la interfaz de monitoreo se captura la hora exacta en que el comando es enviado y se cronometra el tiempo de respuesta permitiendo verificar el control manual.

**Figura 116**

*Switch de control de encendido y apagado de electroválvulas*




Fuente: Autoría

Como mecanismo de validación experimental, la prueba se la realizó in situ para evaluar con inmediatez el tiempo de respuesta. La Tabla 57 muestra los resultados obtenidos y los parámetros medidos, el envío del comando que es el momento en que se activa el switch desde el Dashboard, el tiempo de respuesta es el tiempo cronometrado (revisar Anexo 7) y también las respectivas observaciones que describen el estado de la acción.

**Tabla 57**

*Resultados de pruebas de activación manual remota*

| Prueba | Hora de Envío del comando | Tiempo de respuesta (s) | Estado obtenido | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 16:45:00 | 00:01.14 | Correcto | Retardo en la comunicación |
| 2 | 16:46:00 | 00:00.85 | Correcto | Activación inmediata |
| 3 | 16:47:00 | 00:00.47 | Correcto | Activación inmediata |
| 4 | 16:48:00 | 00:00.41 | Correcto | Activación inmediata |
| 5 | 16:49:00 | 00:00.40 | Correcto | Activación inmediata |

Fuente: Autoría

Como se puede apreciar, los resultados de la activación manual remota denotan tiempos de respuesta sumamente bajos que es un sinónimo de una comunicación y funcionamiento estable del sistema de riego. En torno a las cinco repeticiones realizadas, el estado fue correcto en el 100% de los casos, demostrando que la comunicación que se establece entre el Dashboard y el actuador es confiable. De la misma manera, los tiempos de respuesta tienden a decrecer pasando de 1.14 segundos en la primera prueba, a 0.40 segundos en la ejecución final. Lo que sugiere una estabilización progresiva de la comunicación entre los dispositivos involucrados. Operativamente hablando, se concluye que el sistema tiene la capacidad de respuesta inmediata

en tiempo real para el riego inteligente y controlado, asegurando la intervención por parte del usuario en casos donde el modo automático no sea contemplado.

- **Desactivación manual remota**

Al contrario de la prueba anterior, la desactivación del sistema consiste en evaluar el tiempo de respuesta en que el sistema deja de operar una vez enviado el comando de desactivación, para esta prueba el estado inicial de las electroválvulas es encendido (On), los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 58 y se pueden comprobar en el Anexo 7. Adicionalmente, las observaciones aunque simplificadas, establecen la caracterización e interpretación del evento, esto se realiza con el fin de poder deducir la inmediatez de cumplimiento del comando de desactivación.

**Tabla 58**

*Resultados de pruebas de desactivación manual remota*

| Prueba | Hora de Envío del comando | Tiempo de respuesta (s) | Estado obtenido | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 16:55:00 | 00:01.32 | Correcto | Retardo en la comunicación |
| 2 | 16:56:00 | 00:05.33 | Correcto | Retardo alto en la comunicación |
| 3 | 16:57:00 | 00:00.27 | Correcto | Activación inmediata |
| 4 | 16:58:00 | 00:01.27 | Correcto | Activación inmediata |
| 5 | 16:59:00 | 00:00.59 | Correcto | Activación inmediata |

Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos muestran un 100% de acciones correctas de desactivación en los cinco casos, sin embargo el comportamiento del tiempo de respuesta presenta su pico

máximo de tiempo en la segunda prueba y un mínimo en la tercera prueba con valores de 5.33 segundos y 0.27 segundos respectivamente. El alto tiempo de respuesta se debe al retardo en la red móvil celular que se emplea para acceder al Dashboard en Thinger.io, al estar ubicado en el predio existe poca recepción, esto no representa un mal funcionamiento, si no, al contrario, se evalúa un escenario real en donde la comunicación de la red móvil puede ser un tanto deficiente. En síntesis la tendencia de respuesta plasma tiempos relativamente bajos al igual que en las pruebas de activación del sistema, por lo que la capacidad de respuesta es inmediata garantizando la operatividad eficaz en eventos de irrigación no permanentes.

- **Prioridad del control manual sobre el automático**

Priorizar el control en un sistema de irrigación es de suma importancia ante casos no esperados como por ejemplo una lectura errónea de los sensores o una irrigación fuera de horarios recomendados, es por eso por lo que el control manual actúa como un mecanismo de prevención ante posibles eventos no listados.

Para esta prueba se emplea el mecanismo automático, es decir la lógica difusa y se realiza un ciclo de irrigación en base a las variables de entrada y las reglas establecidas, una vez que el riego comience se evidencia el flujo de caudal en el Dashboard, posteriormente, se procede a activar y desactivar el switch, registrando el control manual sobre el automático y evidenciando con los logs del sistema.

En la Figura 117 se ilustra las variables de entrada del sistema y la salida en forma de series de tiempo lo que permite observar el tiempo de riego en cada instante del día que calcula la lógica difusa, para esta prueba en concreto se activa el riego en base a las condiciones mostradas, como se puede observar, el tiempo de riego es de 39.52 minutos, Node-RED envía el comando hacia el Gateway y este lo reenvía hacia el Nodo Actuador.

**Figura 117**

*Variables ambientales y tiempo de riego calculado*

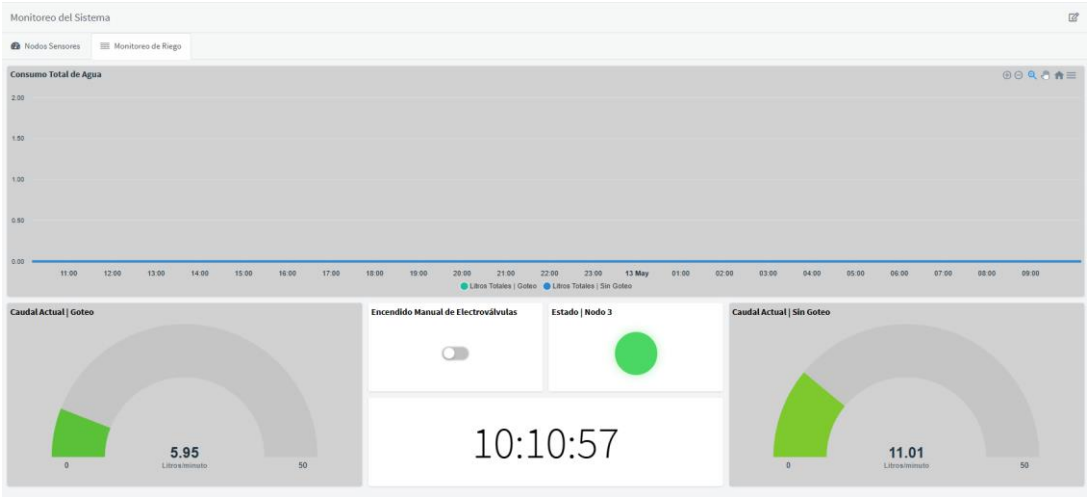



Fuente: Autoría

En la Figura 118 se muestra el Dashboard dedicado a la parte del Nodo Actuador, aquí se monitorea el consumo total del agua en cada riego, el flujo de caudal, estado del Nodo, y control manual, además se puede apreciar que, en los medidores está circulando caudal lo que indica que el riego se activó correctamente.

**Figura 118**

*Dashboard de monitoreo*

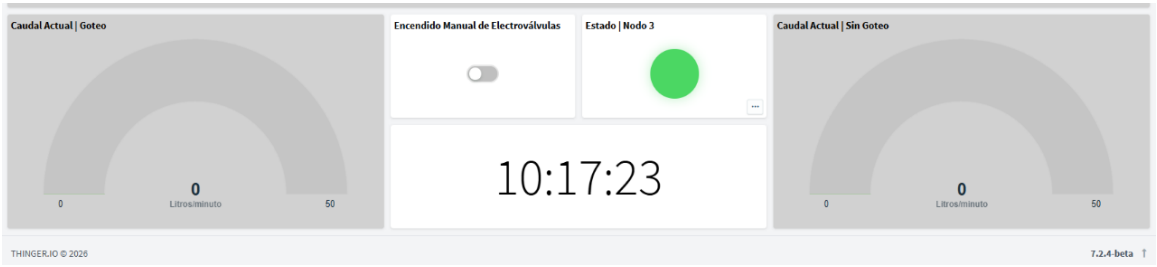



Fuente: Autoría

Se procede a accionar el switch y verificar que el flujo disminuya paulatinamente hasta alcanzar el valor de cero, como ilustra la Figura 119, una vez desactivado el caudal empieza a disminuir hasta no mostrar magnitudes en los medidores.

**Figura 119**

*Disminución a cero de los medidores de caudal*




Fuente: Autoría

Además en los logs de Node-RED se evidencia que el bloqueo de la lógica difusa es hasta dentro de una hora, este parámetro se puede configurar con el fin de evitar conflictos entre el modo automático y el modo de control manual, priorizando el control manual sobre el automático.

**Figura 120**

*Logs de Bloqueo del Riego*




Fuente: Autoría

Las pruebas de control manual dieron paso a la validación del correcto funcionamiento y se comprobó la tendencia de tiempos de respuesta bajos, este mecanismo complementa al

sistema automático por razones que se explicaron a lo largo de la sección 4.3.3. El modo automático que se basa en lógica difusa optimiza el consumo de agua en base a reglas y condiciones autónomas que dan una salida no lineal, en tanto que el modo manual provee al usuario la capacidad de intervención de forma inmediata en condiciones de mantenimiento o contingencia. Es así como la coexistencia de estos dos modos de control y operación garantiza e incrementa la confiabilidad y capacidad del sistema en términos de supervisión y control.

### 4.3.4 Pruebas de Riego Manual

Como se pudo comprobar en las dos secciones anteriores, el control manual es funcional, estable y priorizado. Esta sección aborda las pruebas de riego usando el control manual de manera directa sin intervención de la inferencia difusa, esta funcionalidad se implementó con el objetivo de proporcionar al usuario beneficiario la intervención en situaciones específicas que considere pertinente realizar el riego de forma inmediata, cabe señalar que la intervención el usuario la realiza de manera visual del estado del cultivo, necesidades temporales no contempladas o climas particulares que son parámetros y condiciones que el sistema difuso no abarca.

Las pruebas de riego manual se realizaron a la par de la evaluación de la sección 4.3.2 desde el 04/05/2026 hasta el 15/05/2026 durante este tiempo el propietario del predio consideró ciertas condiciones relacionadas con actividades agrícolas del cultivo donde el riego es necesario, como por ejemplo signos de marchitez en las plantas, ausencia de lluvias durante varios días, aplicación de fertilizante, entre otras. En la Tabla 59 se observan los casos considerados y las acciones pertinentes.

**Tabla 59**

*Condiciones de pruebas del riego manual*

| Fecha | Condición observada por el usuario | Acción realizada | Tiempo de riego (min) |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| 04/05/2026 | Temperatura elevada al medio día | Incremento de humedad preventivo | 30 |
| 06/05/2026 | Plantas con leves signos de marchitez | Riego correctivo | 25 |
| 08/05/2026 | Aplicación de fertilizante | Humedecimiento posterior a la fertilización | 15 |
| 13/05/2026 | Ausencia de lluvia en varios días | Compensación de la humedad | 120 |
| 15/05/2026 | Suelo visualmente seco | Riego complementario | 20 |

Fuente: Autoría

De la misma forma, la Tabla 60 registra el consumo de agua realizado en cada prueba, esto permite realizar un análisis del consumo en estos casos en específico.

**Tabla 60**

*Consumo de agua de las pruebas de riego manuales*

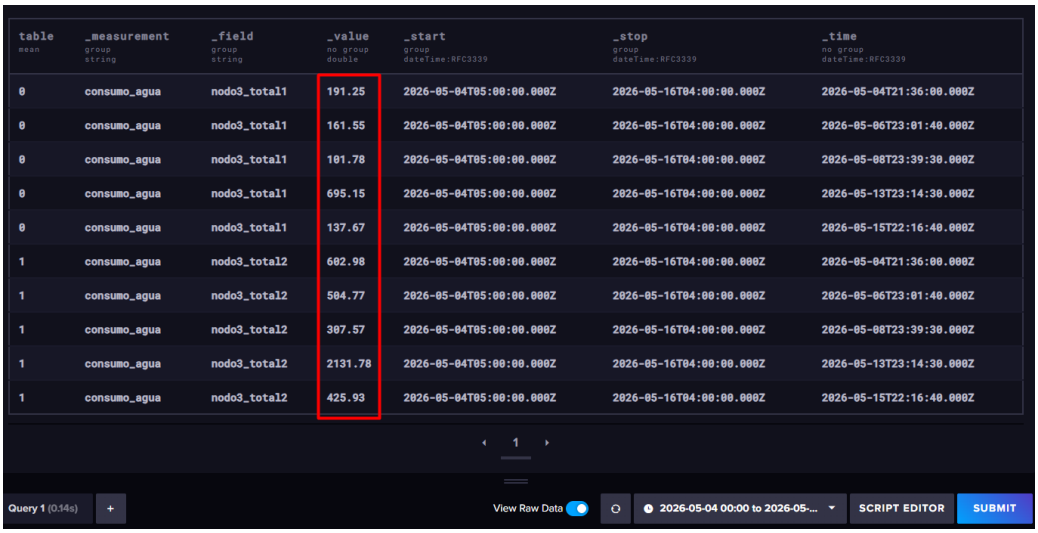
| Fecha | Tiempo de Riego (min) | Volumen Total de Goteo (L) | Volumen Total Sin Goteo (L) |
|---|---|---|---|
| 04/05/2026 | 30 | 191.25 | 602.98 |
| 06/05/2026 | 25 | 161.55 | 504.77 |
| 08/05/2026 | 15 | 101.78 | 307.57 |
| 13/05/2026 | 120 | 695.15 | 2131.78 |
| 15/05/2026 | 20 | 137.67 | 425.93 |

Fuente: Autoría

Los registros obtenidos durante esta prueba se encuentran registrados en la base de datos InfluxDB denominada “Consumo_Agua” como se ilustra en la Figura 121 presentada a continuación.

**Figura 121**

*Registros del consumo de agua del modo manual en InfluxDB*



| table | _measurement | _field | _value | _start | _stop | _time |
|---|---|---|---|---|---|---|
| mean | group string | group string | no group double | group dateTime:RFC3339 | group dateTime:RFC3339 | no group dateTime:RFC3339 |
| 0 | consumo_agua | nodo3_total1 | 191.25 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-04T21:36:00.000Z |
| 0 | consumo_agua | nodo3_total1 | 161.55 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-06T23:01:40.000Z |
| 0 | consumo_agua | nodo3_total1 | 101.78 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-08T23:39:30.000Z |
| 0 | consumo_agua | nodo3_total1 | 695.15 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-13T23:14:30.000Z |
| 0 | consumo_agua | nodo3_total1 | 137.67 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-15T22:16:40.000Z |
| 1 | consumo_agua | nodo3_total2 | 602.98 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-04T21:36:00.000Z |
| 1 | consumo_agua | nodo3_total2 | 504.77 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-06T23:01:40.000Z |
| 1 | consumo_agua | nodo3_total2 | 307.57 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-08T23:39:30.000Z |
| 1 | consumo_agua | nodo3_total2 | 2131.78 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-13T23:14:30.000Z |
| 1 | consumo_agua | nodo3_total2 | 425.93 | 2026-05-04T05:00:00.000Z | 2026-05-16T04:00:00.000Z | 2026-05-15T22:16:40.000Z |



Fuente: Autoría

### 4.3.5 Evaluación del consumo y eficiencia del uso del agua

El seguimiento del consumo del agua evalúa el desempeño hídrico del sistema implementado en el cultivo de aguacate “Fuerte” , para esto se realizó un análisis del consumo del recurso en base a las pruebas realizadas en la sección 4.3.1 y 4.3.4, es importante señalar que el modo automático contempla exclusivamente el control de humedad del suelo, en tanto que el modo manual si bien se puede utilizar con este mismo fin el enfoque que toma se basa en actividades agrícolas no contempladas, es por esto que se evalúa el consumo de agua de ambos modos.

Los resultados de la Tabla 61 muestran el registro del consumo de cada evento, para el almacenamiento de los datos se configuró previamente una función en Node-RED, y la base de datos que almacena el tiempo de riego, volumen consumido en litros (L) de la sección con riego a goteo y de la sección sin goteo.

**Tabla 61**

*Consumo del agua en modo manual y automático por evento*

| N° | Fecha | Tipo de activación | Tiempo de riego (min) | Volumen Total de Goteo (L) | Volumen Total Sin Goteo (L) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 02/04/2026 | Automática | 60 | 365.55 | 1180.94 |
| 2 | 09/04/2026 | Automática | 53 | 325.67 | 1048.46 |
| 3 | 16/04/2026 | Automática | 27 | 173.43 | 544.072 |
| 4 | 23/04/2026 | Automática | 60 | 364.6 | 1183.2 |
| 5 | 30/04/2026 | Automática | 20 | 137.69 | 406.20 |
| 6 | 04/05/2026 | Manual | 30 | 191.25 | 602.98 |
| 7 | 06/05/2026 | Manual | 25 | 161.55 | 504.77 |
| 8 | 08/05/2026 | Manual | 15 | 101.78 | 307.57 |
| 9 | 13/05/2026 | Manual | 120 | 695.15 | 2131.78 |
| 10 | 15/05/2026 | Manual | 20 | 137.67 | 425.93 |

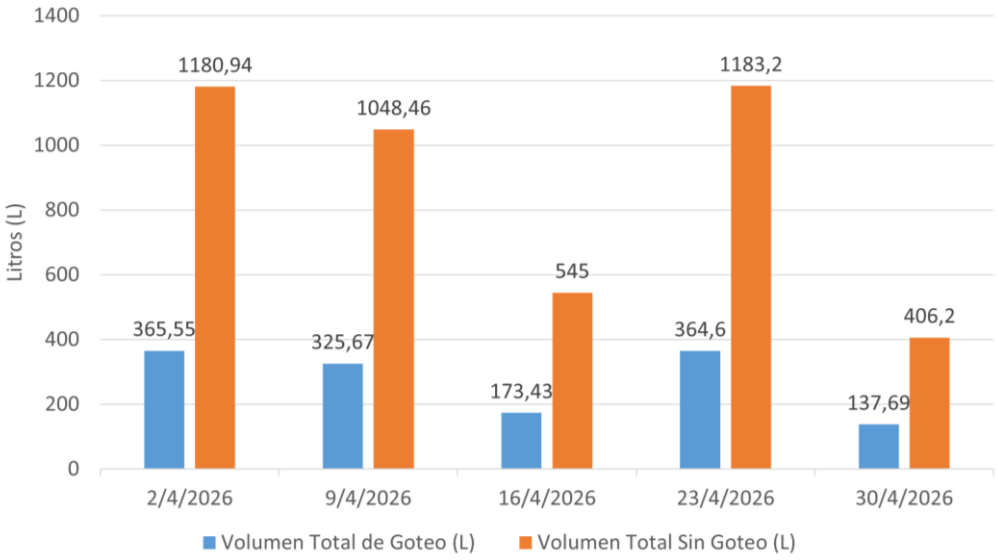
Fuente: Autoría

- **Eficiencia del uso del agua – modo automático (lógica difusa)**

Para evaluar la eficiencia hídrica del sistema, se compara el consumo total del agua en los dos escenarios planteados, es decir, en la sección de riego con goteo y sin goteo, esto representa la parte del sistema de optimización y el sistema tradicional respectivamente. La Figura 122 representa el consumo del sistema en la etapa de pruebas correspondiente a un mes mediante un gráfico de barras que permite visualizar la comparación de manera eficaz la reducción de consumo del sistema.

**Figura 122**

*Consumo total de agua por semanas – Modo Automático*




Fuente: Autoría

Según (Castillo & Rovira, 2013) el porcentaje del ahorro hídrico se calcula mediante la diferencia entre el sistema implementado y el consumo de riego tradicional evaluando así la reducción del consumo, mediante la ecuación (10).

$$EC\ (\%) = \frac{C_{convencional} - C_{implementado}}{C_{convencional}} \times 100 \qquad (10)$$

Donde:

$EC\ (\%)$ : Eficiencia de Consumo

$C_{convencional}$: Volumen total en Litros (sin goteo)

$C_{implementado}$: Volumen total en Litros (goteo)

En función de esta ecuación se calcula la eficiencia en cada caso, obteniendo como resultado la Tabla 62 presentada a continuación. Para evidenciar los cálculos realizados es pertinente revisar el Anexo 8.

**Tabla 62**

*Eficiencia del consumo de agua - Modo Automático*

| Fecha de irrigación | Eficiencia (%) |
|---|---|
| 02/04/2026 | 69,04 |
| 09/04/2026 | 68,94 |
| 16/04/2026 | 68,16 |
| 23/04/2026 | 69,19 |
| 30/04/2026 | 66,10 |

Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos presentan un promedio de eficiencia en el ahorro del agua de 68.3 %, que se obtiene del promedio de los valores en cada fecha, presentando una tendencia constante en el ahorro del agua, validando la funcionalidad y eficiencia del sistema.

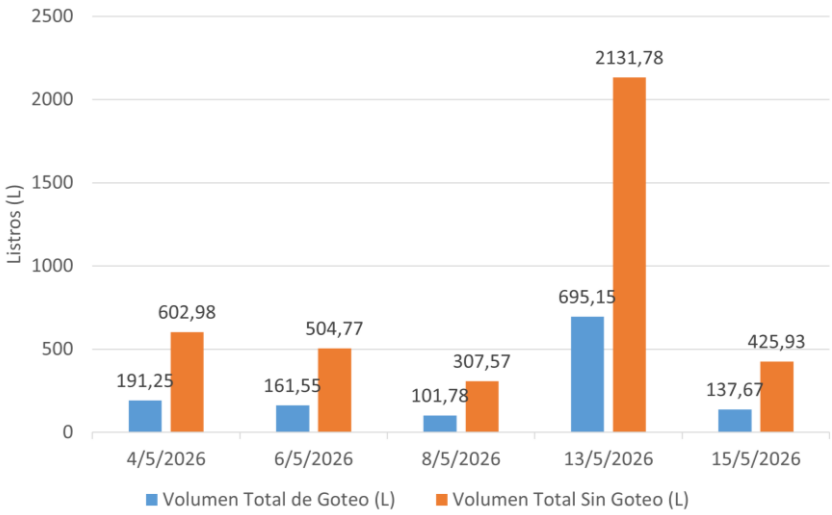
- **Eficiencia del uso del agua – modo manual**

El consumo de agua en el modo manual depende de las decisiones del usuario y de las necesidades agrícolas específicas como se ha venido explicando, aquí el tiempo de riego es distinto en cada caso, nada parecido a los tiempos calculados por la lógica difusa.

Los resultados plasmados en la Figura 123 presenta el consumo realizado por cada irrigación durante el periodo de pruebas del 04/05/2026 al 15/05/2026 y comprueban ya de antemano que el mayor consumo se realizó el 13/05/2026 en donde la sección de goteo consumió 695.15 Litros frente al método convencional que mostró un valor de consumo de 2121.78 Litros. Estos resultados demuestran que la capacidad del sistema para optimizar el suministro de agua disponible reduce pérdidas significativas y ayuda a mejorar la eficiencia hídrica del cultivo, aportando al uso sostenible del recurso.

**Figura 123**

*Consumo total de agua – Modo Manual*




Fuente: Autoría

De la misma manera en que se evaluó la eficiencia en la sección anterior, se procede a realizar los cálculos utilizando la ecuación (10) (revisar Anexo 8), los valores se presentan en la Tabla 63 mostrada a continuación.

**Tabla 63**

*Eficiencia del consumo de agua - Modo Manual*

| Fecha de irrigación | Eficiencia (%) |
|---|---|
| 4/5/2026 | 68,28 |
| 6/5/2026 | 67,99 |
| 8/5/2026 | 66,91 |
| 13/5/2026 | 67,39 |
| 15/5/2026 | 67,68 |

Fuente: Autoría

El modo manual presenta una eficiencia promedio de 67.65 %, si bien el valor es menor que en el modo automático, la eficiencia constante en ambos casos se debe al suministro

constante del recurso hídrico, esto también valida la implementación del sistema de tuberías y distribución de agua.

### 4.4 Evaluación de la plataforma IoT y monitoreo remoto

#### 4.4.1 Visualización de datos en tiempo real

El monitoreo y visualización remoto se realiza mediante la plataforma Thinger.io, en la Figura 124 se ilustra el dashboard creado denominado “Nodos Sensores” orientado al monitoreo de los Nodos 1 y 2 permitiendo visualizar las variables ambientales en tiempo real como Temperatura/Humedad Ambientales y Humedad del Suelo de ambos nodos, así como el estado de los Nodos que se muestran mediante un indicador led de color verde que significa que el nodo está conectado al Gateway y color rojo cuando el nodo está apagado, también se inserta el mapa de ubicación dentro del predio denominado “Quinta La Joya” que muestra el lugar exacto de ubicación de los dispositivos de red.

**Figura 124**

*Dashboard de monitoreo en tiempo real*

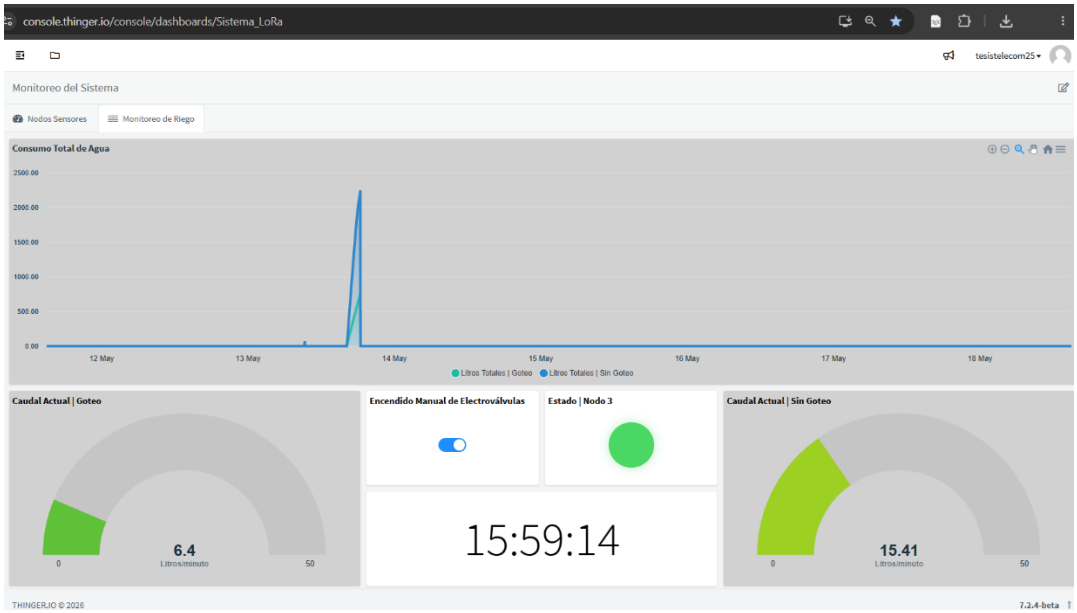



Fuente: Autoría

De la misma forma, en la Figura 125 se presenta el dashboard de control del sistema, este comprende la visualización en tiempo real del caudal, una gráfica de los registros de irrigación realizados en los últimos 7 días y adicionalmente, el control mediante un switch de las electroválvulas. Esta distribución permite optimizar el espacio y proveer la facilidad al usuario para interpretar los controles y las métricas implicadas en el riego del cultivo de aguacate.

**Figura 125**

*Dashboard de monitoreo y control del agua*




Fuente: Autoría

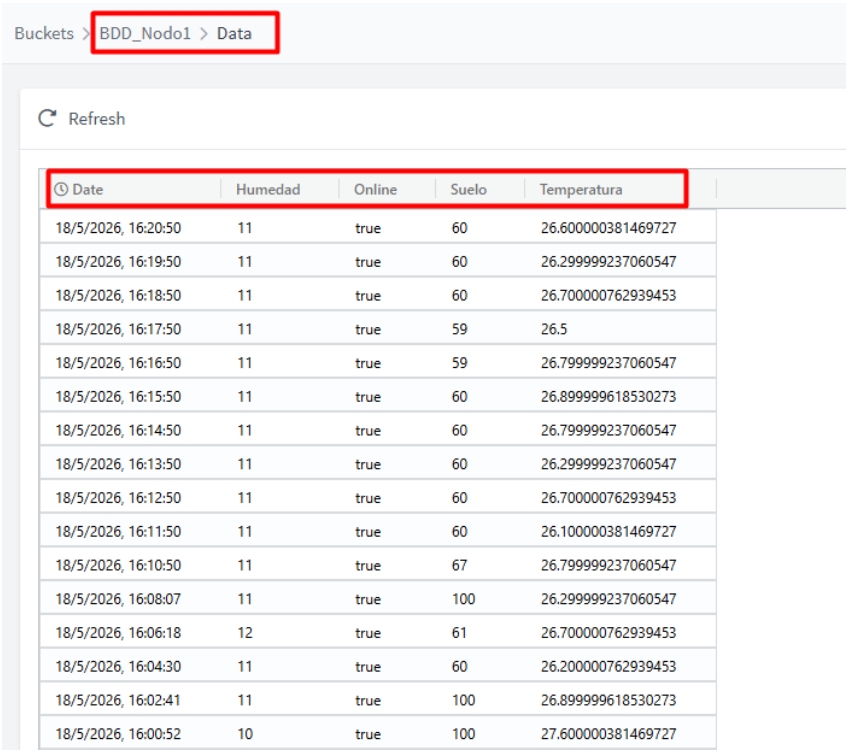
### 4.4.2 Registro y almacenamiento histórico de información

Los datos recolectados por los sensores se almacenan en una base de datos de series temporales propia de la plataforma en la nube, las bases de datos en Thinger.io se denominan “Buckets” y en el plan gratuito que ofrece la plataforma, la retención de los datos es de 1 mes, tiempo suficiente para registrar eventos para su posterior análisis. En la Figura 126 se muestra la estructura en que se almacenan los datos, para este caso se muestra la Fecha (Date), las variables monitoreadas y el estado del nodo (true/flase) dependiendo de cómo se encuentre. El

intervalo de registro es de un minuto, se toma en consideración este tiempo de registro con el fin de observar las transiciones de manera que sean visibles en las gráficas para cada caso, obteniendo así un criterio de los momentos en que las variables cambian críticamente.

**Figura 126**

*Registro en la base de datos de Thinger.io del Nodo Sensor 1*



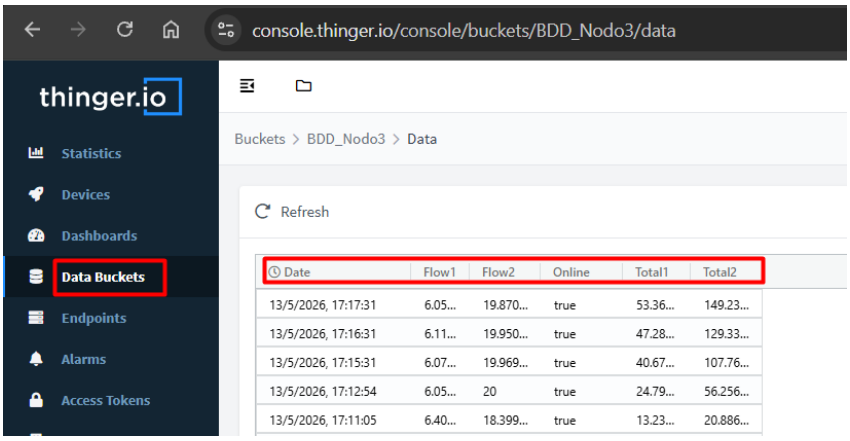

| Date | Humedad | Online | Suelo | Temperatura |
|---|---|---|---|---|
| 18/5/2026, 16:20:50 | 11 | true | 60 | 26.600000381469727 |
| 18/5/2026, 16:19:50 | 11 | true | 60 | 26.299999237060547 |
| 18/5/2026, 16:18:50 | 11 | true | 60 | 26.700000762939453 |
| 18/5/2026, 16:17:50 | 11 | true | 59 | 26.5 |
| 18/5/2026, 16:16:50 | 11 | true | 59 | 26.799999237060547 |
| 18/5/2026, 16:15:50 | 11 | true | 60 | 26.899999618530273 |
| 18/5/2026, 16:14:50 | 11 | true | 60 | 26.799999237060547 |
| 18/5/2026, 16:13:50 | 11 | true | 60 | 26.299999237060547 |
| 18/5/2026, 16:12:50 | 11 | true | 60 | 26.700000762939453 |
| 18/5/2026, 16:11:50 | 11 | true | 60 | 26.100000381469727 |
| 18/5/2026, 16:10:50 | 11 | true | 67 | 26.799999237060547 |
| 18/5/2026, 16:08:07 | 11 | true | 100 | 26.299999237060547 |
| 18/5/2026, 16:06:18 | 12 | true | 61 | 26.700000762939453 |
| 18/5/2026, 16:04:30 | 11 | true | 60 | 26.200000762939453 |
| 18/5/2026, 16:02:41 | 11 | true | 100 | 26.899999618530273 |
| 18/5/2026, 16:00:52 | 10 | true | 100 | 27.600000381469727 |

Fuente: Autoría

En lo que compete a la base de datos del Nodo 3 o Nodo Actuador, el registro de los datos de consumo del agua para las secciones de distribución planteadas se almacenan en 5 campos en específico como se muestra en la Figura 127. Los campos “ Flow1 y Flow2” se refiere al flujo actual del caudal medido en Litros/minuto, por otra parte el registro del caudal total medido en Litros en cada instante del registro, se almacenan en los campos “Total1 y Total2”, además, se monitorea el estado del nodo usando la misma lógica de los Nodos Sensores. El número al final del cada campo denota la misma magnitud pero aplicada a las secciones de implementación del sistema de riego, el número 1 hace referencia a la sección con goteo, en tanto que el número 2 pertenece a la sección sin goteo.

**Figura 127**

*Base de datos y Registros del Nodo Actuador*

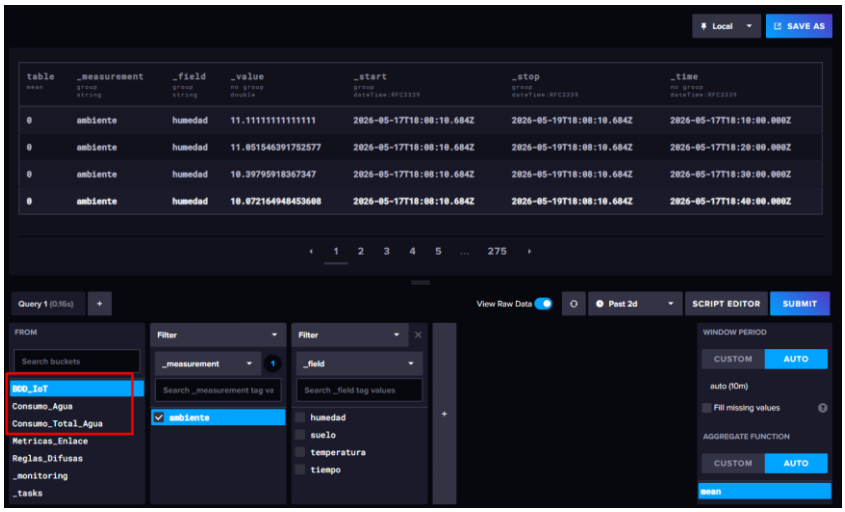



Fuente: Autoría

De la misma manera, los datos son registrados de manera local en las bases de datos creadas en InfluxDB como se muestra en la Figura 128, cumpliendo con el requerimiento StSR14 que comprende mantener una doble redundancia de almacenamiento de datos en caso de que el monitoreo y almacenamiento remoto no estén disponibles.

**Figura 128**

*Registro histórico de datos de manera local*




Fuente: Autoría

### 4.4.3 Generación de notificaciones del sistema

En alineación con el requerimiento SySR9 la capacidad del sistema para generar notificaciones cuando el riego sea activado es imprescindible, es por lo que las notificaciones se implementan en dos escenarios; el primero cuando el sistema se activa con lógica difusa y el segundo es la activación manual, esto permite al usuario estar informado de las irrigaciones en tiempo real. Para cumplir este requerimiento se usa la plataforma de mensajería Telegram como se mencionó en la sección 3.7.5.

- **Notificaciones – Activación del Sistema con Lógica Difusa**

Para el presente escenario se considera establecer un mensaje claro, conciso y fácil de interpretar. Dado que la lógica difusa calcula un tiempo en específico de salida, las notificaciones se disparan cuando el riego es activado y desactivado, mostrando información como el tipo de activación, tiempo de riego y hora de activación como se muestra en la Figura 129.

**Figura 129**

*Notificaciones del Sistema en modo Difuso*



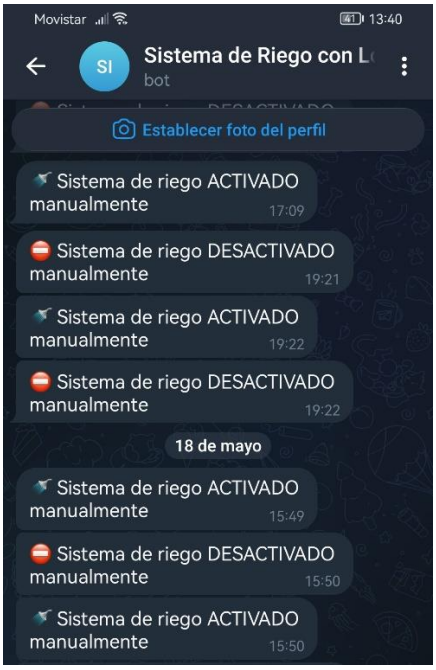

Fuente: Autoría

- **Notificaciones – Activación Manual del Sistema**

Estas notificaciones se realizan dentro del mismo Bot de Telegram al igual que el modo difuso, se notifica mediante mensajes la activación y desactivación de las electroválvulas como se aprecia en la Figura 130, este mecanismo permite al operario del riego conocer el estado del sistema, además junto con los medidores de caudal, son un indicador de que las irrigaciones se realizan correctamente.

**Figura 130**

*Notificaciones del Sistema en modo Manual*



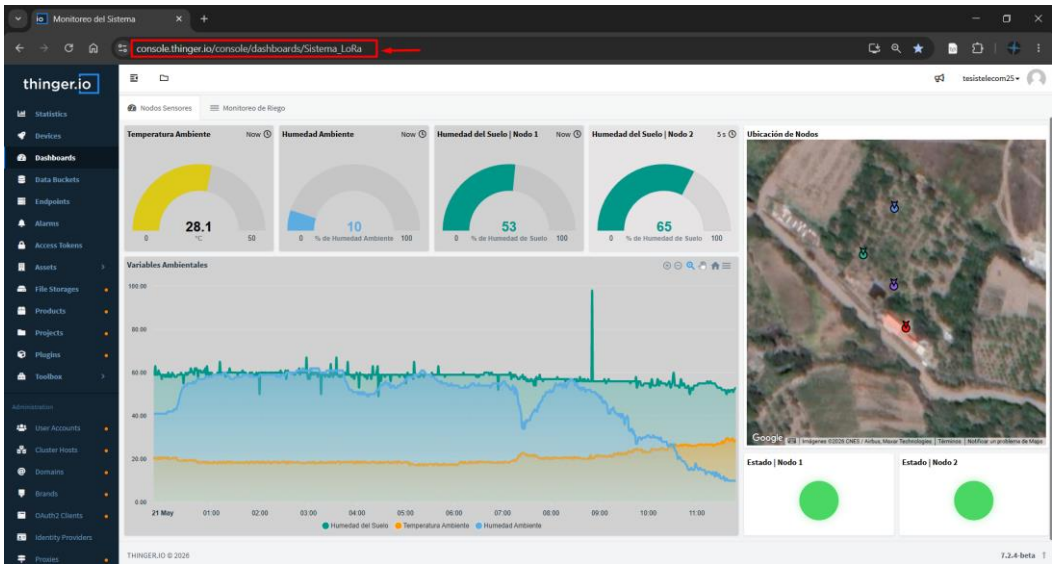

Fuente: Autoría

### 4.4.4 Acceso Remoto al monitoreo del sistema

En lo que corresponde al acceso remoto, la plataforma ofrece la interfaz web accesible desde cualquier navegador, además se presenta en una aplicación disponible para dispositivos móviles, lo que es imprescindible para conectarse de manera remota desde cualquier dispositivo conectado a Internet. En la Figura 131 se ilustra el acceso al dashboard del sistema mediante el navegador web.

**Figura 131**

*Acceso al Dashboard desde el Navegador Web*




Fuente: Autoría

De la misma forma, para garantizar el acceso remoto, como se mencionó anteriormente, existe una versión disponible de Thinger.io para dispositivos Android y IOS, lo que facilita y garantiza la conectividad para monitorear el sistema en tiempo real. El monitoreo y control del sistema se presenta en la Figura 132 mostrada a continuación, en donde se debe navegar para visualizar las diferentes integraciones. Al ser un dispositivo móvil la resolución de la aplicación se adapta al equipo, por lo que es pertinente

**Figura 132**

*Monitoreo del Sistema desde un dispositivo móvil*




*Nota:* La aplicación presenta un control interactivo adaptado a la resolución de cada dispositivo móvil, en este caso un smartphone. Fuente: Autoría

### 4.5 Análisis e interpretación de resultados

Con la finalidad de interpretar los resultados generales obtenidos durante las pruebas del sistema se analizan aspectos que se relacionan con el desempeño general, confiabilidad de la red IoT, comparación frente a los métodos tradicionales de riego y la estimación del costo económico de la solución técnica-tecnológica desarrollada. Interpretando estos resultados se permite determinar el grado de validación técnica y operativa del prototipo del sistema.

#### 4.5.1 Evaluación del desempeño general del sistema

La evaluación del sistema en cuestiones de desempeño permite analizar el comportamiento y funcionalidad del prototipo en la etapa de pruebas de funcionamiento, tomando en cuenta la estabilidad del monitoreo, confiabilidad de los sensores, respuesta ante condiciones de riego automatizado y manual, operación de manera remota y transmisión de datos constante.

Mediante las pruebas de comunicación inalámbrica realizadas en el apartado 4.1 el sistema presentó estabilidad de la red IoT, mediante verificación de los parámetros propios del enlace como la pérdida de paquetes, RSSI, SNR, latencia y jitter mostrando resultados óptimos

para un despliegue de esta magnitud, alineada a las regulaciones de la ARCOTEL y los umbrales de transmisión y recepción de los equipos implementados, evidenciando una respuesta óptima dando paso al cumplimiento del objetivo específico número 3.

La sección 4.2 abarcó las pruebas de adquisición de datos de los sensores, validando la precisión en comparación con sistemas de referencia y gravimetría en el caso del sensor de humedad del suelo permitiendo monitorear las condiciones ambientales y del suelo de manera precisa y en tiempo real, por otra parte los sensores de caudal mostraron evidencia sólida del monitoreo y registro del caudal realizado en cada irrigación hasta estabilizarse en un valor constante, demostrando que además de la precisión de estos, el sistema de tubería implementado es funcional, óptimo y eficiente.

En lo que se refiere a la autonomía energética de los nodos sensores, el cálculo teórico realizado en la sección 3.4.3 provee una referencia de la duración de las baterías de 7 días, parámetro que se valida mediante las pruebas físicas en donde se comprobó que efectivamente las baterías duran lo que los cálculos dictan. Las baterías se retiran de los nodos y se recargan, esto no afecta el rendimiento del sistema ya que la interrupción de la adquisición de sensores dura unas pocas horas.

La solución integral del proyecto se basa en la optimización del recurso hídrico disponible en función de las variables ambientales, humedad del suelo y tiempo de riego mediante lógica difusa, es así que en la sección 4.3 se valida el funcionamiento y confiabilidad sistema difuso con la base de reglas implementadas dando paso a un periodo de pruebas y análisis que presentaron distintos casos o escenarios en donde el sistema respondió de manera óptima en función de las necesidades hídricas del cultivo, permitiendo mitigar las deficiencias de humedad del suelo en los casos que así se requirió, ejecutando acciones automáticas por la lógica de control establecida.

La eficiencia hídrica del sistema implementado presenta un valor de 68% frente al sistema tradicional demostrando que es válido en el tema del ahorro del consumo de agua.

Establecer un criterio en base a parámetros de cuantificación de las variables ambientales y de la humedad del suelo permite al usuario estar informado del estado y grado estimado del estrés hídrico del cultivo, por lo que la plataforma IoT evaluada en la sección 4.4 presentó una implementación adecuada, accesible y funcional de acuerdo a las necesidades y requerimientos del sistema, este recurso garantizó el monitoreo constante en tiempo real, registro óptimo de los datos históricos de los sensores y notificaciones mediante una aplicación de mensajería como lo es Telegram, definiendo de esta manera un sistema completo orientado al control y monitoreo en tiempo real, permitiendo tomar decisiones oportunas o casos no listados apegados a necesidades agrícolas específicas.

En términos generales, la funcionalidad del sistema evidenció un desempeño estable y eficiente, cumpliendo con los requerimientos planteados orientados a la monitorización, automatización y optimización de esta investigación.

### 4.5.2 Confiabilidad de la comunicación y monitoreo

En la Figura 133 se muestran las estadísticas de la comunicación recolectadas por la plataforma IoT en la nube Thinger.io, estas estadísticas de conectividad evalúan la actividad de los últimos 30 días. En la gráfica presentada se observa el comportamiento diario de las conexiones que el dispositivo establece así como la carga de datos recibidos y enviados en la transmisión de información entre los Nodos y el Gateway. Los resultados muestran un comportamiento óptimo y evidencian un total de 154 conexiones realizadas, además se aprecia que el tráfico de los datos acumulados total es de 28.28 MB, de este total, 28.14 MB son los datos enviados y 148.76 KB corresponden a datos recibidos en la plataforma IoT. En base a estas métricas se valida que la transmisión de datos se mantuvo constante, sin pérdidas de

comunicación ni interrupciones significativas. Esto garantiza el monitoreo remoto y continuo de las variables ambientales y operación/estado del sistema de riego.

**Figura 133**

*Estadísticas de conectividad del sistema*




Fuente: Autoría

Las presentes variaciones que se evidencian en el número de conexiones y volumen de datos corresponden a reinicios programados cobertura de red local de internet incluso intervalos de envío de datos lo que se relaciona a un comportamiento normal en la operación de un sistema IoT, el principal parámetro es que no se evidencia pérdidas críticas en el estado de conexión ni interrupciones indefinidas del servicio.

### 4.5.3 Observaciones agronómicas del cultivo

Con el objetivo de realizar una evaluación técnica del sistema se realizó una observación del cultivo de aguacate “Fuerte” posterior a las pruebas del sistema de riego automatizado. La inspección se realizó juntamente con el experto agrícola y el dueño del predio, mismos que identificaron cambios visibles del estado fisiológico de los árboles.

Durante la visita se identificó mayor presencia de panículas florales en la mayoría de los árboles de aguacate, esta comparación se realiza con el estado previo del cultivo antes de implementar el sistema automatizado. Las inspecciones visuales permitieron determinar que

existe una mayor cantidad de floración uniforme en las distintas áreas del cultivo como se evidencia en la Figura 134 en donde se compara el estado anterior y actual de los árboles.

Las evaluaciones visuales realizadas por los implicados sugieren que la aplicación de riego controlada ayudó a mejorar las condiciones de humedad del suelo, parámetro que favorece al desarrollo del cultivo, en comparación con el método de riego tradicional, en donde el riego dependía de la intervención manual y conocimiento empírico. Asimismo, el monitoreo de todas las variables que forman la entrada del sistema difuso permitió reducir periodos de déficit hídrico o por el contrario exceso de riego, condiciones que pueden afectar el desarrollo floral y por consecuencia, la producción.

**Figura 134**

*Comparación del estado de Floración en el cultivo*



*Nota:* La figura muestra comparación del estado de floración antes y después de la implementación del sistema observando notables cambios en el cultivo. Fuente: Autoría

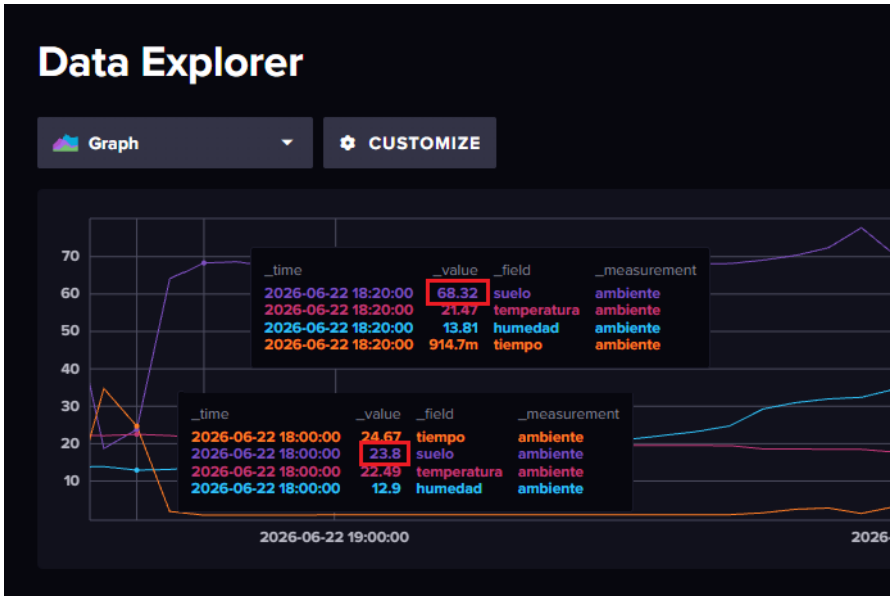
Finalmente, el experto asegura que si bien es cierto que se muestran cambios significativos en la floración y follaje, no corresponden a un análisis agronómico experimental a largo plazo, sin embargo se valida que el sistema contribuye positivamente a mejorar las condiciones del manejo hídrico creando un escenario y ambiente para el crecimiento y desarrollo del cultivo de aguacate “Fuerte”.

- **Eficacia en el control de la Humedad**

La Figura 135 muestra el registro de los valores de las variables ambientales una vez que se realizó la apertura de las electroválvulas del sistema dando paso a un ciclo de irrigación, los datos evidencian un valor inicial de 23.8 % de humedad del suelo, y al cabo de 20 minutos la humedad se compensa a un nivel de 68 % que se considera un valor óptimo que el cultivo debe mantener por recomendaciones agronómicas.

**Figura 135**

*Estabilización de los niveles de humedad en el cultivo*




Fuente: Autoría

Parte de la validación in situ como se muestra en la Figura 136 y por conclusiones el experto así como del dueño del predio se evidencia que la humedad visiblemente óptima está

presente en el suelo después de la irrigación, lo que sustenta aún más la eficacia y eficiencia del sistema en el control de humedad del suelo del cultivo.

**Figura 136**

*Humedad visiblemente óptima en el cultivo*



Fuente: Autoría

### 4.5.4 Comparación con métodos tradicionales

Como parte de la validación del sistema es preciso realizar una comparación general de los métodos implementados en el sistema, esto se realiza en base a las pruebas del riego del sistema evaluando el consumo general durante el periodo de pruebas. La Tabla 64 registra el consumo total de las irrigaciones realizadas en las dos diferentes secciones implementadas.

**Tabla 64**

*Volumen de Agua Total consumida por el Sistema*

| Fecha de irrigación | Volumen Total de Goteo (L) | Volumen Total Sin Goteo (L) |
|---|---|---|
| 2/4/2026 | 365.55 | 1180.94 |

| | | |
|---|---|---|
| 9/4/2026 | 325.67 | 1048.46 |
| 16/4/2026 | 173.43 | 544.072 |
| 23/4/2026 | 364.6 | 1183.2 |
| 30/4/2026 | 137.69 | 406.20 |
| 4/5/2026 | 191.25 | 602.98 |
| 6/5/2026 | 161.55 | 504.77 |
| 8/5/2026 | 101.78 | 307.57 |
| 13/5/2026 | 695.15 | 2131.78 |
| 15/5/2026 | 137.67 | 425.93 |
| **Total** | **2654,34** | **8336,55** |

Fuente: Autoría

En base a estos resultados, se demuestra que el consumo del sistema a goteo implementado es mucho menor que el sistema normal de riego por gravedad, optimizando el recurso hídrico poco disponible en el predio, obteniendo una eficiencia y ahorro del agua de un 68% . Adicionalmente, como señaló el dueño del predio y se evidencia en la encuesta incluida en el Anexo 9, el sistema optimiza el uso del agua, facilita el monitoreo y control, mitiga la humedad del suelo de manera eficiente y el cultivo presenta mejor aspecto, tanto en floración como en follaje.

### 4.6 Costo del Sistema

Con el objetivo de demostrar la viabilidad económica y práctica de la propuesta desarrollada se implementa esta sección asociada a costos de hardware, software e infraestructura . Analizar estos parámetros en proyectos de soluciones tecnológicas y en especial en sistemas en IoT permite validar si el sistema es conveniente de implementarse no solo a nivel de prototipo.

### 4.6.1 Costo de Hardware

Los costos de hardware se enfocan en los componentes de todos los componentes a nivel físico, es decir, del Gateway y Nodos así como actuadores y sensores. La Tabla 65 detalla el componente, la cantidad y el precio, facilitando evaluar el subtotal de esta sección.

**Tabla 65**

*Costo de Hardware*

| Componente | Cantidad | Precio Unitario (USD) | Total (USD) |
|---|---|---|---|
| Heltec ESP32 LoRa V3 | 4 | 35,00 | 140,00 |
| Mini-CPU | 1 | 80,00 | 80,00 |
| Sensor DHT11 | 1 | 3,00 | 3,00 |
| Sensor HW-390 | 2 | 3,90 | 7,80 |
| Sensor YF-S201 | 2 | 8,00 | 16,00 |
| Electroválvulas | 5 | 10,00 | 50,00 |
| Módulo Relé | 3 | 2,40 | 7,20 |
| Batería Li-ion Recargable | 3 | 4,30 | 12,90 |
| Shield de Expansión ESP32 | 1 | 8,90 | 8,90 |
| Protoboard | 4 | 3,50 | 14,00 |
| | | **Total** | **$339,80** |

Fuente: Autoría

### 4.6.2 Costo de Infraestructura

La infraestructura del sistema se asocia a la implementación física que asegura la protección y funcionalidad en el monitoreo y riego del cultivo. En la Tabla 66 se detallan los componentes como carcasas protectoras, bases de anclaje, tubería, entre otros.

**Tabla 66**

*Costos de Infraestructura*

| Infraestructura | Cantidad | Precio Unitario (USD) | Total (USD) |
|---|---|---|---|
| Carcasas protectoras | 4 | 7,50 | 30,00 |
| Bases de anclaje | 2 | 7,00 | 14,00 |
| Tubo de 2" (6m) | 2 | 4,58 | 9,16 |
| Codo de 90° de 2" | 4 | 0,70 | 2,8 |
| Tubo de ½" (5m) | 1 | 5,00 | 5,00 |
| Collarín de 2" | 8 | 1,83 | 14,64 |
| Lave de paso de 2" | 1 | 4,00 | 4,00 |
| Unión Roscable H 1/2" | 9 | 0,55 | 4,95 |
| Union Universal Roscable 1/2" | 3 | 0,70 | 2,10 |
| Tapón PVC 2" | 2 | 1,30 | 2,60 |
| Cable 12 AWG | 20 m | 0,90 | 18,00 |
| Interruptor Termomagnético | 1 | 5,00 | 5,00 |
| Cable UTP | 5 m | 0,20/m | 1,00 |
| | | **Total** | **$113,25** |

Fuente: Autoría

### 4.6.3 Costo de Software

Ya que el proyecto ofrece una solución integral y lo menos costosa posible, el software Open Source (código abierto) se usó en todo el desarrollo, lo que implica que el costo es de $ 0,00 USD, en la Tabla 67 se detalla las plataformas y herramientas utilizadas asociadas a software.

**Tabla 67**

*Costo de Software*

| Software | Cantidad | Precio Unitario (USD) | Total (USD) |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| Arduino IDE | 1 | 0,00 | 0,00 |
| Node-RED | 1 | 0,00 | 0,00 |
| InfluxDB | 1 | 0,00 | 0,00 |
| Fritzing | 1 | 0,00 | 0,00 |
| Thinger.io | 1 | 0,00 | 0,00 |
| Telegram | 1 | 0,00 | 0,00 |
| | | **Total** | $0,00 |

Fuente: Autoría

### 4.6.4 Costo Total

La Tabla 68 detalla los costos totales involucrados en el desarrollo del sistema, básicamente es la suma de todos los costos referentes a cada componente detallado en las secciones anteriores.

**Tabla 68**

*Costo total del Sistema*

| Detalle | Subtotal (USD) |
|---|---|
| Costo de Hardware | $339,80 |
| Costo de Infraestructura | $113,25 |
| Costo de Software | $0,00 |
| **Total** | **$453.05** |

Fuente: Autoría

El costo total final del sistema asciende a la cantidad de $453.05 USD. La mayor inversión corresponde al hardware, componentes electrónicos y dispositivos físicos que se emplean para la adquisición, recepción, procesamiento de datos y automatización del riego, en tanto que los costos de infraestructura demandan elementos fundamentales dedicados a la

instalación y operación del sistema. La principal ventaja son los gastos por licenciamiento de software lo que reduce la inversión total además favorece la economía sostenible del proyecto.

En lineamientos generales, los resultados permiten concluir que el sistema desarrollado es una alternativa económicamente accesible y técnicamente funcional para aplicaciones de riego inteligente y mitigación del estrés hídrico-térmico en medios agrícolas de pequeña y mediana escala.

**fi4.7 Análisis Costo-Beneficio**

El costo o inversión inicial del sistema asciende a $453.05 USD destinado a una extensión de terreno de 2195 $m^2$, en el tema de eficiencia hídrica este sistema demostró que el consumo mensual en la sección que se implementó el sistema a goteo es de 1366.94 litros frente a los 4362.87 litros consumidos en ese mismo periodo de pruebas de la sección sin implementar el sistema a goteo que representa la parte de método tradicional, estimando un ahorro de 2995.93 litros mensuales y proyectándose anualmente a ahorrar 35951.16 litros representando una reducción de 68% del consumo general. Si bien es cierto que el agua de riego del predio proviene del canal de riego de Pimampiro, el costo de las horas totales que posee el predio en su totalidad es de $36 USD anuales por lo que la inversión del sistema en comparación con la ganancia de la producción cubre estos costos fácilmente, razón por la cual el sistema es económicamente rentable en términos de adquisición evidenciando que el ahorro de agua es significativo desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental y disponibilidad del recurso hídrico.

Los beneficios agronómicos del sistema se evidencian en los indicadores de mejora productiva como el incremento de la floración, mejor follaje y humedad visiblemente óptima en el suelo, estos parámetros propician condiciones favorables en la mejora de calidad del fruto y de producción. Teniendo en cuenta que el precio del aguacate variedad “Fuerte” en el mercado local ronda los $25 a $35 USD por gaveta de 20 Kg aproximadamente, y que las

mejoras fisiológicas que presentan los árboles en condiciones de operación del sistema sugieren un potencial incremento en términos de rendimiento, el sistema de monitoreo de temperatura y control de humedad presenta una relación costo-beneficio favorable demostrando que el sistema es una solución viable técnica y económicamente adecuada para el cultivo de aguacate en función de las condiciones ambientales y de humedad del suelo de la zona.

## Conclusiones

La implementación del sistema de temperatura y control de humedad en el cultivo de aguacate “Fuerte” en la Quinta la Joya demostró que el uso de tecnologías inalámbricas de largo alcance (LoRa) en conjunto con el Internet de las Cosas (IoT) proveen una solución integral en el manejo y optimización del recurso hídrico en un 68% mediante el riego automatizado por lógica difusa.

El estudio previo de los requerimientos específicos del cultivo como niveles óptimos de temperatura y humedad ambientales, humedad del suelo y tiempo de riego, permitió establecer las condiciones de desarrollo del sistema e integrar hardware y software en un sistema base para su óptima operación e instalación en el predio.

La lógica difusa y la implementación de un sistema a goteo demostraron un rendimiento óptimo en el proceso de irrigación mediante la base de las reglas difusas establecidas, adaptándose a variaciones de las condiciones ambientales del cultivo para establecer tiempos de riego óptimos lo que proporcionó un comportamiento más adaptativo y eficiente en comparación con los métodos de riego tradicionales que se basan en tiempos fijos para cada irrigación.

La evaluación experimental de la comunicación del sistema comprobó la estabilidad de la red LoRa entre los Nodos y el Gateway presentando resultados óptimos mediante la evaluación de los parámetros como la pérdida de paquetes, RSSI y SNR además de la latencia y jitter demostrando que la red provee una solución óptima de comunicación por la distancia del despliegue.

La plataforma de procesamiento local Node-RED juntamente con la plataforma en la nube Thinger.io permitieron procesar, almacenar y presentar los datos, dando al usuario la potestad de tomar acciones de mitigación en casos donde el riego automático no está

contemplado por actividades agrícolas en específico y alertar ante eventos del sistema, lo que mejoró la capacidad del monitoreo y control en tiempo real.

El cultivo de aguacate presentó mejoras notables en su desarrollo después de que se entró en operación el sistema, se observó una mejora en características fisiológicas como la floración y follaje. Si bien estos parámetros dependen de otros factores que no competen a esta investigación, el sistema de irrigación automático ayuda favorablemente al desarrollo del cultivo.

## Recomendaciones

Si bien es cierto que el sistema operó en un periodo de pruebas bastante aceptable, se recomienda extender el periodo de evaluación con el fin de detectar posibles vacíos en las reglas difusas creadas para proveer al sistema de un mayor rango de conocimiento en base a las condiciones climáticas de la zona.

Se recomienda implementar fuentes de energía autosustentables como paneles solares para los Nodos Sensores que permitan una mayor autonomía energética para despliegues en zonas rurales donde el acceso es limitado o demande de muchos recursos.

En pertinente revisar constantemente los sensores de humedad en el suelo y realizar una calibración cada dos meses ya que las condiciones y propiedades del suelo tienden a reducir la vida útil del sensor y condiciones de adaptación.

Implementar nuevos sensores relacionados con las variables agrícolas dependiendo de las necesidades del cultivo como niveles de PH o nitrógeno, ayudará a proveer un mejor conocimiento en la precisión del análisis de los datos obtenidos, lo que permite al usuario final detectar posibles deficiencias en las necesidades del cultivo y mitigarlas a tiempo e incluso dar paso al desarrollo de un sistema que compense estas necesidades.

Ya que el sistema presenta una solución funcional, óptima y eficiente en el manejo del recurso hídrico disponible, se recomienda adaptarlo a otras zonas y cultivos del predio que presentan los mismos problemas en el manejo del riego con los ajustes respectivos.

**Bibliografía**

Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., Ishak, M. H. I., Rahman, M. K. I. A., Otuoze, A. O., Onotu, P., & Ramli, M. S. A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *173*, 105441. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105441

Adafruit, & Foshan Shunde Zhongjiang Energy Saving Electronics Co., Ltd. (2021). *YF-S201 black flow sensor*. www.fssdyifa.com.cn

ARCOTEL. (2018). *NORMA-ESPECTRO-DE-USO-LIBRE-Y-ESPECTRO-PARA-USO-DETERMINADO-EN-BANDAS-LIBRES*.

Bartoli, J. (2008). *MANUAL TECNICO DEL CULTIVO DEL AGUACATE HASS (Persea americana L.) Documento elaborado por el Centro de Comunicación Agrícola de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA). Septiembre de 2008*. www.hondurasag.org

Benzaouia, M., Hajji, B., Mellit, A., & Rabhi, A. (2023). Fuzzy-IoT smart irrigation system for precision scheduling and monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, *215*, 108407. https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2023.108407

BioScience. (2024, abril 24). *Cómo evitar el estrés hídrico del aguacate*. FUTURECO. https://www.futurecobioscience.com/estres-hidrico-del-aguacate/#:~:text=Efectos

Bitella, G., Rossi, R., Bochicchio, R., Perniola, M., & Amato, M. (2014). A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. *Sensors*, *14*(10), 19639–19659.

Castillo, Y., & Rovira, A. (2013). *Eficiencia Hídrica en la Vivienda*. 159–171.

Cedeño, J., Zambrano, | M, & Medina, | C. (2014). Redes inalámbricas de sensores eficientes para la agroindustria Title: Efficient wireless sensor networks for agroindustry. En *Prisma Tecnológico* | (Vol. 5, Número 1).

Celedón, J. M., Gil, P. M., Ferreyra, R., Maldonado, P., & Barrera, C. (2012). Sensitivity and Variability of Two Plant Water Stress Indicators: Exploring Criteria for Choosing a plant Monitoring Method for Avocado Irrigation Management. *Chilean journal of agricultural research*, *72*(3). https://doi.org/10.4067/s0718-58392012000300012

Cherlinka, V. (2026, abril 10). *Humedad Del Suelo: Cómo Medir Y Controlar Su Nivel*. https://eos.com/es/blog/humedad-del-suelo/

Corona, L. R. G. M. J. (2014). *Aplicaciones con Arduino Sensores y actuadores con Arduino: I*. GRUPO EDITORIAL PATRIA, S.A. DE C.V.

Ecetronics. (2023). *ELECTROVALVULA SOLENOIDE AGUA 1/2 12V DC ZE-4F180*. https://ecetronics.com/index.php/producto/electrovalvula-solenoide-agua-1-2-12v-dc-ze-4f180/

ElectroStore. (2024). *SENSOR CAPACITIVO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DE SUELO V1,2*. https://www.grupoelectrostore.com/producto/sensor-capacitivo-de-humedad-y-temperatura-de-suelo-v12/

EOS Data Analytics. (2023, septiembre 8). *Cultivo De Aguacate: Información Para Una Buena Cosecha*. Cultivo. https://eos.com/es/blog/cultivo-de-aguacate/#ref-3

Flores, J., Vite Cevallos, H., Montealegre, V., & Romero, H. (2021). Análisis de la producción de aguacate en el Ecuador y su exportación a mercados internacionales en el periodo 2008 al 2018Analysis of avocado production in Ecuador for export to international markets from 2008 to 2018. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, *4*, 164–172. https://doi.org/10.62452/0qmq0530

GAD Municipal Pimampiro. (2014). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón San Pedro de Pimampiro CIPRADEC 2014*.

GAD Pimampiro. (2024). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Pimampiro 2030*.

Glaría, J. (2001). *Automatización Industrial: Sensores De Humedad*. *II*.

Hamouda, Y. E. M. (2024). Optimally sensors nodes selection for adaptive heterogeneous precision agriculture using wireless sensor networks based on genetic algorithm and extended kalman filter. *Physical Communication*, *63*, 102290. https://doi.org/10.1016/J.PHYCOM.2024.102290

Heltec Automation. (2023). *Nodo WiFi LoRa 32(V3), ESP32S3 + SX1262 LoRa, compatible con Meshtastic y LoRaWAN*. https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/

Hu, J., Liu, D., Zhu, Y., Chen, Z., Zhang, X., Han, X., & Zhou, P. (2024). Establishing a maturity prediction model for respiratory fruits via ethylene-regulated physiology: A case investigation of avocado. *Food Bioscience*, *59*, 104097. https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2024.104097

INEC, & ESPAC. (2023). *Estadísticas Agropecuarias*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/

Intagri. (2019). *Requerimientos de Suelo y Clima del Cultivo de Aguacate*. *1*, 1–5.

Inversa, C. (2020). *EL ÁRBOL DE AGUACATE*. https://www.invesa.com/el-arbol-aguacate/

ISO/IEC/IEEE. (2018). ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering. *ISO/IEC/IEEE 29148:2018(E)*, 1–104. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8559686

ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering. (2018). *ISO/IEC/IEEE 29148:2018(E)*, 1–104. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8559686

Játiva, E., & Román, E. (2016). *Estudio de Factibilidad para la producción, comercialización y demanda del aguacate en el mercado de la Provincia de Imbabura*. UPEC.

Kuongshun, E. (2023). *Módulo de sensor de temperatura y humedad DHT11 con LED*. https://www.szks-kuongshun.com/uno/uno-sensor/dht11-temperature-and-humidity-sensor-module-with.html

Laoyan, S. (2025, febrero 6). *Qué es la metodología waterfall y cuándo utilizarla*. https://asana.com/es/resources/waterfall-project-management-methodology

Las Naciones Unidas en Ecuador. (2024). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 12*. Sustainable Development Goal 12. https://ecuador.un.org/es/sdgs/12

Mahbub, M., Hossain, M. M., & Gazi, Md. S. A. (2021). Cloud-Enabled IoT-based embedded system and software for intelligent indoor lighting, ventilation, early stage fire detection and prevention. *Computer Networks*, *184*, 107673. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107673

*Mercadona compra online*. (s/f). Recuperado el 18 de julio de 2024, de https://tienda.mercadona.es/search-results?query=aguacate

Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (MAATE). (2021). *Plan Nacional de Sequía*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/01/PLAN-NACIONAL-DE-SEQUIA.pdf

Mora, C. (2025, febrero 24). *Ecuador exporta por primera vez a Argentina aguacate Hass y pitahaya roja Para hacer uso de este contenido cite la fuente y haga un enlace a la nota original en https://www.primicias.ec/economia/ecuador-primera-*

*exportacion-aguacate-hass-pitahaya-roja-argentina-90533/*. https://www.primicias.ec/economia/ecuador-primera-exportacion-aguacate-hass-pitahaya-roja-argentina-90533/

Nylamp, M. (2023). *Sensor de flujo de agua 1/2" YF-S201*. https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/108-sensor-de-flujo-de-agua-12-yf-s201.html

Petrović, B., Bumbálek, R., Zoubek, T., Kuneš, R., Smutný, L., & Bartoš, P. (2024). Application of precision agriculture technologies in Central Europe-review. *Journal of Agriculture and Food Research*, *15*, 101048. https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2024.101048

Porras Villafuerte, J. I. (2019). *Plan de negocios para la creación de una empresa exportadora de aguacate variedad Hass hacia el mercado holandés* [PUCE - Quito]. https://repositorio.puce.edu.ec/items/8e705484-0233-444d-87a0-fc9b99be3f52

Royce, W. W. (2023). *MANAGING THE DEVELOPMENT OF LARGE SOFTWARE SYSTEMS*.

Ruiz Canales, Antonio., & Molina Martínez, J. Miguel. (2010). *Automatización y telecontrol de sistemas de riego* (Ruiz Antonio & Molina José, Eds.; 1a ed., Vol. 0). Marcombo, S.A. ; Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de la Región de Murcia.

Saranya, T., Deisy, C., Sridevi, S., & Anbananthen, K. S. M. (2023). A comparative study of deep learning and Internet of Things for precision agriculture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *122*, 106034. https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2023.106034

Serimtec. (2023). *DELL OPTIPLEX 7050 MICRO CORE I3*.

Sotomayor, A., Viera, W., Viteri, P., Posso, M., Racines, M., González, A., Cho, K., & Villavicencio, A. (2019). *Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias*.

Thomopoulos, V., Tolis, F., Blounas, T. F., Tsipianitis, D., & Kavga, A. (2024). Application of Fuzzy logic and IoT in a small-scale Smart Greenhouse System. *Smart Agricultural Technology*, *8*, 100446. https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2024.100446

UIT. (2009). *RECOMENDACIÓN UIT-R P.1546-4 - Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz*. http://www.itu.int/publ/R-REC/es

Ullah, A., Zubair, M., Zulfiqar, M. H., Kamsong, W., Karuwan, C., Massoud, Y., & Mehmood, M. Q. (2024). Highly sensitive screen-printed soil moisture sensor array as green solutions for sustainable precision agriculture. *Sensors and Actuators A: Physical*, *371*, 115297. https://doi.org/10.1016/J.SNA.2024.115297

Vásquez, R., & García, S. (2021). Estudio técnico-económico en el cultivo del aguacate, cantón Atahualpa, provincia El Oro. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *30*(3). https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1458

Viera, A., Sotomayor, / A, Viera, / W, Viera, A., Sotomayor, A., & Viera, W. (2016). POTENTIAL OF AVOCADO CULTIVATION (PERSEA AMERICANA MILL) IN ECUADOR AS AN ALTERNATIVE OF COMMERCIALIZATION IN THE LOCAL AND INTERNATIONAL MARKET. INIAP-Estación Experimental Santa Catalina. En *Revista Científica y Tecnológica UPSE* (Vol. 3).

Yuksel, M. E., & Fidan, H. (2021). Energy-aware system design for batteryless LPWAN devices in IoT applications. *Ad Hoc Networks*, *122*, 102625. https://doi.org/10.1016/J.ADHOC.2021.102625

Zacepins, A., Stalidzans, E., & Meitalovs, J. (2012). Application of information technologies in precision apiculture. *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture (ICPA 2012)*, *7*.

# Anexo

## Anexo 1. Información general del predio y cultivo

Encuesta realizada el 18/09/2025 a la propietaria del predio.

**1.- ¿Cuál es la extensión del área cultivada (ha) y cómo está distribuida?**

La extensión total del predio abarca 2 hectáreas, divididas en 5 parcelas de producción de las cuales 3 de ellas están destinadas a la producción de aguacate.

**2.- ¿Qué variedades de aguacate se cultivan y en qué edad/etapas fenológicas están los árboles?**

La variedad de aguacate que se cultiva es “Fuerte” que su principal característica es que no cambia de color al madurar. Además, esta variedad es muy resistente al frío. La edad fenológica de los árboles de aguacate es de 12 años

**3.- De qué fuentes hídricas se beneficia el predio?**

El terreno cuenta con un suministro de agua de riego que se raciona por turnos de 4 horas, dos días a la semana (miércoles y domingo) y se almacena en un reservorio

**4.- ¿Cuál es el tipo de suelo en las distintas áreas del predio?**

Es de tipo arenoso, el cual retiene poca humedad, en sí la zona donde se encuentra el terreno es seco

**5.- ¿Qué tipo de riego se utiliza actualmente?**

Se utiliza el riego por gravedad que ha sido usado por siempre desde la siembra de los árboles

**6.- ¿Con qué frecuencia y volumen se aplica riego en las distintas áreas?**

El riego se lo aplica una vez por semana dependiendo de la época del año alrededor de una hora a hora y media.

**7.- ¿Cuál es el mayor problema en cuanto al riego en el predio?**

Es que el agua no alcanza para cubrir toda la extensión de cultivo, por lo que en ocasiones partes del cultivo se quedan sin regar

**8.- ¿Cuál es la cobertura de red que posee el predio, existe alguna red Wi-Fi?**

Si existe señal de celular y en el predio existe una casa con red WiFi

**9.- ¿Hay disponibilidad de electricidad en el predio?**

La disponibilidad de electricidad es posible ya que existe una línea de la empresa eléctrica.

**Requerimientos del Sistema**

**10.- ¿Qué variables ambientales considera que se deberían medir en el cultivo de aguacate para controlar el riego?**

Considero que se debería medir la humedad del suelo y evitar que esté muy seco en ciertos días de la semana, porque el aguacate requiere mucha agua.

**11.- ¿Cree útil medir otros parámetros ambientales (radiación solar, viento, lluvia)?**

En mi experiencia diría que no, solo la humedad se debería controlar.

**12.- ¿Qué parámetro considera que es el más importante medir para que el ciclo del aguacate se desarrolle de manera óptima?**

Hay muchos factores, como la época del año, si es verano o invierno, sin embargo, la falta de agua ha provocado pérdidas por lo que un aguacate bien regado produce más gavetas.

**13.- ¿Qué tipo de sistema de riego considera que es el óptimo para el cultivo en términos de ahorro del recurso hídrico disponible?**

El riego por goteo, a diferencia del tradicional, se ahorra bastante y optimiza el agua que se dispone.

**14.- ¿Qué funciones automáticas o semi-automáticas considera ideales para el sistema de monitoreo de temperatura y control de humedad?**

Que el riego se realice automáticamente en un cierto horario, en días específicos.

**15.- ¿Requiere que los datos del sistema de monitoreo sean presentados en una interfaz de visualización fácil de interpretar?**

Por supuesto, me gustaría ver en tiempo real como se encuentra la humedad de mis aguacates para saber si regar o no.

**16.- ¿Se requiere que el monitoreo del estado del sistema sea de manera remota o local?**

De manera remota, ya que yo dispongo de internet en mi celular y se me hace fácil entrar a cualquier aplicación que requiera internet.

**17.- ¿Considera indispensable recibir alertas del sistema mediante mensajes o aplicaciones móviles de mensajería?**

Si, fuera de gran ayuda saber cuál es el estado de la humedad o del riego y que me llegue un mensaje con esa información

**Anexo 2. Encuesta de Asesoría del Experto**

Entrevista realizada el 28/11/2025

**1.- ¿Por qué es importante medir temperatura ambiente en el cultivo?**

Medir la temperatura ambiente es crucial porque determina la demanda atmosférica (evapotranspiración), es decir, la velocidad con la que el cultivo pierde agua. Para tu sistema de control difuso, este dato convierte el riego en una herramienta predictiva en lugar de solo reactiva: permite anticipar el estrés hídrico antes de que el suelo se seque críticamente, regulando la temperatura del árbol para evitar el cierre de estomas y asegurar procesos vitales como la fotosíntesis y el cuaje del fruto.

**2.- ¿A qué profundidad suele ubicarse la mayor actividad radicular del aguacate?**

A unos 30 cm de profundidad, ubicado en la zona de proyección de la copa (donde cae la sombra de las ramas más externas). Las raíces más profundas sólo sirven de anclaje del árbol y poseen poca capacidad de absorción.

**3.- ¿En qué puntos del predio se deberían colocar los nodos sensores de temperatura, humedad de suelo y humedad del ambiente?**

En dos específicamente, uno en la parte superior del predio y otro en la parte media, esto proporciona datos ideales para la exactitud de las mediciones de las variables, estas dos humedades se pueden promediar para obtener valores óptimos y en base a eso tomar decisión de regar o no regar.

**4.- ¿Cuántas veces a la semana se debería realizar el riego al cultivo de aguacate y durante qué tiempo?**

Como experto recomiendo realizar el riego una vez por semana durante una hora a hora y media, no en la mañana, tampoco en la tarde porque dependiendo de la actividad de la luz del sol puede provocar una evaporación o en casos más extremo pudrición de la raíz. El horario perfecto para realizar el riego está entre las 5 a 6:30 de la tarde aproximadamente. Un árbol adulto en producción necesita entre 140 a 170 litros de agua por semana en épocas secas, repartidos en riegos cortos y frecuentes para no lavar los nutrientes del suelo arenoso.

**5.- Considerando el análisis de cuantificación topográfico. ¿Cuántos Nodos Sensores se deberían implementar, en qué ubicación y por qué?**

Debido al desnivel presente en el terreno de 19 metros y una pendiente del 21%, recomiendo implementar los sensores en dos partes en específico, uno en la parte superior y otro en la parte inferior y que al ser un suelo de tipo arenoso, la retención e infiltración de agua presenta una filtración hídrica y menor capacidad de conservar la humedad, teniendo como consecuencia diferentes condiciones del suelo dependiendo de la ubicación e inclinación presentes, esto evitará que el sistema tomo un único punto de medición.

**Anexo 3. Registro fotográfico de la instalación de sensores de humedad del suelo en el cultivo de aguacate**

| Sensor de Humedad del Suelo – Nodo 1 |
| --- |
|  |
|  |

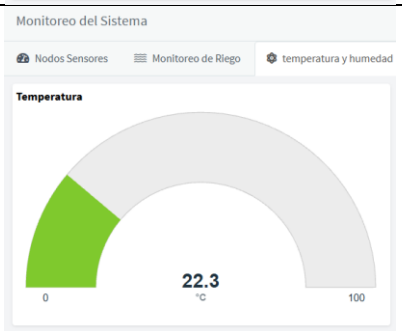
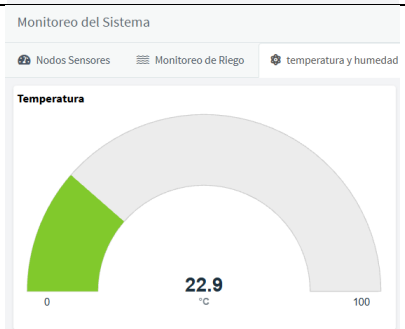
**Sensor de Humedad del Suelo – Nodo 2**



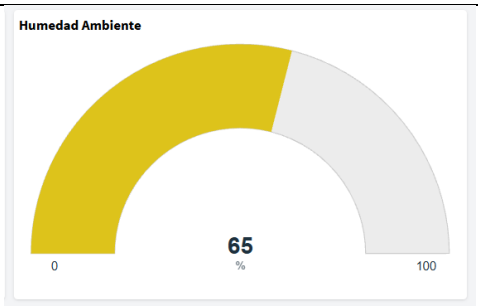
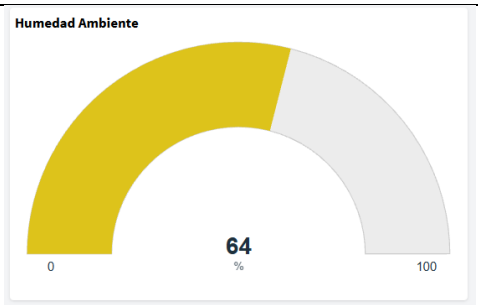
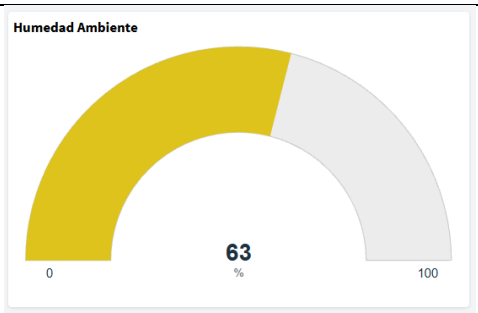
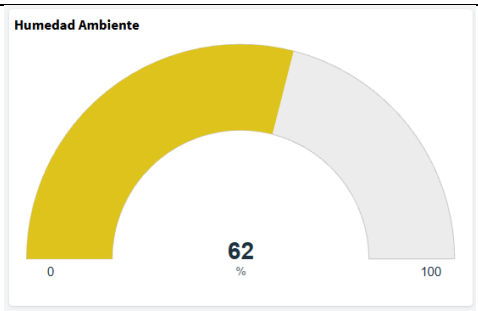
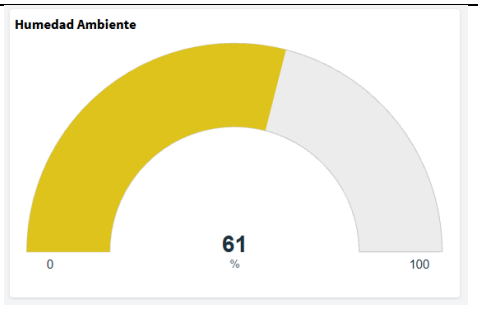


## Anexo 4. Validación de sensores de temperatura y humedad ambiental

- Comparación de la Temperatura Ambiental del sensor DHT11 y la estación meteorológica “The Weather Channel”

| Prueba | Valor del sensor DHT11 | Valor de la Estación Meteorológica |
|---|---|---|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |

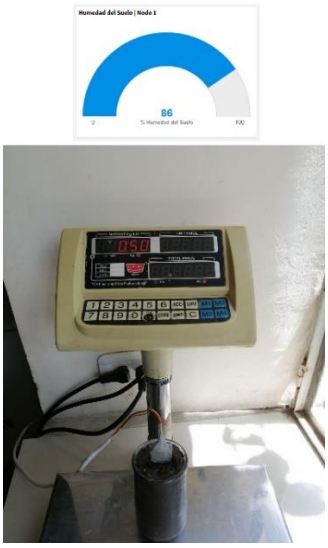
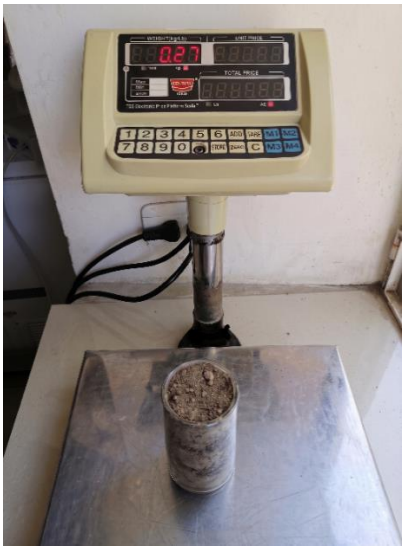
- Comparación de la Humedad Ambiental del sensor DHT11 y la estación meteorológica “The Weather Channel”

| Prueba | Valor del sensor DHT11 | Valor de la Estación Meteorológica |
|---|---|---|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |

## Anexo 5. Cálculos Gravimétricos

Cálculos gravimétricos para validación de humedad del suelo

- **Prueba 1:**

| Valor Del Sensor | Masa Húmedo | Masa Seco |
|---|---|---|
|  |  |  |
| 86 % | 50 g | 27 g |

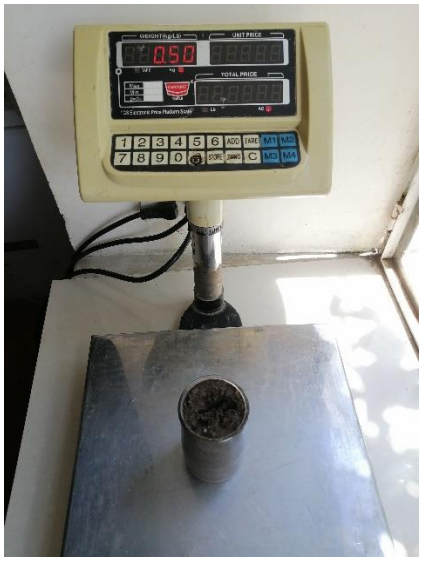
$M_{húmedo}: 50\ g$

$M_{seco}: 27g$

$$GWC\ (\%) = \frac{50\ g - 27g}{27\ g} \times 100$$

$$\boldsymbol{GWC = 85.19\ \%}$$

- **Prueba 2:**

| Valor Del Sensor | Masa Húmedo | Masa Seco |
|---|---|---|
| <br> |  |  |
| 67 % | 50 g | 30 g |

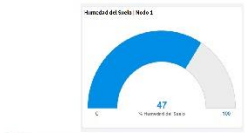
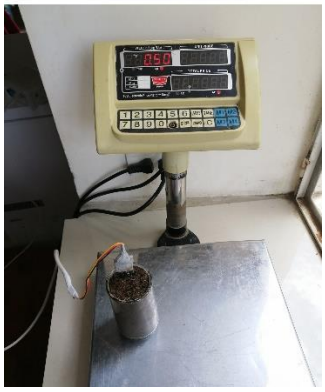
$M_{húmedo}$: 50 $g$

$M_{seco}$: 30 $g$

$$WC\ (\%) = \frac{50\ g\ -\ 30g}{30\ g} \times 100$$

$$\boldsymbol{GWC = 66.67\ \%}$$

- **Prueba 3:**

| Valor Del Sensor | Masa Húmedo | Masa Seco |
|---|---|---|
|   |  |  |
| 47 % | 50 g | 34 g |

$M_{húmedo}$: 50 $g$

$M_{seco}$: 34 $g$

$$GWC\ (\%) = \frac{50\ g - 34\ g}{34\ g} \times 100$$

$$\boldsymbol{GWC = 47.06\ \%}$$

- **Prueba 4:**

| Valor Del Sensor | Masa Húmedo | Masa Seco |
|---|---|---|
|   |  |  |
| 17 % | 50 g | 43 g |

$M_{húmedo}$: 50 $g$

$M_{seco}$: 43 $g$

$$GWC\ (\%) = \frac{50\ g - 43\ g}{43\ g} \times 100$$

$$\boldsymbol{GWC = 16.28\ \%}$$

- **Prueba 5:**

| Valor Del Sensor | Masa Húmedo | Masa Seco |
|---|---|---|
|   |  |  |
| 6 % | 50 g | 47 g |

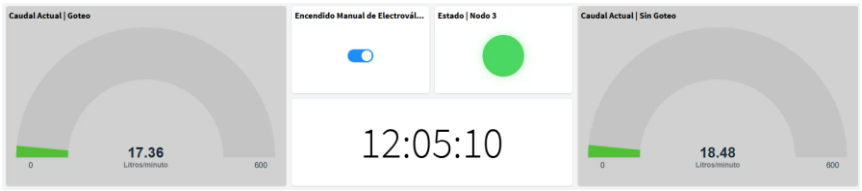
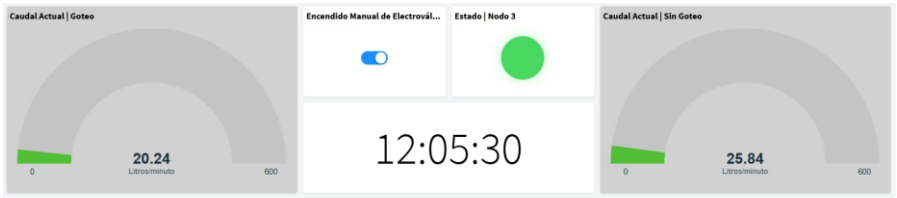
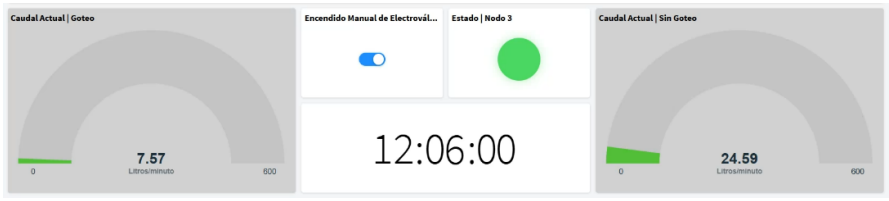
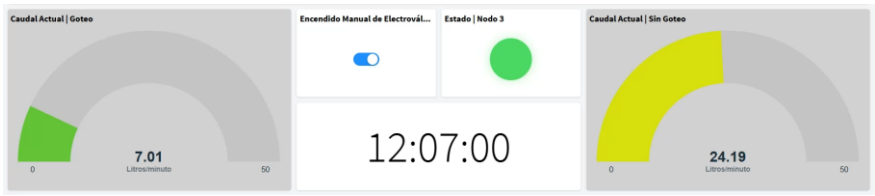
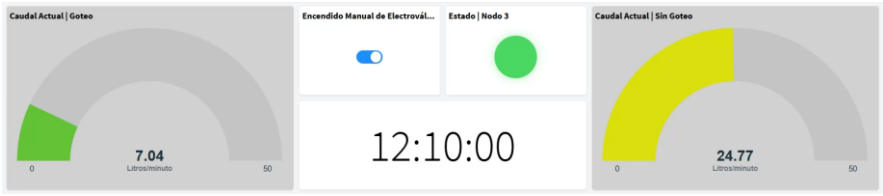
$M_{húmedo}$: 50 $g$

$M_{seco}$: 47 $g$

$$GWC\ (\%) = \frac{50\ g - 47\ g}{47\ g} \times 100$$

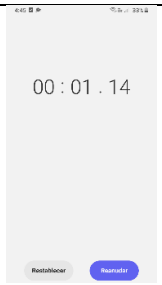
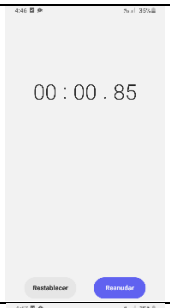
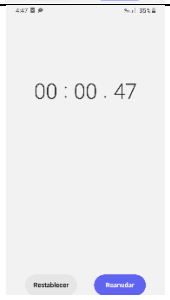
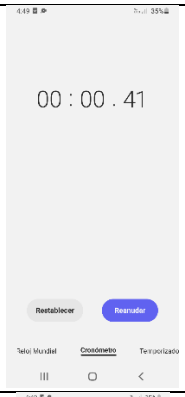
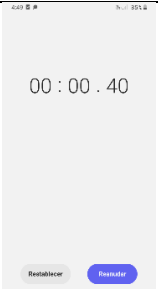
$$\boldsymbol{GWC = 6.38\ \%}$$

## Anexo 6. Pruebas de medición del Caudal

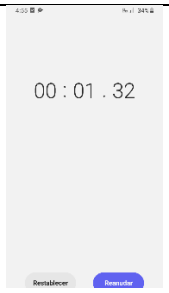
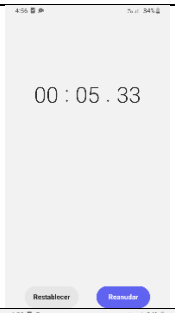
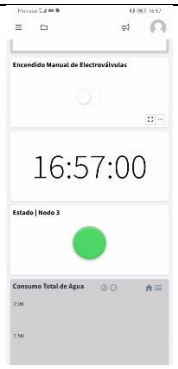
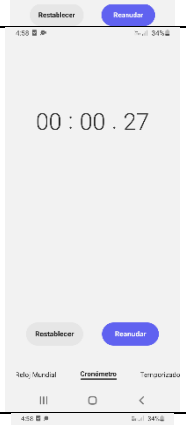
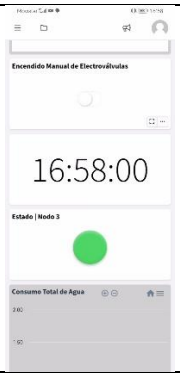
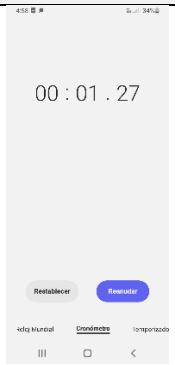
| Tiempo (s) | Valores |
|---|---|
| 10 |  |
| 30 |  |
| 60 |  |
| 120 |  |
| 300 |  |
| 310 |  |

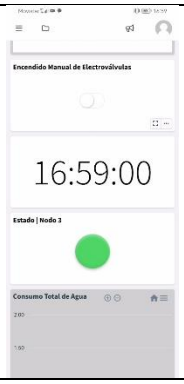
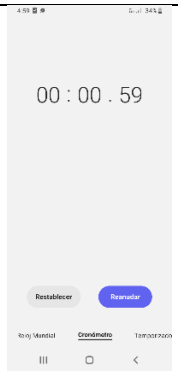
## Anexo 7. Tiempos de Activación y Desactivación Manual del Sistema

Evidencia de los tiempos cronometrados de la prueba de Activación Manual

| Prueba | Hora de envío del comando | Tiempo Cronometrado |
|---|---|---|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |

Evidencia de los tiempos cronometrados de la prueba de Desactivación Manual

| Prueba | Hora de envío del comando | Tiempo Cronometrado |
|---|---|---|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |

| | | |
|---|---|---|
| 5 | Encendido Manual de Electroválvulas<br>16:59:00<br>Estado \| Nodo 1<br>Consumo Total de Agua | 00 : 00 . 59<br>Restablecer<br>Reanudar<br>Cronómetro |

**Anexo 8. Cálculos de Eficiencia del consumo del agua**

A continuación se detallan los cálculos de la eficiencia del consumo del agua del modo Automático por fecha:

- **02/04/2026**

  $C_{convencional}$: 1180.94 L

  $C_{implementado}$: 365.55 L

$$EC\ (\%) = \frac{1180.94\ L - 365.55\ L}{1180.94\ L} \times 100$$

$$EC = 69.04\ \%$$

- **09/04/2026**

  $C_{convencional}$: 1048.46 L

  $C_{implementado}$: 325.67 L

$$EC\ (\%) = \frac{1048.46\ L - 325.67\ L}{1048.67\ L} \times 100$$

$$EC = 68.94\ \%$$

- **16/04/2026**

  $C_{convencional}$: 545 L

  $C_{implementado}$: 173.43 L

$$EC\ (\%) = \frac{545\ L - 173.43\ L}{545\ L} \times 100$$

$$EC = 68.16\ \%$$

- **23/04/2026**

  $C_{convencional}$: 1183.2 L

  $C_{implementado}$: 364.6 L

$$EC\ (\%) = \frac{1183.2\ L - 364.6\ L}{1183.2\ L} \times 100$$

$$EC = 69.19\ \%$$

- **30/04/2026**

  $C_{convencional}$: 406.2 L

  $C_{implementado}$: 137.69 L

$$EC\ (\%) = \frac{406.2\ L - 137.69\ L}{406.2\ L} \times 100$$

$$EC = 66.10\ \%$$

De la misma manera, a continuación se detallan los cálculos de la eficiencia del consumo del agua del modo Automático:

- **04/05/2026**

  $C_{convencional}$: 602.98 L

  $C_{implementado}$: 191.25 L

$$EC\ (\%) = \frac{602.98\ L - 191.25\ L}{602.98\ L} \times 100$$

$$EC = 68.28\ \%$$

- **06/05/2026**

  $C_{convencional}$: 604.77 L

  $C_{implementado}$: 161.55 L

$$EC\ (\%) = \frac{604.77\ L - 161.55\ L}{604.77\ L} \times 100$$

$$EC = 67.99\ \%$$

- **08/05/2026**

  $C_{convencional}$: 307.57 L

$C_{implementado}$: 101.78 L

$$EC\ (\%) = \frac{307.57\ L - 101.78\ L}{307.57\ L} \times 100$$

$$EC = 66.90\ \%$$

- **13/05/2026**

  $C_{convencional}$: 2131.78 L

  $C_{implementado}$: 695.15 L

$$EC\ (\%) = \frac{2131.78\ L - 695.15\ L}{695.15\ L} \times 100$$

$$EC = 67.39\ \%$$

- **15/05/2026**

  $C_{convencional}$: 425.93 L

  $C_{implementado}$: 137.67 L

$$EC\ (\%) = \frac{425.93\ L - 137.67\ L}{425.93\ L} \times 100$$

$$EC = 67.68\ \%$$

## Anexo 9. Encuesta de Evaluación del Sistema de Riego Automatizado

Objetivo: Evaluar la percepción del propietario del predio "Quinta La Joya" respecto al desempeño del sistema de riego inteligente implementado, comparándolo con el método tradicional de riego manual utilizado anteriormente.

### Instrucciones

Marque con una "X" la opción que considere más adecuada según su experiencia con el sistema implementado.

| Escala | Significado |
|---|---|
| 1 | Muy en desacuerdo |
| 2 | En desacuerdo |
| 3 | Neutral |
| 4 | De acuerdo |
| 5 | Muy de acuerdo |

### Sección A: Consumo y uso eficiente del agua

| N° | Pregunta | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Considera que el sistema reduce el consumo de agua en comparación con el riego manual. | | | | | X |
| 2 | El sistema evita el desperdicio innecesario de agua. | | | | X | |
| 3 | La cantidad de agua aplicada al cultivo es más adecuada que con el método tradicional. | | | | | X |

### Sección B: Automatización y facilidad de uso

| N° | Pregunta | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | El sistema disminuye la necesidad de intervención manual en el riego. | | | | X | |
| 5 | El control manual facilita las actividades diarias dentro del cultivo. | | | | X | |
| 6 | El sistema resulta fácil de utilizar y supervisar. | | | | | X |

**Sección C: Precisión y funcionamiento del sistema**

| N° | Pregunta | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | El sistema realiza el riego en el momento adecuado. | | | | | X |
| 8 | El tiempo de riego aplicado es más preciso que en el método manual. | | | | | X |
| 9 | El funcionamiento automático mejora el control de la humedad del suelo. | | | | X | |

**Sección D: Monitoreo remoto y comunicación**

| N° | Pregunta | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | El monitoreo remoto permite supervisar el cultivo de manera más eficiente. | | | | X | |
| 11 | La visualización de datos en tiempo real es útil para la toma de decisiones. | | | | | X |
| 12 | El sistema de alertas y monitoreo mejora el control del riego frente al método tradicional. | | | | | X |

**Sección E: Evaluación general**

| N° | Pregunta | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 13 | Considera que el sistema implementado mejora el manejo del cultivo. | | | | X | |
| 14 | El sistema representa una mejora respecto al riego manual convencional. | | | | | X |
| 15 | Recomendaría el uso de este sistema en otros cultivos agrícolas. | | | | | X |

**Preguntas Abiertas**

**¿Qué ventajas observa en el sistema de riego automatizado respecto al método tradicional?**

El sistema colocado nos representa una mejor manera de distribuir el uso del agua ya que el sistema de tuberías reduce el tiempo en que el agua llega al cultivo como se realizaba en el método tradicional. También la posibilidad de abrir el agua con el celular nos facilita el control en cualquier momento del día.

**¿Qué aspectos considera que podrían mejorarse en el sistema?**

Lo que considero que se podía mejorar es la implementación del goteo en todos los demás predios que existen en la Quinta La Joya.

**¿Ha observado cambios positivos en el cultivo desde la implementación del sistema? Explique brevemente.**

Si, los cambios que he observado en el cultivo son: mejor floración, hojas de los árboles más verdes, mejor humedad visible en el surco de plantación y menos caída de la flor.