



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CARRERA INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

Diseño de un sistema automatizado de compuertas basado en el análisis del flujo de agua para prevenir el sobre riego en los cultivos de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’ de la parroquia urbana Yaruquíes, Riobamba-Ecuador.

**Trabajo de Titulación para optar al título de:  
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES**

**Autor:**

León Barahona, Anahí Morelly

**Tutor:**

PhD. Leonardo Fabián Rentería Bustamante

**Riobamba, Ecuador. 2026**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Anahí Morelly León Barahona**, con cédula de ciudadanía **060481163-8**, autor del trabajo de investigación titulado: **Diseño de un sistema automatizado de compuertas basado en el análisis del flujo de agua para prevenir el sobre riego en los cultivos de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’ de la parroquia urbana Yaruquíes, Riobamba-Ecuador**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida será de mi entera responsabilidad, librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 1 de diciembre de 2025



---

**Anahí Morelly León Barahona**

C.I:060481163-8



## DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Leonardo Fabián Rentería Bustamante** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación "**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE COMPUERTAS BASADO EN EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE AGUA PARA PREVENIR EL SOBRE RIEGO EN LOS CULTIVOS DE LA JUNTA DE AGUA 'MARÍA AUXILIADORA' DE LA PARROQUIA URBANA YARUQUÍES, RIOBAMBA-ECUADOR**", bajo la autoría de **ANAHI MORELLY LEÓN BARAHONA**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 3 días del mes de diciembre de 2025.



---

**PhD. Leonardo Fabián Rentería Bustamante**  
**CI:1104064132**

## **CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

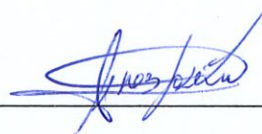
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE COMPUERTAS BASADO EN EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE AGUA PARA PREVENIR EL SOBRE RIEGO EN LOS CULTIVOS DE LA JUNTA DE AGUA 'MARÍA AUXILIADORA' DE LA PARROQUIA URBANA YARUQUÍES, RIOBAMBA-ECUADOR**, presentado por **Anahí Morelly León Barahona**, con cédula de identidad número 0604811638, bajo la tutoría del **PhD. Leonardo Fabián Rentería Bustamante**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba **5 de enero de 2026**

**Manuel Antonio Meneses Freire, PhD.**  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



**José Luis Jinez Tapia, Mgs.**  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



**Ciro Diego Radicelli García, PhD.**  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**





# CERTIFICACIÓN

Que, **ANAHI MORELLY LEÓN BARAHONA** con CC: **0604811638**, estudiante de la Carrera TELECOMUNICACIONES, Facultad de INGENIERÍA; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE COMPUERTAS BASADO EN EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE AGUA PARA PREVENIR EL SOBRE RIEGO EN LOS CULTIVOS DE LA JUNTA DE AGUA 'MARÍA AUXILIADORA' DE LA PARROQUIA URBANA YARUQUÍES, RIOBAMBA-ECUADOR"**, cumple con el 1% de similitud y 7 % de Inteligencia Artificial, de acuerdo con el reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 15 de diciembre de 2025



Firmado electrónicamente por:  
**LEONARDO FABIAN  
RENTERIA BUSTAMANTE**

Validar únicamente con FirmaEC

PhD. Leonardo Rentería Bustamante  
**TUTOR**

## DEDICATORIA

*Con todo el amor y gratitud dedico el presente proyecto de titulación:*

*A Dios, por ser mi guía (alfa, omega, principio y fin), mi fortaleza en mis momentos de duda y la luz que iluminó cada paso de este camino. A Él que me sostuvo con su infinito amor y me dio la sabiduría necesaria para llegar aquí.*

*Allá en el cielo a mi querido abuelito “Papa Bashi”, quien me cuida y acompaña. Gracias por el amor que dejó en mi vida, por ser mi ángel en los momentos difíciles y por darme fuerza aun desde su ausencia*

*A mi padre José León, cuya fortaleza ha sido mi ejemplo, cuyo amor ha sido mi refugio. Gracias por cada sacrificio silencioso, por trabajar muy duro para que pudiera llegar aquí. Gracias por creer en mí, por levantarme con sus palabras y enseñarme que con disciplina y humildad se construyen sueños. Todo lo que soy y logro lleva un pedacito de usted.*

*Al amor de mi vida, mi madre Dora Barahona, por su amor infinito, cariño y entrega, por ser mi amiga y apoyo incondicional, por acompañarme, por creer en mí incluso cuando yo lo dudaba, y por ser mi refugio en los días tristes. Mamita mía, gracias por mostrarme el valor del esfuerzo, por cada consejo que atesoro en mi corazón y por ser un pilar inamovible en mi vida.*

*A mis hermanas Doris, Melany y Alice, por ser mi compañía y alegría en cada etapa de mi vida. Gracias por esas palabras de ánimo, porque sus risas alivian cualquier cansancio y por caminar a mi lado con cariño y complicidad. Su presencia hizo más ligero el camino y más hermoso cada logro.*

*A mis sobrinos Ariel, Alejo, Dylan y Gabito, por ser la chispa que alegra mis días y la motivación más grande para cumplir mis sueños. Gracias por sus sonrisas sinceras, por su cariño puro y por recordarme lo bendecida que soy al tenerlos en mi vida. Cada uno de ustedes ilumina mi vida de manera especial.*

*Hoy cierro uno de los capítulos más importantes de mi vida. El camino no ha sido sencillo, pero fue posible gracias al amor, al apoyo y a la inmensa paciencia que ustedes me regalaron. Este logro no solo es mío: es también de quienes caminaron junto a mí; en mí siempre hay una gratitud grande y sincera.*

**Anahí Morelly León Barahona**

## **AGRADECIMIENTO**

*A la Universidad Nacional de Chimborazo y a la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, por haberme acogido y hacerme sentir como en mi segunda casa, y porque en sus aulas encontré una formación de calidad.*

*Al PhD. Leonardo Rentería, mis agradecimientos infinitos por su paciencia, sus consejos y su guía durante el desarrollo de este trabajo de titulación, que, gracias a su acompañamiento, hoy es una realidad.*

*Al presidente de la Junta de Agua 'María Auxiliadora', señor Segundo Mario Pilco, por su valioso acompañamiento y por la información proporcionada para la realización de las pruebas correspondientes. Gracias infinitas por su constante disposición.*

*A mis padres, por darme las raíces para ser fuerte y las alas para volar alto. Gracias por cada palabra de aliento, por los sabios consejos y por ser el refugio seguro al que siempre puedo volver.*

*A mis hermanas, compañeras de vida y cómplices incondicionales, gracias por escucharme, por entenderme y por recordarme que, pase lo que pase, siempre nos tendremos las unas a las otras.*

*A mis sobrinos, quienes son mi mayor inspiración. Todo mi esfuerzo es para demostrarles que todos los sueños se cumplen.*

*A mi madrina Mérida Barahona y mi padrino Jorge Nieto, gracias por estar siempre presentes y formar parte de este camino.*

*A mi persona, por haber tenido la valentía de continuar cuando la duda me hacía creer que no lo lograría. A esa versión de mí que alguna vez se sintió pequeña frente a este reto: hoy es este trabajo la prueba de que siempre fui capaz. Gracias por no rendirte, por creer en tu talento y por demostrarme que mis sueños son más grandes que mis miedos.*

**Anahí Morelly León Barahona**

## ÍNDICE GENERAL

**DECLARATORIA DE AUTORÍA**

**DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR**

**CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

**CERTIFICADO ANTIPLAGIO**

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**RESUMEN**

**ABSTRACT**

CAPÍTULO I.....	16
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Planteamiento Del Problema. ....	16
1.2 Justificación .....	17
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo General .....	18
1.3.2 Objetivos Específicos .....	19
CAPÍTULO II.....	20
2. MARCO TEÓRICO .....	20
2.1 Estado del arte.....	20
2.2 Marco Teórico.....	21
2.2.1 Riego en la agricultura .....	21
2.2.2 Tipos de sistemas de riego. ....	21
2.2.3 Riego automatizado.....	23
2.2.4 Tecnologías de automatización aplicadas al control de compuertas.....	24
2.2.5 Humedad del suelo.....	28
2.2.6 Sobre riego .....	30
2.2.7 Eficiencia de riego.....	31
CAPÍTULO III. ....	33
3. METODOLOGÍA .....	33



3.1	Tipo de Investigación.....	33
3.1.1	Investigación descriptiva.....	33
3.1.2	Investigación aplicada.....	33
3.1.3	Investigación de campo.....	33
3.1.4	Investigación experimental .....	33
3.2	Diseño de Investigación.....	33
3.3	Técnicas de recolección de datos.....	34
3.4	Población de estudio y tamaño de muestra.....	35
3.4.1	Población.....	35
3.4.2	Muestra.....	35
3.5	Operacionalización de variables.....	35
3.5.1	Variables independientes.....	35
3.5.2	Variables dependientes.....	35
3.6	Diagrama de fases del sistema automatizado de compuertas para prevenir el sobre riego. 35	
3.6.1	Fase 1: Revisión teórica y diagnóstico del sistema de riego.....	36
3.6.2	Fase 2: Diseño y desarrollo de la compuerta automatizada y tecnologías de control empleadas.....	42
3.6.3	Fase 3: Evaluación del sistema.....	68
CAPÍTULO IV.....		69
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	69
4.1	Resultados de las pruebas de campo.....	69
4.1.1	Datos registrados en el sistema tradicional.....	69
4.1.2	Datos registrados en el sistema automatizado.....	70
4.2	Análisis de resultados.....	70
4.2.1	Interpretación gráfica con diagrama de caja .....	71
4.3	Prueba de normalidad.....	72
4.4	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes.....	72
4.5	Cálculo de la eficiencia hídrica.....	73
CAPÍTULO V.....		74
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	74

5.1	Conclusiones .....	74
5.2	Recomendaciones .....	74
CAPÍTULO VI. ....		75
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	75
CAPÍTULO VII. ....		79
7.	ANEXOS .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1.</b> Comparativa de diferentes tecnologías de automatización para el control de compuertas [26]. ....	26
<b>Tabla 2.</b> Métodos de medición del caudal [29]. .....	27
<b>Tabla 3.</b> Tipos de sensores de humedad usados en la agricultura [31].....	28
<b>Tabla 4.</b> Enfermedades causadas por el sobre riego [33]. .....	31
<b>Tabla 5.</b> Variables independientes.....	35
<b>Tabla 6.</b> Variables dependientes .....	35
<b>Tabla 7.</b> Características generales del área de estudio [36], [37].....	37
<b>Tabla 8.</b> Generalidades del sitio experimental .....	38
<b>Tabla 9.</b> Características generales de la planta de alfalfa. [33] .....	39
<b>Tabla 10.</b> Humedad ideal del suelo según la etapa fenológica del cultivo de alfalfa [38], [39]. .....	40
<b>Tabla 11.</b> Fotografías de las compuertas construidas.....	43
<b>Tabla 12.</b> Comparativa de diferentes modelos de motores [40]. .....	43
<b>Tabla 13.</b> Especificaciones técnicas del módulo L298N [41]. .....	45
<b>Tabla 14.</b> Comparativa técnica de microcontroladores [42]. .....	46
<b>Tabla 15:</b> Tabla comparativa de sensores de humedad [31]. .....	47
<b>Tabla 16.</b> Comparativa sensores de caudal Efecto Hall. ....	49
<b>Tabla 17.</b> Bloques que conforman el diseño electrónico del receptor principal .....	52
<b>Tabla 18.</b> Bloques que conforman el diseño electrónico del nodo transmisor .....	55
<b>Tabla 19.</b> Bloques que componen el receptor secundario .....	56
<b>Tabla 20:</b> Comparativa de diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica [24]. .....	57
<b>Tabla 21:</b> Valores de referencia para la calibración de humedad .....	63
<b>Tabla 22.</b> Datos obtenidos del riego realizado por el agricultor.....	69
<b>Tabla 23.</b> Datos del sistema automatizado .....	70
<b>Tabla 24.</b> Análisis descriptivo del sistema tradicional y automatizado. ....	71
<b>Tabla 25.</b> Prueba de normalidad entre el sistema automático y el manual. ....	72
<b>Tabla 26.</b> Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes.....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Riego por surcos [17].	22
<b>Figura 2.</b> Riego por aspersión [19].	22
<b>Figura 3.</b> Riego por goteo [20].	23
<b>Figura 4.</b> Riego Fijo [18].	23
<b>Figura 5.</b> Riego de aspersión móvil [18].	23
<b>Figura 6.</b> Sistemas de riego automático [21].	24
<b>Figura 7.</b> Triángulo de la textura del suelo [32].	30
<b>Figura 8.</b> Diagrama de fases del diseño de investigación.	36
<b>Figura 9.</b> Delimitación del área total del terreno y distribución del área de estudio para el riego automatizado y el riego manual.	37
<b>Figura 10:</b> Etapas fenológicas de la alfalfa [47].	40
<b>Figura 11.</b> Métodos de riego tradicional observados en las parcelas.	41
<b>Figura 12.</b> Canal principal de distribución de agua en la Junta ‘María Auxiliadora’.	41
<b>Figura 13.</b> Vista Frontal compuerta de la compuerta y su mecanismo de accionamiento.	42
<b>Figura 14.</b> Esquema de la interfaz de control (Manivela y Lectura de Posición).	42
<b>Figura 15.</b> Vista Frontal	43
<b>Figura 16.</b> Vista Frontal manual	43
<b>Figura 17.</b> Adaptación al motor	43
<b>Figura 18.</b> Adaptación del motor (no).	43
<b>Figura 19:</b> Motor 25D-130 con caja reductora (35 RPM) [40].	44
<b>Figura 20.</b> Driver L298N y sus pines [46].	45
<b>Figura 21.</b> ESP32-WROOM 32 [45].	47
<b>Figura 22.</b> Sensor del suelo capacitivo V1.2 [45].	48
<b>Figura 23:</b> Sensor DN 50 2" [42].	49
<b>Figura 24.</b> Esquema general de la arquitectura del sistema automatizado	50
<b>Figura 25:</b> Arquitectura compuerta manual	51
<b>Figura 26.</b> Diagrama esquemático del receptor principal.	54
<b>Figura 27.</b> Diagrama esquemático completo del nodo transmisor.	55
<b>Figura 28.</b> Diagrama esquemático completo del receptor secundario.	57
<b>Figura 29.</b> Topologías de Comunicación en ESP-NOW [48].	59
<b>Figura 30.</b> Diagrama del proceso de riego realizado por el agricultor	60
<b>Figura 31.</b> Diagrama de bloques del sistema de riego automatizado	60
<b>Figura 32.</b> Árbol de decisión para establecer el riego	62
<b>Figura 33.</b> Ensamblaje del receptor principal	62
<b>Figura 34.</b> Ensamblaje nodos transmisores	63

<b>Figura 35.</b> Ensamblaje final nodo transmisor .....	63
<b>Figura 36.</b> Calibración de sensores de caudal .....	64
<b>Figura 37.</b> Instalación de tubería y T. ....	65
<b>Figura 38.</b> Instalación final de la compuerta y motor. ....	65
<b>Figura 39.</b> Integración y montaje de la Unidad Central de Control. ....	65
<b>Figura 40.</b> Puesta de sensores de humedad. ....	66
<b>Figura 41.</b> Distribución sensores de humedad sistema tradicional .....	66
<b>Figura 42:</b> Distribución de sensores de humedad sistema automatizado. ....	66
<b>Figura 43.</b> Croquis de distribución de los sensores. ....	67
<b>Figura 44.</b> Validación ESP-NOW para la compuerta automática y la manual.....	67
<b>Figura 45.</b> Lógica de control. ....	67
<b>Figura 46.</b> Verificación de registro de datos.....	68
<b>Figura 47.</b> Diagrama de caja de la cantidad de agua del sistema manual y automatizado.....	71
<b>Figura 48.</b> Diagrama de caja del porcentaje de humedad de cada tipo de sistema. ....	72

## RESUMEN

En la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’ de la parroquia Yaruquies, cantón Riobamba, la gestión del riego tradicional se basa en prácticas empíricas que omiten los requerimientos fenológicos del cultivo, provocando ineficiencia en el recurso hídrico. En este contexto, se diseñó un sistema automatizado de compuertas basado en el análisis del flujo de agua para prevenir el sobre riego en los cultivos. El trabajo se llevó a cabo en 3 fases: en la primera, se realizó la revisión bibliográfica acerca del flujo de agua, enfocándose en los sistemas automatizados de compuertas y sistemas de control, y cómo estos mejoran la eficiencia hídrica. En la segunda fase, se eligió el tipo de compuerta que se va a usar en la implementación; además, se escogieron los dispositivos electrónicos y de software adecuados para el diseño e implementación del prototipo, de acuerdo a los requisitos definidos. Finalmente, se evaluó el funcionamiento del sistema de compuertas mediante pruebas de campo; se realizó la experimentación en un área de 47,71 m<sup>2</sup>, que corresponde a un terreno de sembrío de alfalfa de 100 m<sup>2</sup>, donde se comparó con el método tradicional de riego. Se aplicó una investigación de tipo: descriptiva, aplicada, de campo y experimental. Se utilizó una arquitectura de red distribuida con el protocolo ESP-NOW, para la comunicación entre nodos sensores de caudal y humedad hacia el controlador central, denominado receptor principal para el sistema automatizado, y el receptor 2 para el sistema manual. El algoritmo de control se integró mediante la fusión de datos, por medio de un promedio ponderado y de acuerdo a los umbrales de humedad para el cultivo de alfalfa (70 % - 80 %), para la activación del motor. Los resultados de las pruebas de campo demostraron que el sistema automatizado disminuyó el consumo de agua en un 84,36 %, en comparación con el método manual. Asimismo, mediante el análisis de datos, se observó que el sistema automatizado logra mantener eficazmente el control de la humedad, garantizando que el cultivo se encuentre en condiciones óptimas, evitando así su deterioro y permitiendo que la automatización mantenga la humedad del suelo y garantice la eficiencia hídrica de los cultivos.

**Palabras clave:** Automatización de Riego, IoT Agrícola, Eficiencia Hídrica, Protocolo ESP-NOW, Control por umbrales, Red de sensores inalámbricos.

## Abstract

At the 'María Auxiliadora' Water Board in the Yaruquíes parish, Riobamba canton, traditional irrigation management relies on empirical practices that overlook the crop's phenological needs, leading to inefficient water resource use. To address this, an automated gate system based on water flow analysis was designed to prevent over-irrigation. The project was carried out in three phases: first, a literature review on water flow, focusing on automated gate and control systems and their role in enhancing water efficiency. In the second phase, the appropriate type of gate was selected; suitable electronic and software components were chosen for designing and implementing the prototype, based on specified requirements. Lastly, the gate system was tested in the field, using an experimental setup in a 47.71 m<sup>2</sup> area within a 100 m<sup>2</sup> alfalfa crop field, comparing its performance with traditional irrigation methods. The research employed a descriptive, applied, field, and experimental methodology. A distributed network architecture utilizing the ESP-NOW protocol facilitated communication between flow and moisture sensor nodes and the central controller, which served as the main receiver for the automated system, with a secondary receiver for manual operation. The control algorithm used data fusion through a weighted average, based on humidity thresholds for alfalfa cultivation (70% - 80%) to activate the motor. Field tests showed that the automated system reduced water usage by 84.36% compared to manual irrigation. Data analysis confirmed that the automated system effectively maintains soil moisture, promotes optimal crop conditions, prevents deterioration, and supports automation to sustain water efficiency and soil health.

**Keywords:** Automated gate system, water flow analysis, ESP-NOW protocol, water efficiency, data fusion, irrigation control.



Reviewed by:

Mgs. Hugo Solís V.

**ENGLISH PROFESSOR**

# **CAPÍTULO I.**

## **1. INTRODUCCIÓN.**

El agua es un recurso esencial para la agricultura, y su uso eficiente resulta clave para asegurar la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible. Según los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, en particular el objetivo 6, “Agua Limpia y Saneamiento” [1], se destaca la necesidad de gestionar de manera responsable los recursos hídricos. Actualmente, aproximadamente el 70 % del agua dulce a nivel mundial se emplea en actividades agrícolas [2], lo que plantea un desafío creciente para satisfacer la demanda alimentaria sin poner en riesgo la disponibilidad futura del recurso.

En el desarrollo de los cultivos, el riego desempeña un papel fundamental, ya que garantiza el suministro de agua necesario para cubrir las necesidades de la planta en cada etapa fenológica. Sin embargo, un manejo inadecuado del riego, especialmente cuando se aplica en exceso, puede generar problemas como la erosión del suelo, la pérdida de nutrientes y la reducción en el rendimiento de la producción [3]. Estas situaciones se presentan con mayor frecuencia en sistemas de riego tradicionales y manuales, como los utilizados en la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’, donde la distribución del agua no siempre es controlada de manera precisa.

Frente a esta problemática, el uso de tecnologías de automatización se presenta como una alternativa eficiente para mejorar el manejo del agua de regadío. En los sistemas automatizados de riego se emplean distintos dispositivos electrónicos, como sensores que permiten medir la humedad y el caudal, así como controladores programables y mecanismos de control adaptativo [4]. La integración de estos componentes permite regular el suministro de agua de acuerdo con las necesidades reales de cada cultivo y las condiciones del terreno, lo que contribuye a reducir las pérdidas por infiltración y escurrimiento.

Ante las ineficiencias operativas detectadas, este proyecto tiene como objetivo diseñar un sistema automatizado de compuertas en la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’, con el propósito de mejorar el manejo y la distribución del recurso hídrico. La propuesta busca reducir la intervención manual en el control de las compuertas y lograr una distribución más precisa del agua, promoviendo un uso responsable del recurso hídrico y favoreciendo el desarrollo de la actividad agrícola en la comunidad.

### **1.1 Planteamiento Del Problema.**

A nivel mundial se estima que cerca del 40% de los alimentos provienen de la agricultura de riego, la cual ocupa aproximadamente el 20% de la superficie cultivada [5]. De acuerdo con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje, actualmente se riegan alrededor de 328



millones de hectáreas en todo el mundo; siendo Asia y América los continentes con mayor superficie destinada al riego, con 215 millones y 51 millones de hectáreas respectivamente [5] [6]. Sin embargo, únicamente cerca del 6% de estas áreas cuentan con sistemas de riego tecnificados y eficientes.

En Ecuador existen aproximadamente 3,2 millones de hectáreas de suelo cultivable; sin embargo, solo el 26,2% de esta superficie, equivalente a cerca de 850 000 hectáreas, cuenta con sistemas de riego [6]. De este total, solo cerca del 7% tiene una infraestructura de riego considerada como eficiente, lo que evidencia una brecha significativa en los niveles de tecnificación y en el manejo adecuado del recurso hídrico. Entre los métodos de riego tradicional se encuentran la aspersión, la irrigación superficial y la inundación.

A pesar de los beneficios que el riego aporta al desarrollo de los cultivos, su aplicación inadecuada o excesiva puede generar efectos negativos tanto en la salud del suelo como en la planta [1]. El sobre riego reduce la disponibilidad de oxígeno en las raíces y favorece la proliferación de enfermedades fúngicas y bacterianas; entre las más comunes se encuentran la podredumbre de las raíces, mildiu, roya, oídio, Fusarium y la antracnosis, afectando de manera directa la productividad y calidad de la cosecha. [7]. Asimismo, el exceso de humedad puede causar asfixia radicular y desbalance nutricional, lo que limita el desarrollo vegetal.

En la parroquia urbana Yaruquíes, perteneciente al cantón Riobamba, el riego en la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’ se realiza de forma manual y se basa principalmente en la observación directa y la experiencia de los agricultores para determinar la cantidad de agua de regadío aplicada en los cultivos. Este tipo de manejo puede generar tanto excesos como deficiencias en el riego, además de incrementar los costos operativos debido al tiempo y al esfuerzo que requiere su control. La ausencia de sistemas automatizados limita la posibilidad de ajustar el suministro de agua de acuerdo con las necesidades fenológicas del cultivo, lo que repercute directamente en la eficiencia en el uso del recurso hídrico.

En consecuencia, la falta de un control preciso en la distribución del agua presenta un problema que compromete la sostenibilidad del riego, la productividad agrícola y el manejo adecuado del agua de regadío en la Junta de Riego ‘María Auxiliadora’. Por lo tanto, es necesaria la implementación de tecnologías que permitan regular de manera eficiente el flujo de agua y eviten el sobre riego, contribuyendo al aprovechamiento sostenible de este recurso esencial.

## **1.2 Justificación**

Con el desarrollo de este trabajo de investigación se busca proporcionar una solución efectiva y sostenible para optimizar el manejo de los recursos agrícolas en los sistemas de

riego, específicamente en la Junta de Riego ‘María Auxiliadora’ de la parroquia urbana Yaruquíes, Riobamba. Esto es fundamental para prevenir el exceso de consumo de agua de riego, mejorar la productividad de los cultivos y promover prácticas responsables que aseguren el uso racional de este recurso vital.

Esto se debe a que actualmente el riego se realiza por medio de métodos manuales basados en la observación y experiencia del agricultor, lo que dificulta un control preciso del caudal y puede ocasionar tanto deficiencias como excesos de agua.

Asimismo, mediante el análisis del flujo de agua y la automatización de las compuertas, se espera minimizar el desperdicio, reducir costos operativos asociados a la mano de obra y otros insumos agrícolas, y mitigar los impactos negativos del exceso de irrigación, como la degradación del suelo y la proliferación de enfermedades en los cultivos. Este proyecto busca beneficiar directamente a los agricultores al garantizar que los cultivos reciban la cantidad de agua adecuada según sus necesidades hídricas.

Por otro lado, el sistema automatizado propuesto es parte fundamental del presente trabajo de investigación, ya que busca integrar tecnologías accesibles y adaptables que faciliten su implementación y posterior replicación. Esto permite que la solución no sea solo aplicable en la zona de estudio, sino que también pueda adaptarse a diferentes sistemas de riego en otros sectores, fomentando prácticas sostenibles de manejo del recurso hídrico.

La implementación del sistema propuesto permitirá mejorar la gestión del riego en la Junta de Agua, al reducir el tiempo que los agricultores destinan al control manual de las compuertas y facilitar una distribución más uniforme del agua entre los usuarios. Estas mejoras inciden directamente en la producción agrícola y en un uso más organizado y eficiente del agua de regadío. Para la validación de la propuesta planteada se trabajará con un único prototipo experimental. Este prototipo permitirá comprobar el correcto funcionamiento del sistema en condiciones reales de operación y establecer un modelo funcional que pueda ser replicado posteriormente en la infraestructura de riego.

### **1.3 Objetivos.**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema automatizado de compuertas basado en el análisis del flujo de agua para la prevención del sobre riego en los cultivos de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’ de la parroquia urbana Yaruquíes, Riobamba-Ecuador.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Investigar los fundamentos teóricos sobre el flujo de agua y la gestión de riego, enfocándose en los sistemas automatizados de compuertas, el uso de tecnologías de control y su impacto en la optimización de recursos hídricos.
- Desarrollar un sistema automatizado de compuertas basado en el análisis de flujo de agua, utilizando tecnologías adecuadas para el control del suministro del recurso hídrico en función de las necesidades específicas de los cultivos.
- Realizar pruebas de funcionamiento del sistema automatizado en una parcela agrícola perteneciente a la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’, evaluando su efectividad para la prevención del sobre riego y analizando los resultados en comparación con el sistema manual de riego.

## CAPÍTULO II.

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Estado del arte.

Con el fin de fomentar prácticas sostenibles para cuidar los recursos hídricos, en [8] se aborda el proyecto “Digital Riego” impulsado por el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. La finalidad de este proyecto es ajustar el suministro de agua mediante sistemas de regadío según las necesidades específicas del cultivo. Se destaca el uso de información térmica, teledetección mediante drones y satélites, así como modelos semimecánicos para evaluar el estado hídrico de las plantas y determinar la frecuencia de riego basada en mediciones de humedad. Esta investigación confirma la importancia de monitorear parámetros de cultivo para regular el riego de manera precisa, lo cual respalda el enfoque del presente estudio en el análisis del flujo de agua para evitar el sobre riego.

Por su parte, en [9] se desarrolló un sistema de riego financiado por la Generalitat Valenciana, orientado a optimizar el suministro de agua mediante el uso de información térmica para evaluar la sequedad de las plantas y medir la evapotranspiración real. El sistema fue probado en cultivos como brócoli, cebolla, uva y sandía, y se encuentra en su fase final de pruebas. El estudio tiene como finalidad generar recomendaciones basadas en las condiciones meteorológicas, el tipo de suelo y la etapa de desarrollo de los cultivos, lo que evidencia la importancia de utilizar datos reales para la toma de decisiones en sistemas de riego.

De acuerdo con [10], el monitoreo del consumo de agua es esencial para la eficiencia de riego. Los autores describen varios tipos de sensores de humedad; entre ellos, se detallan sensores de capacitancia como los ECH2O que miden los cambios instantáneos de la constante dieléctrica del suelo, y los sensores de tipo Watermark que son adecuados para medir la tensión del agua en condiciones específicas. Asimismo, se señalan aspectos importantes en la instalación, como la distancia entre los sensores y el área representativa del terreno. Este aporte brinda criterios técnicos que son útiles para seleccionar y colocar sensores en un sistema automatizado propuesto en la presente investigación.

En [11], se aborda el manejo eficiente del agua mediante sensores de humedad de la marca Irrometer instalados a profundidades de 15 y 30 centímetros para un sistema de riego por goteo en cultivos de tabaco. Los sensores fueron colocados cada 4 metros y las lecturas de datos se realizaron diariamente. Además, se llevó a cabo un examen visual de la morfología de las plantas. Los datos recolectados fueron interpretados a través de la curva de retención de humedad del suelo, que representa gráficamente la relación entre el contenido de agua del suelo y su capacidad de retención. En este estudio realizado se demuestra que la automatización basada en mediciones mejora el control hídrico, lo cual coincide con el objetivo de prevenir el sobre riego en la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’.

Agbar en [12] describe diferentes tipos de sistemas de riego automáticos, como el riego por surcos, por goteo y por aspersión. Entre las características más importantes destacan la reducción de los costos de producción, la dosificación óptima de la parcela, mayor control sobre los parámetros de riego, aumento de la productividad, la optimización del tiempo de trabajo, el soporte para la toma de decisiones y el mantenimiento preventivo. Esta referencia confirma que la automatización brinda beneficios operativos y de gestión, reforzando de esta manera la necesidad de implementar un sistema automatizado de compuertas en la presente investigación.

## **2.2 Marco Teórico.**

### **2.2.1 Riego en la agricultura**

El riego es el suministro de agua a los cultivos por medios artificiales, diseñado para favorecer el crecimiento vegetal deseado en regiones áridas y para compensar la sequía en regiones semiáridas o subhúmedas. Incluso en zonas donde las precipitaciones estacionales promedio parecen ser suficientes, la lluvia suele distribuirse de manera desigual o los suelos pueden tener poca capacidad de retención de agua, lo que hace necesario el riego para garantizar un adecuado desarrollo de los cultivos. [13].

La implementación de un sistema de riego permite mejorar el aprovechamiento del agua disponible, en función de los requerimientos hídricos del cultivo. De esta manera, el suministro de agua puede ajustarse a procesos como la evapotranspiración, favoreciendo una absorción más eficiente por parte de las plantas.

La selección del sistema de riego requiere un estudio previo que determine cuál es el más idóneo según el tipo de cultivo, el suelo y las condiciones del terreno. Este análisis permite elegir una técnica de distribución del agua que maximice el rendimiento del cultivo [14].

### **2.2.2 Tipos de sistemas de riego.**

Los sistemas de riego constituyen una tecnología que ha evolucionado de manera proporcional al desarrollo de la sociedad y permite aplicar agua de manera eficiente según las características y necesidades de cada parcela agrícola. Existen distintos tipos de riego, cada uno con ventajas y aplicaciones específicas. Entre los más comunes se encuentran:

#### **2.2.2.1 Riego por gravedad o surcos.**

El riego por gravedad utiliza la presión natural del agua para su distribución, requiriendo un menor consumo de energía comparado con los sistemas presurizados [15].

El riego por surcos se puede implementar en cualquier parcela, independientemente de la topografía del terreno, ya que se basa en un diseño en curvas a nivel o en desnivel. No

demanda una gran inversión y puede utilizarse solamente durante el periodo del cultivo. Sin embargo, es fundamental asegurar una fuente cercana de agua confiable, como ríos, canales o lagunas [16].



**Figura 1.** Riego por surcos [17].

#### **2.2.2.2 Riego por aspersión.**

El riego por aspersión es un sistema menos utilizado; sin embargo, contribuye de manera significativa al uso eficiente del agua. Su implementación puede permitir un ahorro aproximado del 55 % de agua en comparación con el riego superficial. Este método requiere un diseño mecánico, ya que es necesario contar con una bomba que genere la presión suficiente para que el agua se movilice. En este sistema no es necesario que el suelo esté nivelado, pues permite controlar la cantidad de agua aplicada según el tipo de cultivo y su correspondiente etapa fenológica [18].



**Figura 2.** Riego por aspersión [19].

#### **2.2.2.3 Riego por goteo.**

Es ampliamente utilizado para aumentar la eficiencia del riego y reducir el consumo de agua, ya que suministra el recurso directamente a la raíz del cultivo en forma de gotas. Este método permite controlar los ciclos de riego y ajustarlos según las necesidades específicas del cultivo. Al no requerir un sistema automatizado complejo, no necesita control o supervisión constante; sin embargo, la obstrucción de los goteros, filtros o dosificadores puede reducir la efectividad del sistema [18].

Con un manejo adecuado, este tipo de riego puede alcanzar una operatividad superior al 90 %, logrando un ahorro de agua de hasta el 50 % con técnicas como el secado parcial de la zona radicular [18].



**Figura 3.** Riego por goteo [20].

#### **2.2.2.4 Riego fijo.**

En este tipo de sistemas, las tuberías primarias y secundarias se instalan de forma subterránea, quedando expuestas únicamente las conexiones de los elevadores de los aspersores, las cuales se distribuyen a lo largo de todo el campo. Esta configuración se ha visto favorecida por la evolución de los materiales plásticos, que permiten el uso de tuberías de diámetro más pequeño en comparación con las antiguas de fibrocemento [18].



**Figura 4.** Riego Fijo [18].

#### **2.2.2.5 Riego móvil.**

Los sistemas de riego se clasifican en móviles y semimóviles; ambos tipos cuentan con movimiento lateral, frontal, circular, entre otros. En los de tipo móvil, ninguna parte permanece fija, lo que permite movimientos frontales y laterales. Por otro lado, los semimóviles están unidos a un punto fijo, lo que hace que tengan movimientos circulares.



**Figura 5.** Riego de aspersión móvil [18].

#### **2.2.3 Riego automatizado.**

El riego automático consiste en el uso de dispositivos capaces de operar las estructuras de riego sin la intervención directa del agricultor. De esta manera, la apertura, cierre o

regulación del flujo del agua se realiza de forma programada o en función de determinados parámetros. Según [21], la automatización se puede aplicar: para iniciar o detener el riego desde las salidas de los canales de suministro, activar bombas y controlar el flujo de agua en áreas determinadas.

Entre los beneficios del riego automático, [11] destaca la reducción de mano de obra, la aplicación oportuna del agua de acuerdo a los requerimientos hídricos del cultivo, gestión y control de caudales elevados con mayor precisión, lo que contribuye al uso eficiente de este recurso.

No obstante, este tipo de riego también presenta desventajas, entre ellas se destaca la inversión económica inicial, tanto en la adquisición de materiales y equipos como en la instalación del sistema. Además, requiere mantenimiento preventivo y correctivo especializado.

En la figura 6 se observa un ejemplo básico de un sistema automatizado utilizado para la distribución y control de flujo de agua en los cultivos.



**Figura 6.** Sistemas de riego automático [21].

#### **2.2.4 Tecnologías de automatización aplicadas al control de compuertas.**

La automatización en los sistemas de riego permite controlar de manera precisa y controlada la distribución del agua, optimizando el recurso y reduciendo la intervención humana. Para cumplir con este propósito se emplean diferentes tecnologías que varían en costo, complejidad y capacidad de análisis de datos. Entre las más utilizadas se encuentran: los programadores lógicos programables (PLC), los sistemas SCADA, los microcontroladores y plataformas de Internet de las Cosas (IOT). A continuación, se presentan sus principales características y aplicaciones para el control automatizado de compuertas.

##### **2.2.4.1 Control de PLC.**

Los controladores lógicos programables (PLC) son dispositivos electrónicos diseñados para ejecutar tareas de control secuencial de manera eficiente y confiable. Se utilizan en condiciones ambientales exigentes, donde se requiere automatización industrial; entre las características más importantes están: la alta robustez, tolerancia a fallos, lo cual garantiza su alta fiabilidad y operabilidad en estos entornos [22]. En sistemas de riego, los PLC permiten controlar el funcionamiento de bombas, la apertura y el cierre de compuertas, la regulación de válvulas con precisión temporal, garantizando el suministro de agua estable.



Sin embargo, su implementación requiere alto costo económico tanto en materiales, programación como integración del sistema.

#### **2.2.4.2 Supervisión y control mediante SCADA.**

Los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) permiten la monitorización y control de procesos a distancia mediante interfaces gráficas. En el riego, este tipo de tecnología permite supervisar múltiples compuertas a través de una red hidráulica, registrar datos históricos de caudal y establecer alarmas ante posibles fallos. Su arquitectura cliente-servidor [23] facilita controlar el sistema desde centros de operación y dispositivos remotos. Sin embargo, su instalación y posterior mantenimiento requieren una infraestructura especial.

#### **2.2.4.3 Automatización mediante microcontroladores.**

Los microcontroladores son una opción accesible y versátil para automatizar sistemas de riego en pequeñas y grandes escalas; en particular, el ESP32 se destaca por la conectividad Wi-Fi y Bluetooth, múltiples entradas analógicas y un procesamiento adecuado para leer sensores y controlar actuadores. Gracias a su uso, se pueden implementar sistemas de compuertas automatizadas que responden a variables ambientales como la humedad del suelo, el nivel de agua y la temperatura [24]. Además, su programación es flexible a través de plataformas como Arduino IDE o MicroPython, lo que facilita tanto el desarrollo como la escalabilidad del sistema.

#### **1.1.1.4 Sistemas basados en IoT para el riego inteligente.**

Los sistemas basados en Internet de las cosas (IoT) permiten integrar sensores y actuadores con plataformas en la nube, facilitando el monitoreo y control de los procesos de riego. Esta tecnología posibilita el acceso remoto al sistema desde dispositivos con conexión a Internet, así como la programación del riego en función de las necesidades reales del cultivo y el registro de datos de humedad y caudal [25]. Además, las soluciones IoT presentan una alta escalabilidad y costos relativamente accesibles, lo que favorece su aplicación en la agricultura de precisión y el manejo sostenible del agua.

#### **1.1.1.5 Comparativa de las tecnologías de automatización que se aplican para el control de compuertas.**

La tabla 1 presenta una comparación de las principales tecnologías utilizadas en la automatización de compuertas, considerando sus características más importantes, como la funcionalidad, ventajas y desventajas técnicas y costos operativos.

**Tabla 1.** Comparativa de diferentes tecnologías de automatización para el control de compuertas [26].

<b>Características</b>	<b>PLC</b>	<b>SCADA</b>	<b>IOT</b>
<b>Función principal</b>	Control secuencial y lógico en tiempo real de procesos industriales.	Supervisión, monitoreo y gestión remota de procesos mediante una interfaz central.	Integración de sensores y actuadores mediante redes cableadas o inalámbricas.
<b>Ventajas Técnicas</b>	-Alta confiabilidad. -Módulos industriales y tolerancia a fallos.	-Monitoreo global. -Registro histórico. -Gestión de alarmas.	-Escalabilidad. -Acceso remoto. -Integración con plataformas en la nube.
<b>Robustez</b>	Muy alta	Alta	Media- Alta
<b>Capacidad de análisis de datos</b>	Media	Alta	Muy alta
<b>Arquitectura</b>	Centralizada, basada en módulos físicos interconectados.	Distribuido bajo arquitectura cliente-servidor	Distribuida y modular
<b>Conectividad</b>	Modbus, Profibus, Ethernet	Ethernet, TCP/IP, MQTT, OPC	WIFI, LoRaWAN, NB-IoT, MQTT
<b>Costo Aproximado</b>	Alto	Muy alto	Medio

#### 2.2.4.3 Fundamentación teórica del flujo de agua y gestión de riego.

El riego cumple un papel importante en la agricultura, ya que permite satisfacer las necesidades de las plantas de acuerdo con la etapa fenológica. En los sistemas de canales abiertos, el análisis del flujo es fundamental porque permite evaluar el comportamiento hídrico y la cantidad de agua que se distribuye a lo largo del canal principal de riego [27]. Una gestión eficiente de estas infraestructuras contribuye a reducir o evitar pérdidas por infiltración o desbordamientos, favoreciendo una distribución equitativa del recurso hídrico y un mejor rendimiento agrícola.

El flujo de agua se analiza mediante el caudal ( $Q$ ), que se expresa en litros por segundo (L/s), variable fundamental para describir el régimen hidráulico del sistema [28]. Su medición se puede realizar por medio de diversos dispositivos como sensores eléctricos, vertederos o

aforradores, los cuales permiten obtener datos precisos y confiables para la toma de decisiones en sistemas de riego automatizados.

El control adecuado del caudal es un aspecto esencial para garantizar los principios de eficiencia hídrica, ya que permite suministrar el volumen de agua necesario según el tipo de cultivo, su etapa de crecimiento y las características del suelo [23]. Un manejo adecuado del recurso permite una gestión más sostenible y reduce el desperdicio de agua en la actividad agrícola.

#### 2.2.4.4 Métodos de medición del caudal.

La medición del caudal en los canales de riego depende de las características del sistema de riego, las condiciones hídricas y la disponibilidad de recursos; se puede utilizar desde métodos de medición muy simples hasta dispositivos más sofisticados. A continuación, en la Tabla 2, se presentan algunos de los métodos más comunes para medir el caudal en los sistemas de riego.

**Tabla 2.** Métodos de medición del caudal [29].

<b>Método</b>	<b>Características</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Volumétrico</b>	En un recipiente cuyo volumen sea conocido, se recoge agua y se mide el tiempo de llenado.	Simple, no requiere de instrumentación especializada.	No es práctico en caudales grandes; requiere mediciones periódicas.
<b>Flotador</b>	Se coloca un objeto flotante y se mide su velocidad, combinando con el área transversal del canal, se obtiene el caudal.	Económico y fácil de implementar.	Baja precisión, influyen la turbulencia y las variaciones del nivel de agua.
<b>Vertederos/Aforadores</b>	Son estructuras fijas con forma de V instaladas en el canal con sección controlada, relacionan la altura del agua con el caudal.	Precisos, fáciles de instalar y con bajo mantenimiento.	Debido a su estructura, modifican el flujo normal del canal; requieren calibración adecuada.
<b>Sensor de efecto Hall</b>	Utiliza un rotor con imán dentro de su estructura, lo que genera pulsos eléctricos al paso del agua.	Permite mediciones continuas y automatizadas; se integra con microcontroladores.	Requiere calibración, baja precisión en caudales pequeños puede obstruirse con sedimentos.

La gran variedad de métodos disponibles permite adaptar la medición a diferentes condiciones del sistema y a los objetivos del presente trabajo investigativo.

### 2.2.5 Humedad del suelo.

La humedad del suelo se define como la cantidad de agua que ha sido contenida en un sólido o líquido mediante absorción o adsorción. Este parámetro depende de las fuerzas que actúan sobre las moléculas de agua, mismas que se determinan por la estructura y composición del suelo. De acuerdo con [30] por su comportamiento hay tres tipos de humedad:

- **Humedad gravitacional:** Es el agua libre que se desplaza por la acción de la gravedad a través de microporos. Su movimiento es rápido y es más notable en suelos bien drenados.
- **Humedad capilar:** Se mantiene dentro del suelo por las fuerzas de cohesión y adhesión. Es la responsable de la relación entre el suelo y las raíces de las plantas debido a las interacciones físico-químicas.
- **Humedad higroscópica:** Corresponde a una capa delgada que se encuentra alrededor de la superficie del suelo. Esta humedad no es aprovechable para las plantas.

#### 2.2.5.1 Tipos de sensores usados en la agricultura.

En la actualidad existe una gran variedad de métodos para medir la humedad del suelo. Se busca que el sensor permita una medición rápida, no invasiva y que entregue una señal eléctrica que pueda procesarse e integrarse a un sistema de control. En la tabla 3 se observa una tabla comparativa de los principales sensores usados en la agricultura:

**Tabla 3.**Tipos de sensores de humedad usados en la agricultura [31].

Tipo de sensor	Ventajas	Desventajas	Cuando utilizar
<b>Sensor de resistencia</b>	-Bajo costo. -Bajo consumo de energía. -Fácil de implementar.	-Baja precisión. -Se degrada con el tiempo.	-Solo se necesita saber cambios generales de humedad y no se requiere mucha precisión.
<b>Sensor TDR</b>	-Alta precisión calibración (2-3 %). -Insensible a la salinidad baja y media.	-Instalación compleja. -Costo elevado. -Consumo alto de energía.	-En estudios científicos o aplicaciones donde se necesite precisión y datos estables.

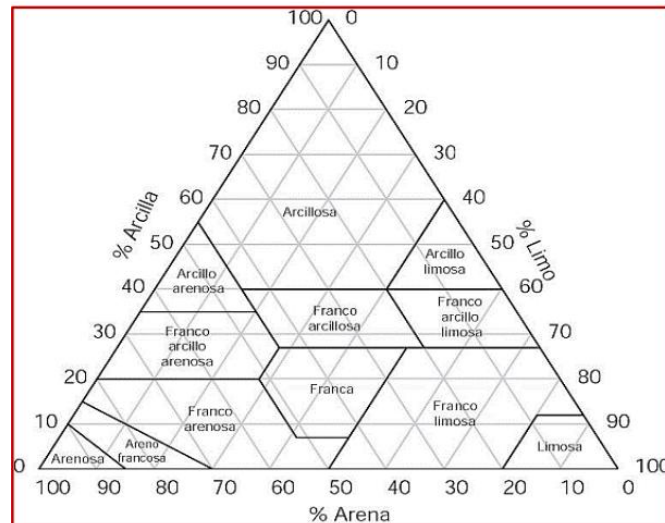
	-Permite mediciones continuas. - Muy confiable para investigación.	-No funciona bien en suelos con alta salinidad.	
<b>Sensor de Capacitancia</b>	-Mediciones Continuas. -Fácil instalación. -Alta precisión de calibración (2-3 %). -Bajo consumo de energía. -Costo moderado.	- Algunas marcas presentan bajo rendimiento. -Se puede ver afectado en suelos con salinidad alta.	-Cuando se necesitan muchos puntos de medición y un sistema de bajo consumo, como en la agricultura de precisión.
<b>Sonda de Neutrones</b>	-Gran volumen de medición. -Alta durabilidad. - Método tradicional y confiable.	-Requiere certificación de radiación. -No permite medición continua. -Operación lenta -Muy costosa.	-En suelos con alta salinidad o donde existen problemas para mantener un buen contacto entre el suelo y el sensor.

La comparación de los distintos sensores permite tener mejor comprensión de cómo funciona cada tecnología relacionada con los sensores de humedad y en qué condiciones se obtiene un mejor rendimiento. Cada dispositivo tiene sus ventajas y limitaciones; esto depende del tipo de suelo, la precisión que el usuario necesita y el costo del sistema.

#### 2.2.5.2 Factores que inciden en la humedad del suelo

La humedad del suelo no depende únicamente de la cantidad de agua presente, sino también de condiciones físicas y ambientales que influyen en su retención, movimiento y pérdida por evaporación. Entre los factores más importantes están:

- **Textura:** Corresponde a la proporción de arena, limo y arcilla que conforman su estructura; en la Figura 7 se observa el triángulo de texturas del suelo y la composición del mismo, lo que determina la capacidad del suelo para retener o drenar agua.



**Figura 7.** Triángulo de la textura del suelo [32].

**Suelo arenoso:** Baja retención de agua debido al gran tamaño de sus partículas, por lo que retiene poca humedad y permite un drenaje muy rápido.

**Suelo arcilloso:** Tiene alto contenido de arcilla y limo, lo que incrementa su capacidad de retención de agua.

**Suelo limoso:** Es una mezcla de partículas finas entre arcilla y arena. Presenta buena retención, pero tiende a compactarse con facilidad.

**Suelo Franco:** Considerado ideal para los cultivos por su equilibrio entre retención e infiltración

- **Temperatura:** Al incrementar la temperatura, la evaporación aumenta y provoca una disminución más rápida de la humedad en el suelo.
- **Precipitación:** Principal fuente de ingreso al perfil del suelo.
- **Materia Orgánica:** Mejora la estructura del suelo, aumenta su capacidad de retención y reduce la pérdida por evaporación.
- **Cobertura Vegetal:** Es una protección natural que disminuye la exposición directa al sol y al viento, lo que ayuda a conservar la humedad.
- **Pendiente y drenaje:** En terrenos inclinados, la escorrentía es mayor, lo que disminuye la infiltración y reduce la capacidad de retención del agua.

### 2.2.6 Sobre riego

El exceso de riego ocurre cuando los cultivos reciben más agua de la necesaria para desarrollarse de manera correcta en la fase de crecimiento y desarrollo. Este fenómeno puede ocasionar daños leves o muy graves, como la pudrición de las raíces [5]. Entre las principales causas se encuentran la mala planificación del riego, el drenaje insuficiente y el desconocimiento de los requerimientos hídricos según cada especie. El exceso de humedad provoca pérdidas de nutrientes y el deterioro de los minerales que se encuentran en el perfil del suelo.

A continuación, de acuerdo con [5], los síntomas asociados al exceso de riego son:

- La planta se muestra marchita o débil debido a la incapacidad para absorber nutrientes.
- Las hojas inferiores toman un color amarillo.
- Presencia de hongos alrededor del tallo.
- Podredumbre en la base del tallo.
- Caída de las flores.
- Crecimiento lento y estancado.
- Las hojas más jóvenes tienen tonalidad marrón y posteriormente se extiende a las demás hojas.

Cuando los cultivos son afectados por enfermedades derivadas del exceso de agua, se reduce la producción y aumenta los costos operativos vinculados al control de plagas. En la tabla 4 se muestran las enfermedades más comunes asociadas al sobre riego.

**Tabla 4.** Enfermedades causadas por el sobre riego [33].

Enfermedad	Descripción	Efectos
Pudrición de las raíces	Causada por hongos como <i>Phytophthora</i> , <i>Pythium</i> y <i>Fusarium</i>	Debilitamiento general y amarillamiento de hojas.
Marchitez vascular	Asociada a patógenos como <i>Fusarium oxysporum</i>	Hojas caídas y decaimiento progresivo.
Manchas foliares	Provocadas por hongos como <i>Alternaria</i> y <i>Cercospora</i>	Afectan el crecimiento y desarrollo de la planta.
Mildiu y moho gris	Enfermedades como el mildiu (causado por <i>Peronospora spp.</i> ) y el moho gris ( <i>Botrytis cinerea</i> )	Afectan hojas, flores y frutos.

### 2.2.7 Eficiencia de riego

Es un indicador muy importante para gestionar de forma sostenible los recursos hídricos en la agricultura, ya que busca maximizar el agua que realmente aprovecha el cultivo y minimizar las pérdidas por evaporación y drenaje profundo [34]. Una alta eficiencia implica ahorrar agua y mantener niveles adecuados de humedad en el suelo, garantizando que la planta absorba los nutrientes necesarios para el desarrollo.

Para que el riego se realice de manera eficiente, es necesario considerar varios factores relacionados con el uso del agua. Uno de ellos es el suministro hídrico, el cual debe aplicarse de acuerdo con los requerimientos del cultivo, ya que un volumen deficiente puede provocar estrés hídrico y afectar el rendimiento, mientras que un exceso genera desperdicio de agua y erosión del suelo. Otro aspecto importante es la humedad del suelo, la cual permite

determinar el momento adecuado para realizar el riego. Por último, una distribución adecuada del agua en un terreno es fundamental para evitar la presencia de zonas secas o inundadas.

Asimismo, la eficiencia se optimiza mediante dos relaciones importantes: la relación agua-suelo (que incluye textura, estructura y pendiente del terreno) y la relación agua-planta-clima, la cual permite estimar cuánta agua necesita el cultivo de acuerdo a su etapa fenológica y condiciones atmosféricas [31].

Diversos estudios respaldan que el uso de tecnologías modernas incrementa de manera significativa la eficiencia. Investigaciones basadas en sensores de humedad en cultivos de maíz muestran mejoras notables en el uso del agua cuando el riego se activa según la humedad registrada. En el caso del cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.), se ha demostrado que controlar la frecuencia y la intensidad del riego durante las fases críticas del crecimiento, permite alcanzar una relación óptima entre el consumo de agua y la producción, reduciendo pérdidas y mejorando la calidad del forraje [35].

Por otro lado, la tecnología IoT y el uso de microcontroladores permiten monitorear variables en tiempo real y activar o desactivar el riego cuando el cultivo lo necesite. De esta forma, la eficiencia de riego no solo beneficia al cultivo en cuanto al rendimiento, sino que reduce costos operativos y protege el recurso hídrico [31]. La combinación de métodos tradicionales y sistemas automatizados representa una estrategia precisa para alcanzar una gestión hídrica eficiente y más sostenible y precisa, lo cual es fundamental para enfrentar los desafíos como el cambio climático y la escasez de agua dulce en el planeta.



## **CAPÍTULO III.**

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Tipo de Investigación.**

La investigación fue de tipo descriptiva, aplicada, de campo y experimental, ya que permitió caracterizar la situación actual de riego en la zona, aplicar diversas tecnologías para solucionar un problema real y validar el funcionamiento del prototipo en las parcelas agrícolas.

##### **3.1.1 Investigación descriptiva**

La investigación descriptiva permitió analizar cómo se manejaba el recurso hídrico en las parcelas de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’. Para ello se recopilaron datos sobre las prácticas de riego empleadas por los agricultores, el tipo de las compuertas de regadío utilizadas y las particularidades de cada cultivo. Esta información fue esencial para determinar las necesidades reales del sistema y definir los parámetros que se utilizaron para el sistema automatizado.

##### **3.1.2 Investigación aplicada**

Se utilizó este enfoque porque el estudio buscó una solución práctica al problema del uso ineficiente del agua de regadío. La investigación aplicada permitió seleccionar sensores de humedad, medidores de caudal, el microcontrolador ESP32 y el mecanismo de apertura automática más adecuados para las condiciones del terreno. Además, ayudó a establecer los parámetros de funcionamiento que mejoraron la eficiencia del riego y el aprovechamiento del recurso hídrico.

##### **3.1.3 Investigación de campo.**

La investigación se desarrolló en un terreno agrícola de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’, localizado en las coordenadas geográficas S 1°41’44,491” y W 78°39’7,5297. Durante las visitas técnicas en el área de estudio, se recopiló información directa proporcionada por los agricultores, relacionada con el cultivo de alfalfa, la forma de distribución del agua y el manejo de las compuertas operadas de forma manual.

##### **3.1.4 Investigación experimental**

Este tipo de investigación se orientó a la construcción, instalación y evaluación del funcionamiento del sistema propuesto. Para ello, el prototipo fue expuesto a mediciones controladas, con el propósito de analizar variables como el caudal y la humedad del suelo. A partir de estos resultados, se comparó el riego manual con el automatizado, lo que permitió identificar las mejoras obtenidas en el uso del recurso hídrico.

#### **3.2 Diseño de Investigación.**

La presente estudio adoptó un enfoque cuantitativo, respaldado en la medición y el análisis de variables numéricas asociadas al funcionamiento tanto del sistema manual como del automatizado. Para ello, se registraron datos como el caudal del agua y la humedad del suelo,

con el fin de evaluar la eficiencia del sistema en el uso del agua de regadío y en la reducción del sobre riego.

En el desarrollo del estudio se realizó una comparación directa entre los valores del caudal obtenidos durante el riego manual y los registrados por la compuerta automática, bajo condiciones controladas en el área de estudio. Este procedimiento permitió identificar las diferencias en el consumo de agua y estudiar el comportamiento de la humedad del suelo en ambos casos.

Posteriormente, la información recopilada fue analizada mediante software estadístico, lo que facilitó la interpretación de los resultados y permitió validar la efectividad del sistema automático frente al método manual de riego.

### **3.3 Técnicas de recolección de datos.**

Durante el estudio, las variables fueron registradas de forma directa y automática en tiempo real. Este procedimiento permitió obtener información continua y cuantificable sobre el caudal y la humedad del suelo en ambos métodos, lo que contribuyó a establecer el análisis comparativo.

- **Instrumentos.**

Los principales equipos utilizados fueron: sensores de humedad capacitivos V1.2 (8 puntos de muestreo, 4 para cada área delimitada), dos sensores de caudal YF-DN50 (ubicados antes de la compuerta automática y de la compuerta manual), módulos ESP32 -WROOM32 encargados de la adquisición y transmisión mediante el protocolo ESP-NOW, un nodo receptor principal en la compuerta automática y un receptor secundario en la compuerta manual. Los datos recolectados se almacenaron en archivos CSV para su posterior análisis.

- **Procedimiento de medición.**

Antes de iniciar las mediciones, los sensores fueron calibrados con el fin de asegurar la precisión de los datos obtenidos. Durante el funcionamiento del sistema, estos dispositivos registraron lecturas periódicas, las cuales fueron enviadas por los módulos ESP32 al nodo receptor, donde la información recopilada fue almacenada en archivos con formato CSV.

La compuerta automática se programó para cerrarse cuando el promedio de las lecturas de los sensores 1, 2, 3 y 4 alcanza un 80 %, dando mayor prioridad a los sensores 3 y 4 por su ubicación estratégica. Durante las pruebas se registraron los datos de manera simultánea tanto del caudal como de la humedad bajo condiciones controladas para ambos sistemas.

- **Procesamiento y control de calidad de datos.**

Los archivos generados en formato CSV fueron revisados previamente, con el propósito de identificar y eliminar registros incompletos o valores atípicos. Posteriormente, la información depurada se cargó en herramientas estadísticas como IBM SPSS para su análisis. Se registraron fecha, hora y fuente de cada archivo, lo que permitió asegurar la validez de la información.

### 3.4 Población de estudio y tamaño de muestra.

#### 3.4.1 Población.

Para el desarrollo de la investigación se trabajó con registros de humedad del suelo y los datos correspondientes al volumen de agua aplicado durante el riego, tanto en el sistema manual como en el automatizado. La recopilación de esta información se realizó en un área de estudio perteneciente a la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’.

#### 3.4.2 Muestra.

En esta investigación no se trabajó con una muestra parcial, sino que se consideró la totalidad de datos que fueron registrados durante el período de medición establecido. La muestra está conformada por los valores promedio diarios de caudal y humedad registrados durante un periodo de 20 días de evaluación para cada uno de los dos sistemas de riego, garantizando la representatividad y la validez de los resultados.

### 3.5 Operacionalización de variables.

#### 3.5.1 Variables independientes.

**Tabla 5.** Variables independientes.

Nombre	Descripción	Indicador	Técnica e instrumento.
<b>Tipo de sistema de riego.</b>	Sistema utilizado para suministrar agua al cultivo: manual, donde la intervención humana controla las compuertas; y automático, donde las compuertas son operadas por un sistema de control.	Tipo de sistema de riego: Manual / Automático	Observación directa del funcionamiento del sistema y registro de datos operativos.

#### 3.5.2 Variables dependientes.

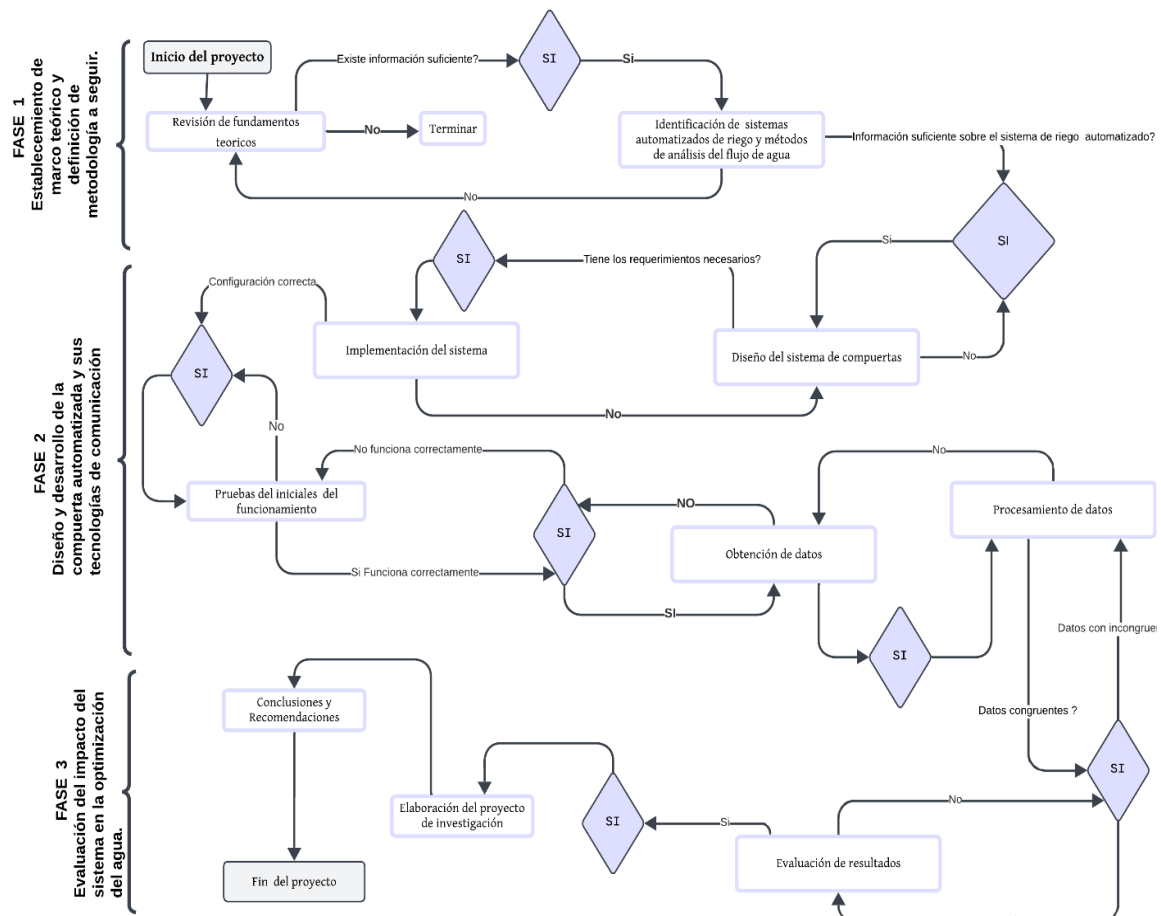
**Tabla 6.** Variables dependientes

Nombre	Descripción	Indicador	Técnica e instrumento.
<b>Humedad del suelo</b>	Cantidad de agua que se encuentra en el suelo agrícola, medida en relación al volumen de tierra del terreno.	Porcentaje de humedad del suelo (%)	Sensores de humedad del suelo instalados en puntos estratégicos.
<b>Cantidad de agua</b>	Volumen total de agua utilizada durante cada ciclo de riego, tanto manual como automatizado.	Litros por ciclo de riego (L).	Caudalímetro y registro automatizado del flujo de agua

### 3.6 Diagrama de fases del sistema automatizado de compuertas para prevenir el sobre riego.

La Figura 8 muestra el diagrama de fases del sistema automatizado desarrollado. En este esquema se resumen los procesos seguidos a lo largo del proyecto, que inician con la revisión

de los fundamentos teóricos y el análisis de los diferentes tipos de sistemas de riego. Posteriormente, se realizaron pruebas iniciales, se recolectaron datos y se evaluaron los resultados alcanzados.



**Figura 8.** Diagrama de fases del diseño de investigación

Para cumplir con los objetivos planteados, el desarrollo del proyecto se organizó en tres fases principales, como se observa en la Figura 8. A continuación, se describe cada una de ellas:

### 3.6.1 Fase 1: Revisión teórica y diagnóstico del sistema de riego.

Durante esta fase se llevó a cabo una revisión teórica relacionada con el funcionamiento de las compuertas automáticas y las diversas tecnologías de control aplicadas al riego, con el fin de recopilar información relevante para el diseño del sistema propuesto.

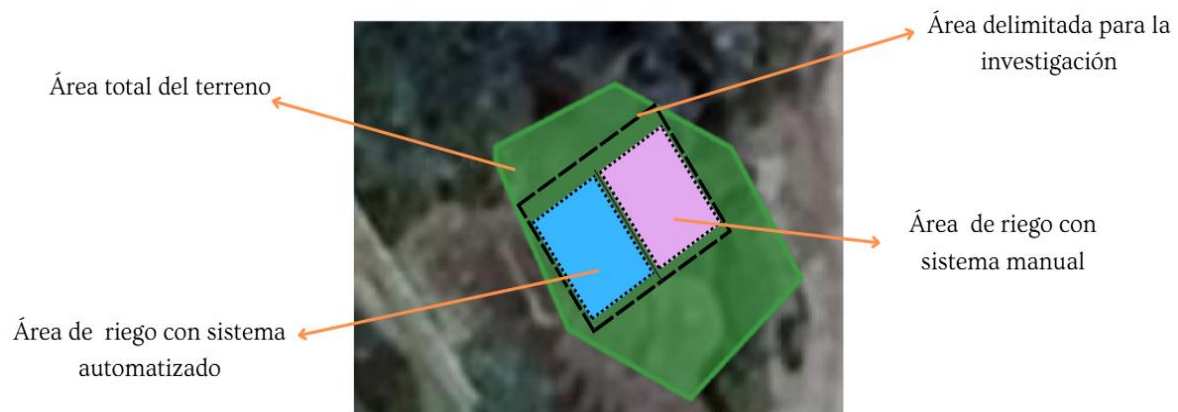
De manera complementaria, se realizó un análisis del entorno en el que se implementaron las compuertas, tomando en cuenta el área de estudio, las características del suelo, las condiciones climáticas y el cultivo predominante, en este caso, la alfalfa. Este análisis permitió identificar las necesidades reales del sistema de riego y definir parámetros iniciales para el diseño.

#### 3.6.1.1 Localización.

El área de estudio corresponde a un terreno agrícola ubicado en la Comunidad ‘María Auxiliadora’, parroquia Yaruquies, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo. La

localización geográfica se determinó mediante cartografía digital, registrándose las coordenadas aproximadas  $-1,6956^{\circ}$  de latitud y  $-78,6520^{\circ}$  de longitud (S  $1^{\circ}41'44,491''$  y W  $78^{\circ}39'7,5297$ ). El predio presenta un área total de  $100\text{ m}^2$  y un perímetro de  $37,47\text{ m}$ , valores obtenidos a partir del polígono trazado sobre la imagen satelital.

Se definió el área específica del terreno destinada a la instalación y evaluación tanto del sistema de riego automático como del riego manual. El área delimitada presentó dimensiones aproximadas de  $6,5\text{ m}$  de largo por  $7,34\text{ m}$  de ancho, lo que equivale a  $47,71\text{ m}^2$ . Esta delimitación permitió establecer de forma clara el espacio experimental para la ubicación de los sensores y la realización de las pruebas comparativas.



**Figura 9.** Delimitación del área total del terreno y distribución del área de estudio para el riego automatizado y el riego manual.

En la figura 9 se observa la distribución del terreno empleado en la investigación. Se distinguen el área total (representada en color verde) y la sección destinada para el estudio (rectángulo punteado). En esta área se establecieron dos parcelas de igual tamaño para la implementación y comparación del riego automatizado y del riego manual, bajo las mismas condiciones ambientales y de cultivo.

### 3.6.1.2 Caracterización del área de estudio

La descripción del sitio experimental permitió identificar los factores que influyen en el diseño y funcionamiento del sistema de riego. La tabla 7 incluye detalles sobre el tipo de suelo, el clima y la fuente de agua; información utilizada para planificar el diseño de compuertas y la programación del control de riego.

**Tabla 7.** Características generales del área de estudio [36], [37].

Ítem	Descripción	Observaciones para el diseño
<b>Tipo de suelo</b>	El tipo de suelo predominante en la comunidad corresponde a la clasificación Entisol. Carece de horizontes desarrollados y presenta baja fertilidad cuando la humedad	El suelo franco-arenoso presenta alta infiltración y baja retención de humedad, requiere un monitoreo frecuente para evitar

	no es adecuada. En el área de estudio el suelo es franco-arenoso.	el déficit y garantizar la eficiencia del sistema de riego.
<b>Clima</b>	El clima de la zona corresponde al tipo Ecuatorial Mesotérmico Semihúmedo.	Los cambios en la radiación solar y periodos secos aumentan la pérdida de humedad del suelo, lo que afecta la frecuencia de apertura de las compuertas.
<b>Fuente de agua de riego</b>	El sistema de riego Chambo-Guano pertenece a la Unidad Hidrográfica del río Pastaza. Consta de un canal principal de 50,728 km de longitud, dividido en 7 zonas, abasteciendo a 73 comunidades mediante 136 tomas. El caudal disponible es de $5.96 \frac{m^3}{s}$ .	Conocer la estabilidad del suministro permite asegurar el funcionamiento continuo del sistema.

### 3.6.1.3 Situación actual del terreno

El abastecimiento de agua proviene del canal de riego Chambo-Guano y se distribuye mediante canales secundarios. Dentro del predio se identificaron cultivos de cebolla colorada y alfalfa.

Para estimar el caudal disponible se utilizó el método de observación directa, midiendo el volumen captado en un tiempo determinado [31]. En la Tabla 8 se presentan las generalidades registradas durante la visita técnica.

**Tabla 8.** Generalidades del sitio experimental

<b>Cultivo</b>	<b>Leguminosas</b>
<b>Tipo de riego</b>	Inundación por surcos
<b>Frecuencia de riego</b>	3 días por semana
<b>Tiempo de riego</b>	2 horas por la mañana
<b>Tipo de suelo</b>	Franco-arenoso
<b>velocidad de infiltración del suelo</b>	25mm/día
<b>Promedio climático</b>	25 °C (máx.), 15 °C (prom.), 4 °C (mín.),
<b>Topografía del suelo</b>	Inclinación moderada
<b>Caudal</b>	0,5072 L/s

El caudal se halla mediante la siguiente ecuación 1:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} [31]$$

Con esta caracterización se definieron las condiciones agrícolas de la parcela, permitiendo comprender el comportamiento hídrico del suelo y su relación con la programación del riego.

#### 3.6.1.4 Características del cultivo.

El cultivo analizado fue la alfalfa morada (*Medicago sativa*), utilizada como forraje debido a su valioso valor nutricional. En la tabla 9 se presenta un resumen de sus características principales.

**Tabla 9.** Características generales de la planta de alfalfa. [33]

Alfalfa morada	
	
<b>Características</b>	
<b>Color de Flor</b>	Púrpura, violeta o morada
<b>Hábito de crecimiento</b>	Erecto
<b>Altura de cosecha</b>	45 a 80 cm
<b>Días de floración</b>	28 a 45 días
<b>Cortes por año</b>	6 a 10
<b>Vida útil</b>	3 a 7 años

#### 3.6.1.5 Condiciones climáticas y de suelo.

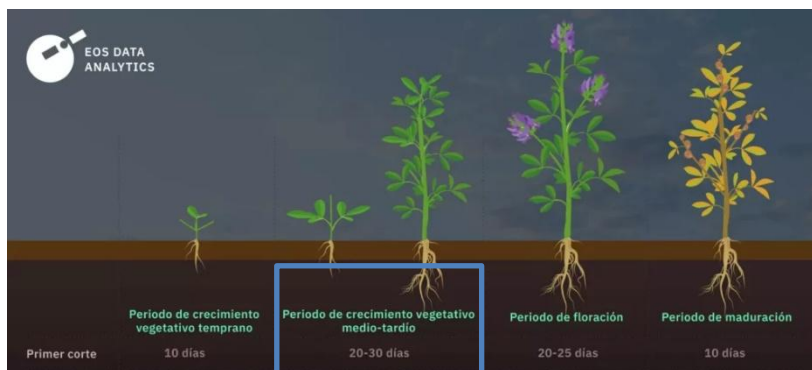
Se debe considerar los siguientes factores que son determinantes para el desarrollo de la planta.

- **Drenaje:** Medio-Alto. Un drenaje eficiente evita el encharcamiento y la pudrición radicular [38].
- **Precipitación anual:** Rango entre 600 y 900 mm. Este aporte hídrico contribuye a la humedad base del suelo [38].
- **Altitud:** Entre 1000-3000 m.s.n.m. La altitud influye directamente en la temperatura ambiente, el ritmo de crecimiento y la productividad general de la planta [38].
- **Fotoperíodo:** El cultivo recibe luz diaria por más de 12 horas. Favorece el crecimiento vegetativo y el rebrote después de los cortes [38].
- **Profundidad del suelo:** Mayor a 1 m. Esto es fundamental debido al sistema radicular profundo de la alfalfa, que requiere suelos profundos para desarrollar adecuadamente sus raíces. [38].

### 3.6.1.6 Ciclo del cultivo.

La figura 10 muestra las distintas etapas fenológicas del cultivo de alfalfa, destacando las diferencias entre el primer corte y los posteriores. En el primer corte, las fases de crecimiento vegetativo (temprano y tardío), floración y maduración duran aproximadamente 10, 20-30, 20-25 y 10 días, respectivamente.

En los siguientes cortes, se presenta un desarrollo fisiológico más corto debido al crecimiento de las raíces; esto es más evidente durante el período de floración. Conocer esta dinámica facilita la planificación del riego y la comprensión de la duración de cada fase.



**Figura 10:**Etapas fenológicas de la alfalfa [47].

Estos valores muestran que el primer ciclo productivo es más largo, mientras que los posteriores se acortan debido al desarrollo del sistema radicular.

### 3.6.1.7 Recomendación de la humedad para alfalfa morada.

El manejo adecuado de la humedad del suelo según [38] y [39] es determinante para el desarrollo de la alfalfa. Los rangos de humedad varían según la etapa fenológica y la textura del suelo. En la tabla 10 se presenta un resumen de los porcentajes de humedad sugeridos para suelos franco-arenosos, los cuales son ampliamente utilizados en la programación agrícola.

**Tabla 10.**Humedad ideal del suelo según la etapa fenológica del cultivo de alfalfa [38], [39].

<b>Etapas fenológicas</b>	<b>Humedad ideal (%)</b>
<b>Fase inicial (crecimiento vegetativo)</b>	60-75%
<b>Fase de desarrollo (desarrollo vegetativo)</b>	70-80%
<b>Fase Floración</b>	75-85%
<b>Fase final (Maduración)</b>	50-60%

Los rangos de humedad presentados están respaldados por literatura de referencia internacional, especialmente por documentos técnicos de la FAO y autores especializados en programación y manejo de riego. Esta información permite ajustar la frecuencia y la lámina de riego según la etapa fenológica evitando tanto el déficit como el exceso de humedad. En suelos franco-arenosos, estas recomendaciones resultan particularmente útiles debido a su capacidad de infiltración media-alta, que favorece la disponibilidad de agua sin provocar encharcamientos.



### 3.6.1.8 Diagnóstico del sistema de riego actual.

En las parcelas agrícolas de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’, el riego se realiza mediante compuertas manuales y, en algunos casos, mediante tubería que los agricultores utilizan para redirigir el caudal hacia sectores específicos del terreno. Todo el proceso depende del criterio del agricultor, quien determina el tiempo de apertura de la compuerta observando el comportamiento del agua en los surcos. Este manejo no cuenta con mediciones objetivas de humedad ni con ningún tipo de control automatizado, lo que genera variaciones en la cantidad de agua aplicada. Además, las compuertas suelen mantenerse abiertas por más tiempo del necesario, ocasionando desperdicio del recurso y falta de uniformidad en la distribución.

Para complementar esta información, se realizó una entrevista al presidente de la Junta de Agua (ver Anexo A), quien confirmó que el riego se ejecuta solo de forma manual y que los problemas más frecuentes son el desperdicio de agua, falta de uniformidad dentro de las parcelas y la ausencia de herramientas que permitan determinar el momento adecuado para regar. Estos aspectos se evidencian en las figuras 11 y 12 que fueron obtenidas durante una visita de campo, donde se observa el estado actual de las compuertas, los tubos utilizados por algunos agricultores y en el canal principal de distribución.



a)



b)

**Figura 11.** Métodos de riego tradicional observados en las parcelas.

a) Compuerta manual; b) Tramo de tubería.



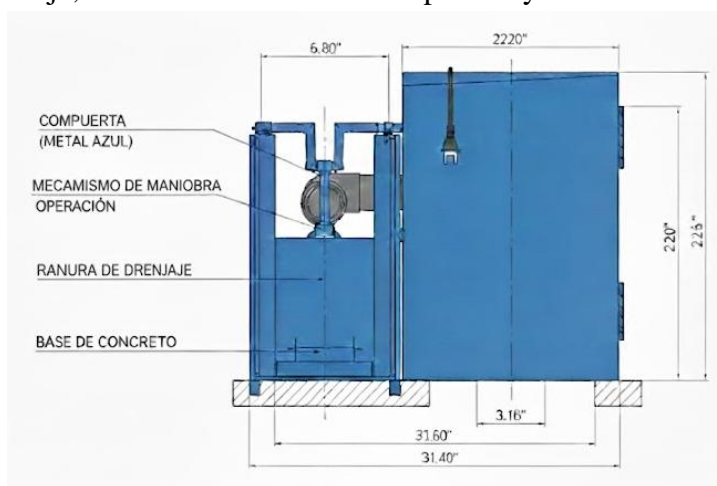
**Figura 12.** Canal principal de distribución de agua en la Junta ‘María Auxiliadora’.

### 3.6.2 Fase 2: Diseño y desarrollo de la compuerta automatizada y tecnologías de control empleadas.

Para describir el proceso de diseño e implementación, esta fase se divide en las siguientes secciones:

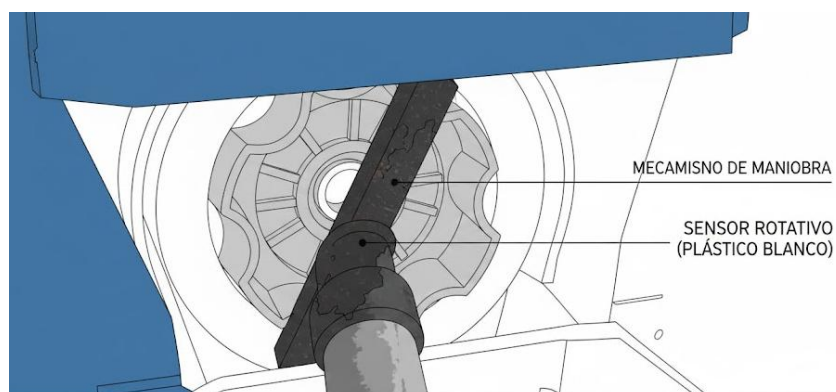
#### 3.6.2.1 Selección y diseño de la compuerta automatizada.

La compuerta seleccionada para el sistema corresponde al tipo deslizante vertical, debido a que su mecanismo de apertura lineal facilita la automatización y requiere un torque reducido para su desplazamiento. Según las características técnicas resumidas en la tabla 5, este tipo de compuertas resulta adecuado para las condiciones de caudal y presión presentes en las parcelas de la Junta de Agua 'María Auxiliadora'. Las dimensiones definidas para el diseño son de 20 cm de largo x 37 cm de ancho, tanto para la compuerta automática como para la manual. En la figura 13 se muestra el esquema de vista frontal de la compuerta automática. En la parte superior se aprecia la estructura de soporte principal, eje de transmisión y mecanismo de izaje, con el fin de controlar la apertura y cierre de la compuerta.



**Figura 13.** Vista Frontal compuerta de la compuerta y su mecanismo de accionamiento.





En la figura 14 se muestra cómo se acopla el motor con la manivela. El eje principal está formado por una barra de 20 cm, sobre la cual se encuentra soldada la manivela que actúa como brazo de transmisión. Al girar el actuador, mueve la manivela, lo que a su vez pone en funcionamiento el mecanismo de apertura de la compuerta.



**Figura 14.** Esquema de la interfaz de control (Manivela y Lectura de Posición).

Finalmente, en la tabla 11 se presentan fotografías de las compuertas fabricadas, desde la vista frontal, junto con la adaptación del motor en la versión automatizada. La tabla permite comparar visualmente la diferencia entre la compuerta manual y la automática, facilitando el proceso de implementación.

**Tabla 11.** Fotografías de las compuertas construidas.

Vista	Compuerta automática	Compuerta manual
Frontal	 <p><b>Figura 15.</b> Vista Frontal</p>	 <p><b>Figura 16.</b> Vista Frontal manual</p>
Adaptación al motor	 <p><b>Figura 17.</b> Adaptación al motor</p>	 <p><b>Figura 18.</b> Adaptación del motor (no).</p>

### 3.6.2.2 Selección del motor.

Se establecieron varios criterios técnicos para la selección del actuador, considerando que el motor debe superar la presión hidrostática, la fricción del mecanismo y contar con suficiente torque para accionar la compuerta. Por ello, se priorizaron equipos que funcionen con 12 V, con bajo consumo de corriente e integren un encoder para determinar la posición y el movimiento de la compuerta.

A continuación, en la tabla 12 se presenta la comparación entre 3 tipos de motores:

**Tabla 12.** Comparativa de diferentes modelos de motores [40].

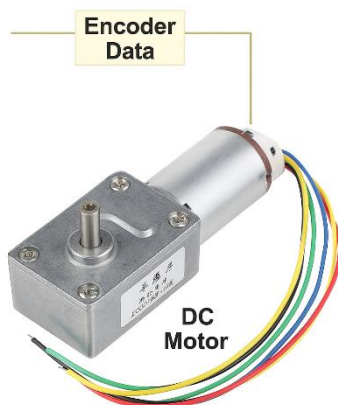
Parámetros técnicos	Motor reductor DC 25D-130 (35RPM)	Motor DC 775 (sin reductor)	Motor reductor DC 37GB-520(100 RPM)
Tipo de motor	Motor DC con caja reductora	Motor DC de alta velocidad	Motor DC con caja reductora Metálica
Torque	Alto (9.5 kg.cm)	Bajo (Necesita reducción)	Medio (5 kg.cm)
Voltaje de Alimentación	Motor:12 V DC Encoder:3.3 -5 V DC	Motor:12 V DC Encoder: No	Motor:12 V DC Encoder: No

<b>Consumo de corriente nominal</b>	1 A	4 A	1.1 A
<b>Parámetros técnicos</b>	Motor reductor DC 25D-130 (35RPM)	Motor DC 775 (sin reductor)	Motor reductor DC 37GB-520(100 RPM)
<b>Velocidad normal de salida</b>	35 RPM	6000 RPM	100 RPM
<b>Encoder incorporado</b>	Si, tipo Hall de doble cuadratura	No	No
<b>Aplicaciones típicas</b>	Control de posición, compuertas, robótica	Herramientas eléctricas, ventiladores y juguetes	Proyectos de automatización y robótica
<b>Nivel de ruido</b>	Bajo	Bajo	Bajo
<b>Precio</b>	\$ 52,00	\$3,90	\$ 31,94

Del análisis presentado en la tabla 12 se determinó que el motor reductor DC 25D-130 (35 RPM) es el que mejor se ajusta a las necesidades del sistema. El motor 775 se descartó porque, aunque ofrece buena velocidad, no tiene el torque suficiente para mover la compuerta de manera directa. En cambio, el 25D-130 sí aporta la fuerza requerida gracias a su caja reductora y, además, incorpora un encoder, que es clave para obtener la posición real de la compuerta.

- **Motor 25d-130 de 35 rpm con caja reductora.**

El Motor 25D-130 de 35 RPM, cuyas especificaciones técnicas se detallan en la tabla 12, se destaca por su diseño compacto y robusto, a pesar de su tamaño reducido. Este tipo de motor es ideal para el proyecto, ya que combina un motor DC con una caja reductora, lo que permite aumentar la fuerza de salida de manera eficiente. La Figura 17 muestra el motor junto con sus componentes principales.

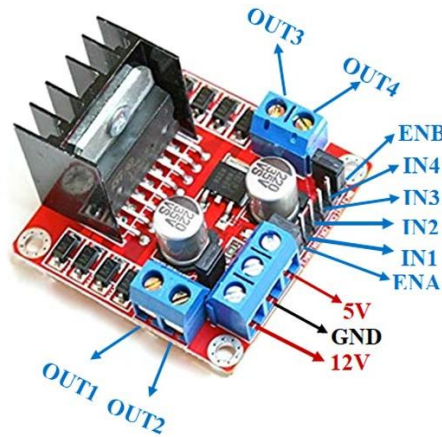


**Figura 19:** Motor 25D-130 con caja reductora (35 RPM) [40].

### 3.6.2.3 Etapa de potencia y control de giro.

- **Driver L298N.**

Es una unidad de control que trabaja con señales de 3.3 V a 5 V y entrega muy poca corriente, por lo que no puede alimentar directamente el motor de la compuerta. Para cubrir esa diferencia entre la lógica de control y la potencia que requiere el actuador, se utilizó el módulo L298N como etapa de potencia, como se observa en la figura 20.



**Figura 20.** Driver L298N y sus pines [46].

El control del actuador se realiza mediante un driver de arquitectura Puente H dual. Este fue seleccionado por su compatibilidad con motores DC. Gracias a este driver, el motor recibe la alimentación necesaria y el mismo puede invertir el giro según se requiera.

- **Alimentación del motor:** El motor recibe alimentación a través del driver, que interpreta las señales digitales del microcontrolador y conmuta la fuente externa de 12 V hacia el motor. Esto protege los pines de salida y garantiza un funcionamiento seguro.
- **Inversión de giro:** permite cambiar la polaridad de los terminales del motor; el sistema puede abrir y cerrar la compuerta con precisión, adaptándose al funcionamiento del sistema de manera eficiente.

En la tabla 13 se detallan las especificaciones técnicas del módulo y se verifica su compatibilidad con el motor 25D-130 utilizado en el prototipo.

**Tabla 13.** Especificaciones técnicas del módulo L298N [41].

Parámetro	Especificación	Validación de Diseño
Arquitectura	Doble puente H	Permite inversión de giro.
Voltaje de operación (Vs)	Hasta 35 V DC	Compatible con la fuente de 12 V.
Corriente máxima (Pico)	2 A por canal	Soporta el consumo del motor.
Señal de control (Vss)	5V	Compatible con el microcontrolador.

### 3.6.2.4 Unidad central de proceso.

- **Selección de microcontrolador.**

Se examinaron las placas más comunes en el desarrollo de proyectos de automatización agrícola e IoT para determinar qué microcontrolador utilizar en el sistema. La comparación se centró en ciertos aspectos técnicos esenciales como la resolución de los puertos analógicos (ADC), la velocidad de procesamiento, el consumo energético y la capacidad de memoria. Sin embargo, el aspecto más importante fue la capacidad de conectividad inalámbrica nativa, que es esencial para que los datos se transmitan desde la parcela.

En la tabla 14 se resume la comparación realizada entre los modelos más accesibles y utilizados en este tipo de sistemas.

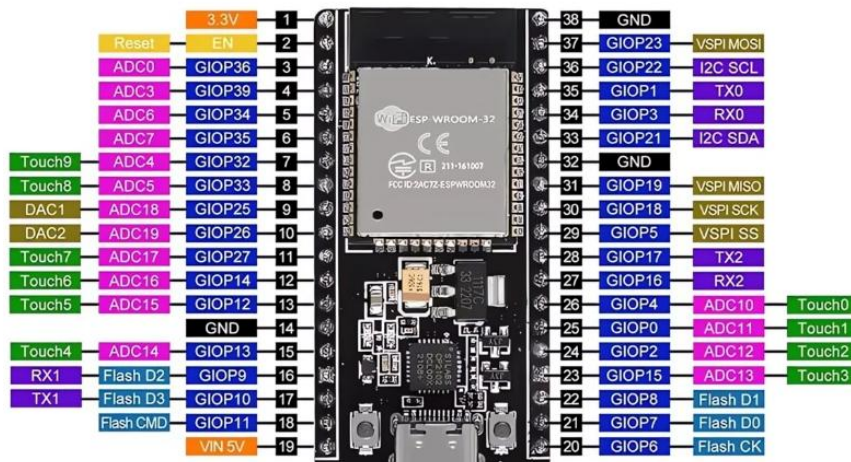
**Tabla 14.** Comparativa técnica de microcontroladores [42].

Parámetros	ESP32-WROOM-32	Arduino Nano	Raspberry Pi Pico (RP2040)	STM32 Blue Pill (STM32F103C8T6)
Arquitectura	Tensilica Xtensa LX6	AVR ATmega328P	ARM Cortex-M0 dual core	ARM Cortex-M3
Frecuencia de reloj	240 MHz	16 MHz	133 MHz	72 MHz
Memoria Flash	4MB (Flash Externa)	32 KB	2MB	64/128 KB
Memoria RAM	520 KB	2 KB	264 KB	20 KB
Voltaje de Operación	3.3V.	5 V.	3.3 V.	3.3 V.
Entradas Analógicas ADC	18 canales (12 bits).	8 canales (10 bits).	3 canales (12 bits).	10 canales (12 bits).
Conectividad inalámbrica	Wi-fi + Bluetooth (Nativa)	No posee	No posee	No posee
Consumo energético aproximado	80 mA (Promedio con Wi-Fi).	20 mA.	20-40 mA.	30-60 mA.
Entorno de programación	Arduino IDE, ESP.IDF, MicroPython.	Arduino IDE	Thonny, Arduino IDE, MicroPython	STM32CubeIDE, Arduino IDE
Costo	\$11,50	\$5.00	\$7.00	\$9.00
Ventaja principal	Ideal para IoT y automatización remota, alta potencia, WI-FI/Bluetooth	Simplicidad y compatibilidad con sensores básicos	Eficiencia y doble núcleo, ideal para proyectos con procesamiento paralelo	Procesador rápido y estable, excelente para control en tiempo real



- **Módulo ESP32-WROOM-32**

De acuerdo a los criterios de la tabla 14, se seleccionó el módulo ESP32-WROOM 32. La elección se justifica por su arquitectura SoC (System on Chip), que ofrece alto rendimiento a un costo accesible para la instalación. La principal ventaja técnica frente a las otras opciones es su conectividad nativa (Wi-Fi y Bluetooth). Además, el hecho de contar con doble núcleo es clave para la estabilidad del sistema, permite mantener un núcleo exclusivamente para mantener la conexión y transmisión de datos, mientras el otro se encarga de leer sensores y mover el motor en tiempo real. En la figura 21 se observa el modelo de la placa y los pines.



**Figura 21.** ESP32-WROOM 32 [45].

### 3.6.2.5 Selección de sensores.

- **Selección de los sensores de humedad.**

A partir del análisis previo (ver tabla 3), se optó por no usar sensores de tipo resistivo, principalmente porque presentan una corta durabilidad en el campo y tienden a descomponerse rápidamente. En consecuencia, el criterio de selección se orientó exclusivamente a sensores de tecnología capacitiva, que ofrecen mayor estabilidad frente a la corrosión. Para elegir el método más idóneo, se evaluaron tres alternativas comerciales considerando sus parámetros técnicos esenciales: el costo, el voltaje de operación y el tipo de señal de salida.

**Tabla 15:**Tabla comparativa de sensores de humedad [31].

Parámetros	Sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2	Sensor FS200	Sensor SHT1x
Principio de medición	Capacitivo (PBC)	Polímero Capacitivo	Capacitivo (Chip)
Voltaje de alimentación	3.3 V-5 V DC	3.3V-5V DC	2.4 V-5V DC

<b>Consumo de corriente</b>	~5mA	~3mA	~3mA
<b>Tipo de salida</b>	Analógica(0-5V)	Digital (I2C/Serial)	Digital (Propia/I2C)
<b>Tiempo de respuesta</b>	Rápida (< 2s)	Lenta (~8 s)	Lenta (~8 s)
<b>Compatibilidad</b>	Directa (ESP32 ADC)	Requiere librería	Requiere librería
<b>Costo aproximado</b>	\$ 3,5	\$15	\$20

Del análisis de la tabla 15 se concluye que, si bien los modelos FS200 y SHT1X ofrecen características de sensores industriales, su costo elevado dificulta la escalabilidad del sistema si se quisiera replicar en múltiples puntos de la parcela. Por consiguiente, se seleccionó el sensor capacitivo v1.2, pues presenta el mejor equilibrio costo-beneficio para el prototipo propuesto.

- **Sensor de humedad del suelo capacitivo V 1.2**

Este dispositivo fue elegido por las ventajas operativas detalladas previamente en la tabla comparativa. Su principio de funcionamiento basado en la capacitancia, sumado al uso de materiales anticorrosivos en su PBC, permite obtener mediciones estables a lo largo del tiempo, minimizando el ruido de la señal. En la figura 22 se presenta el componente físico utilizado para la implementación.



**Figura 22.** Sensor del suelo capacitivo V1.2 [45].

- **Selección de los sensores de caudal.**

Considerando los métodos de medición expuestos en la Tabla 2, se determinó que la tecnología de efecto Hall es la más idónea para el sistema. Su principal ventaja es la entrega de una señal digital de pulsos, lo que facilita su lectura mediante el microcontrolador y ofrece una mayor inmunidad al ruido eléctrico en comparación con los sensores analógicos. Para definir el modelo a utilizar, en la tabla 16 se compararon tres sensores comerciales evaluando su voltaje, capacidad de flujo y el diámetro de conexión de la tubería.



**Tabla 16.** Comparativa sensores de caudal Efecto Hall.

Características técnicas	YF-DN50	YF-S201	YF-S401
Voltaje de operación	3.3 -18 V DC	5-18 V DC	5-18 V DC
Consumo de corriente	15 mA máx.	15 mA (a 5 V).	15 mA (a 5 V).
Salida	Onda cuadrada.	Onda cuadrada.	Onda cuadrada.
Rango de Flujo.	10-200 L/min	1.3 L/min	1-60 L/min
Volumen promedio por pulso.	83.3 mL	2.25 mL	1.5 mL
Pulsos por litro	12	450	666

Tras el análisis comparativo, se seleccionó el modelo YF-DN50. Esta decisión se fundamenta en el caudal operativo de la parcela, el cual es aproximadamente 30 L/min (0.50 L/s). Se descartaron opciones como el YF-S201 debido a que su rango máximo de medición es justamente 30 L/min; operar un sensor al límite de su capacidad causaría saturación en la lectura y errores de medición. El modelo YF-DN50 con un rango de hasta 200 L/min y un diámetro de 2 pulgadas trabaja adecuadamente y evita obstrucciones en el flujo de agua.

- **YF-DN50 2.**

Este dispositivo, detallado en la tabla 16, funciona mediante un rotor interno con imanes. Al paso del agua, el rotor gira generando una señal de salida de onda cuadrada. Esta característica es importante en el diseño electrónico: permite conectar el sensor directamente a un pin de interrupción del módulo ESP32-WROOM32. De esta manera, el sistema calcula el caudal instantáneo y el volumen total consumido simplemente contando los pulsos generados, cumpliendo con el objetivo de analizar el flujo de agua en tiempo real.

En la figura 23 se presenta el sensor seleccionado:

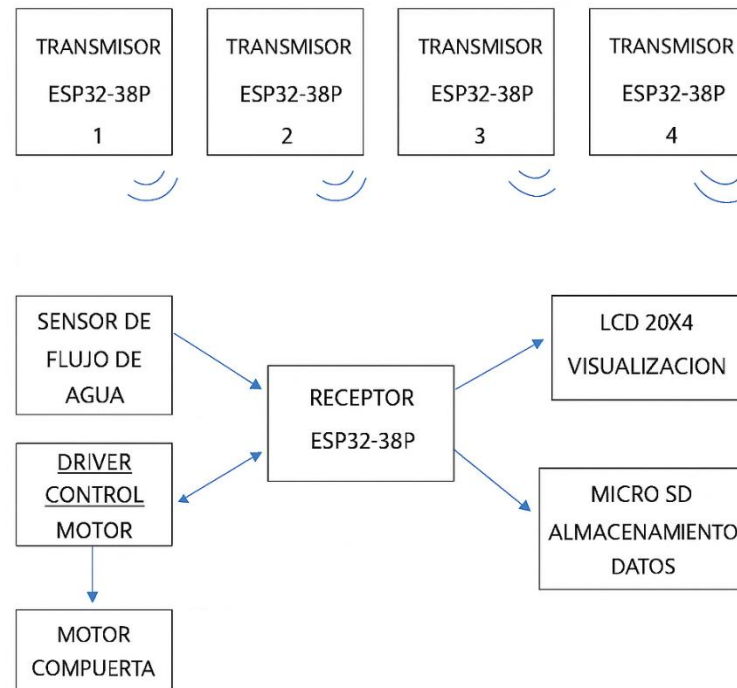


**Figura 23:**Sensor DN 50 2" [42].

### 3.6.2.6 Arquitectura general del sistema automatizado.

La arquitectura del sistema se organizó en módulos independientes para facilitar su instalación y el mantenimiento en campo. Se implementó una topología de red estrella, en la

que cada nodo transmisor envía los datos directamente al nodo receptor central utilizando el protocolo ESP-NOW. Esta elección responde a la capacidad del protocolo para ofrecer una comunicación rápida y estable sin requerir una red Wi-Fi externa, un aspecto importante en la zona de instalación. La figura 24 muestra el esquema general del sistema, mostrando la interacción de los distintos módulos encargados del monitoreo de la humedad y del control de agua.



**Figura 24.** Esquema general de la arquitectura del sistema automatizado

A continuación, se describen los elementos principales y el rol que cumple cada uno dentro de la arquitectura propuesta:

- **Nodo transmisor (Monitor de Parcela)**

El nodo transmisor funciona como la unidad que se encarga directamente de las mediciones en campo. Está compuesto por un módulo ESP32-WROOM-32 y un sensor de humedad capacitivo v1.2; estos dispositivos permiten obtener lecturas continuas del estado del suelo. La función primordial es recibir un valor analógico, convertirlo en un dato digital y enviarlo al nodo receptor. Para esto se utiliza el protocolo ESP-NOW, que permite una comunicación rápida a través de sus direcciones MAC.

- **Nodo receptor (Unidad principal de control)**

El nodo receptor actúa como unidad central del sistema. Aquí se reciben los datos enviados por los transmisores y se ejecutan las decisiones de control de riego. Entre sus funciones se destacan las más importantes:

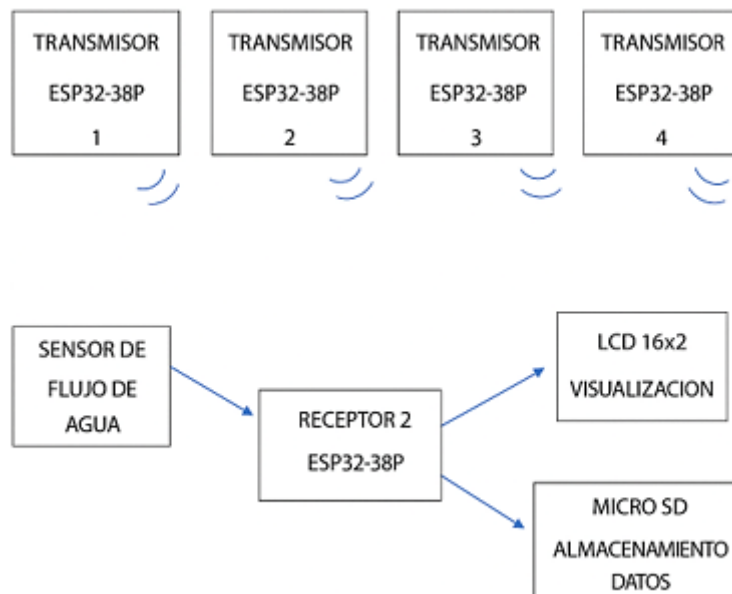
- **Recepción y gestión de datos:** Reciben los paquetes transmitidos por ESP-NOW y ordenan las mediciones de humedad que provienen de cada nodo.

- **Control del actuador:** Se encarga de ejecutar la lógica para abrir y cerrar la compuerta. La señal generada por este control es enviada al driver L298N, que proporciona la corriente necesaria para que el motor realice el movimiento de manera eficiente.
- **Lectura de caudal:** Procesa la señal digital del sensor de flujo DN-50 para calcular tanto el caudal instantáneo como el caudal total de agua durante el riego.
- **Monitoreo y registro:**
  - Presenta en una pantalla LCD 20x4 las variables más importantes (humedad y caudal) para el monitoreo local en tiempo real.
  - Registra los datos en una memoria Micro SD mediante una interfaz SPI, lo que permite mantener un respaldo local incluso si se producen fallas en la comunicación.

### 3.6.2.7 Arquitectura del sistema manual.

Para evaluar el desempeño del sistema automatizado propuesto, se implementó una arquitectura paralela en una parcela con riego tradicional. Este subsistema fue configurado únicamente como un módulo de monitoreo pasivo, es decir, únicamente se limita a registrar, mostrar y almacenar las mediciones obtenidas en el campo. No interviene en la apertura ni el cierre de la compuerta; estas acciones permanecen bajo el control del agricultor.

El propósito es generar una base de datos confiable que permita comparar las mediciones del riego convencional y del sistema automatizado. En la figura 25 se muestra el esquema general de los bloques que conforman el sistema de riego tradicional.



**Figura 25:**Arquitectura compuerta manual

A continuación, se describen los elementos principales y sus funciones dentro de esta arquitectura:

- **Nodo transmisor (Monitor de la parcela)**

Este nodo funciona como el punto de toma de datos en el terreno. Está compuesto por un módulo ESP32-WROOM-32, encargado de leer los valores de la humedad del suelo.

Su función es digitalizar las mediciones y enviarlas de forma inalámbrica al receptor 2 mediante el protocolo ESP-NOW. Esta comunicación sin cableado permite ubicar los nodos en distintos puntos de la parcela, permitiendo reflejar de mejor manera la variabilidad del riego manual.

- **Nodo Receptor 2**

Este nodo capta toda la información del sistema manual. A diferencia del receptor principal, no realiza acciones de control sobre actuadores, únicamente registra y presenta los datos que han sido recolectados. Sus funciones son:

- **Adquisición de datos:** Recibe los paquetes de datos enviados por los transmisores a través de ESP-NOW.
- **Lectura de caudal:** Lee la señal del sensor DN-50 2", instalado en la entrada de la compuerta manual, para calcular el caudal instantáneo y el total según la operación del agricultor.
- **Visualización:** Muestra en una pantalla LCD 16x2 el caudal y las mediciones de humedad en tiempo real.
- **Almacenamiento:** Registra los datos en una tarjeta Micro SD mediante archivos CSV.

### 3.6.2.8 Diseño electrónico del receptor principal.

El bloque central del sistema automatizado de compuertas es el receptor principal. Su función es recopilar toda la información proveniente del campo, procesar la lógica de control necesaria y llevar a cabo las acciones de apertura y cierre. El sistema tiene como componente principal el microcontrolador ESP32-WROOM32, que se encarga de coordinar la comunicación y el procesamiento de datos.

En la tabla 17 se presenta la asignación de pines GPIO del ESP32 de acuerdo a cada bloque funcional.

**Tabla 17.** Bloques que conforman el diseño electrónico del receptor principal

Bloques	Pines conectados ESP32	Descripción
<b>Control del motor (Driver L298N)</b>	ENA: GPIO 26 (PWM) IN1: GPIO 27 IN2: GPIO14	El L298N actúa como etapa de potencia. ENA recibe la señal PWM para controlar la velocidad del motor, mientras IN1 e In2 definen el sentido de giro para la apertura y cierre de la compuerta.
<b>Sensor de flujo DN-50</b>	GPIO13	El sensor envía pulsos digitales proporcionales al caudal.

<b>Encoder</b>	Canal A (GPIO 2) Canal B (GPIO 4)	Permite conocer la posición relativa del motor y verificar que la compuerta ejecuta bien el movimiento solicitado.
<b>Finales de carrera</b>	FC_ABIERTO (GPIO 32) FC_CERRADO (GPIO 33)	Señalan los límites mecánicos de la compuerta. Para evitar activaciones erróneas se implementaron resistencias pull-down.
<b>Pulsadores de control manual</b>	BTN1: GPIO 35 BTN2: GPIO 34	Funcionan para el control local. Su lectura también usa configuración pull-down.
<b>Visualización (LCD 20X4)</b>	SDA: GPIO21 SCL: GPIO22	Se emplea el protocolo I2C para mostrar los valores de humedad y caudal.
<b>Almacenamiento</b>	CS: GPIO5 SCK: GPIO18 MOSI: GPIO23 MISO: GPIO19	La tarjeta registra los datos en formato CSV mediante comunicación SPI.

El circuito de control es el encargado de recibir y gestionar todas las señales del sistema. Esto incluye tanto las señales analógicas (humedad) como las digitales que provienen del sensor del caudal y del encoder. Además, permite monitorear el estado del motor a través de los sensores de final de carrera integrados. Para mantener las lecturas estables y evitar posibles errores en la interpretación de las señales enviadas se han implementado resistencias pull-up o pull-down.

En la figura 26 se presenta el diagrama esquemático del receptor elaborado por el software EAGLE 9.6.2, donde se detallan las conexiones de los pines GPIO y la distribución de varios elementos pasivos que aseguran el correcto funcionamiento del microcontrolador.

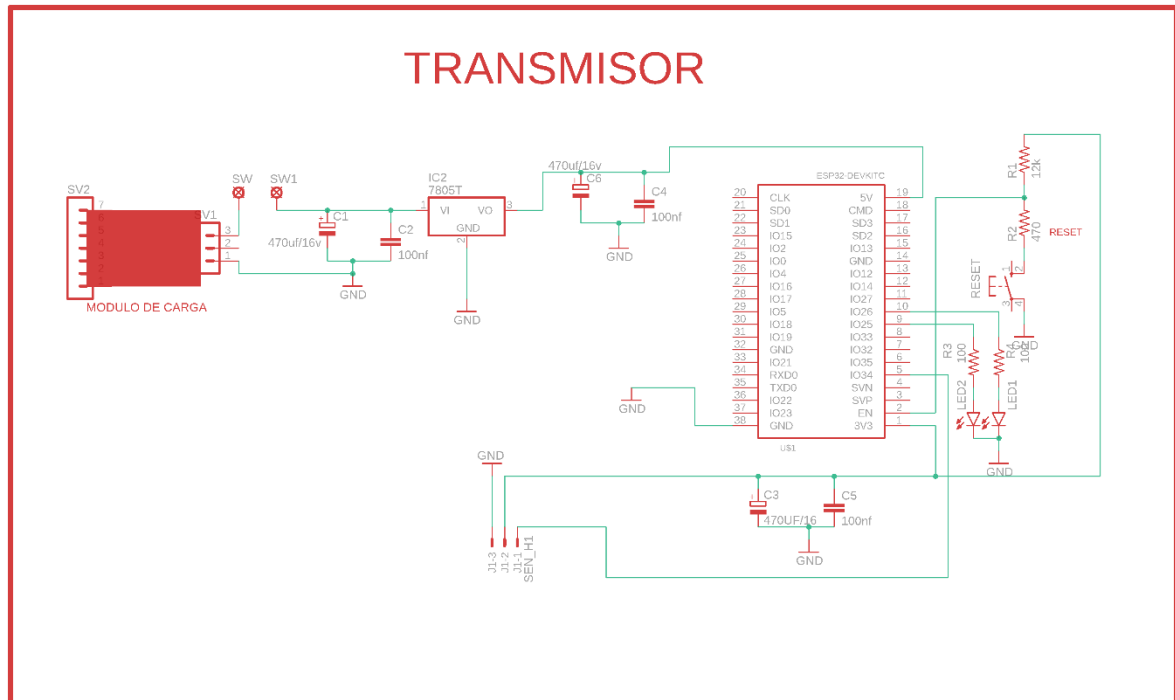


**Tabla 18.** Bloques que conforman el diseño electrónico del nodo transmisor

Bloques	Pines conectados ESP32	Rol Funcional y Especificaciones
<b>Sensor de humedad</b>	Señal analógica: GPIO 34	Recibe la señal analógica del sensor. Este pin es usado por el ADC del ESP32 para convertir la lectura en un valor digital.
<b>Led indicador (actividad)</b>	GPIO 33	Permite verificar visualmente si el nodo está en funcionamiento.
<b>Led indicador (transmisión)</b>	GPIO 32	Se activa cuando el nodo envía datos al receptor mediante ESP-NOW
<b>Alimentación Regulación</b>	Entrada al regulador 7805	El regulador estabiliza el voltaje de entrada para suministrar los 5 V que necesita la placa.
<b>Reset Manual</b>	Pin: En (enable)	El pulsador permite reiniciar el equipo en caso de bloqueo o falla.

El diseño electrónico del transmisor priorizó que la alimentación fuera estable; para ello, se ha utilizado el regulador 7805 y condensadores de filtrado. Estos componentes ayudan a reducir el ruido eléctrico y a garantizar que el ESP32 reciba un voltaje limpio y constante.

Para la lectura del sensor se eligió el GPIO 34 porque es un pin de entrada dedicado al ADC, lo que asegura mediciones más precisas. Los Leds y el pulsador de Reset completan el módulo permitiendo una verificación rápida del estado del nodo directamente en el campo. La figura 27 presenta el diagrama esquemático completo del nodo transmisor.



**Figura 27.** Diagrama esquemático completo del nodo transmisor.

### 3.6.2.10 Diseño electrónico del receptor secundario (Compuerta Manual)

El receptor secundario funciona como un módulo de monitoreo pasivo dentro de la parcela con riego tradicional. Su función es registrar los datos de humedad y llevar el control del volumen de agua utilizado por el agricultor. Este equipo no mueve la compuerta ni ejecuta acciones de control; únicamente se encarga de guardar la información.

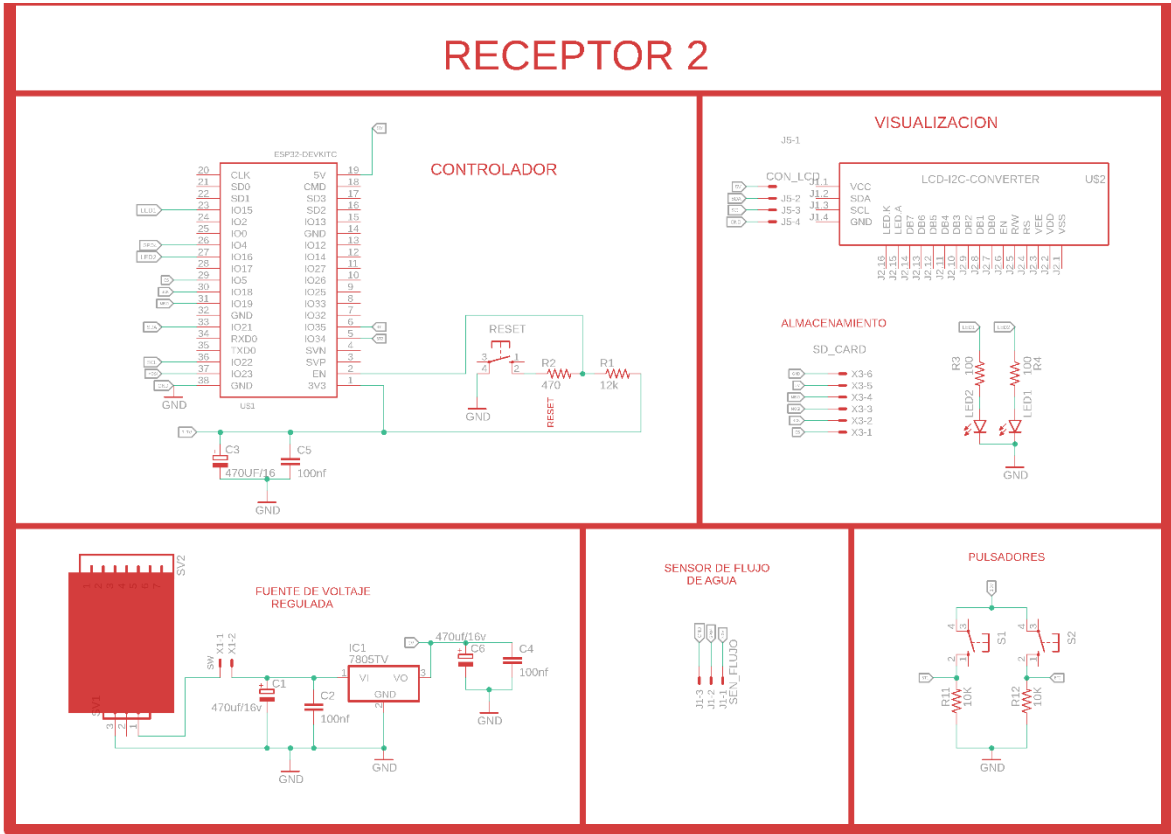
La tabla 19 resume las conexiones más importantes de este sistema:

**Tabla 19.** Bloques que componen el receptor secundario

<b>Bloques</b>	<b>Pines conectados ESP32</b>	<b>Descripción</b>
<b>Sensor de flujo DN-50</b>	GPIO 4	Envía pulsos digitales que el ESP32 usa para calcular el caudal.
<b>Pulsadores de control</b>	BTN1: GPIO 35 BTN2:GPIO34	Sirven para registrar eventos o marcar el inicio o final de riego (configurados en modo pull-down).
<b>Visualización (LCD 216x2)</b>	SDA: GPIO21 SCL: GPIO22	Muestra en tiempo real los valores del caudal y la humedad.
<b>Módulo MicroSD</b>	CS: GPIO5  SCK: GPIO18  MOSI: GPIO23  MISO: GPIO19	Guarda los datos de manera local; la comunicación se realiza por la interfaz SPI.
<b>Fuente reguladora de voltaje</b>	V_IN de la placa	El regulador 7805 reduce el voltaje de entrada a 5 V estables.



El ESP32-WROOM-32 es el encargado de procesar señales del sensor de flujo y de los pulsadores, además de manejar la escritura de la tarjeta SD. Los condensadores C3 y C5 ayudan a mantener el voltaje del microcontrolador para evitar reinicios inesperados. En la figura 28 se observa el diagrama esquemático completo del receptor secundario.



**Figura 28.** Diagrama esquemático completo del receptor secundario.

### 3.6.2.11 Diseño del sistema de comunicación.

Para determinar el sistema de comunicación más adecuado para la red de sensores en la parcela agrícola, se realizó un análisis comparativo de las tecnologías más importantes en IoT. En la tabla 20 se comparan varias características importantes como frecuencia de operación, topología de red y consumo de red con especial énfasis en la baja conectividad que presenta la zona.

**Tabla 20:**Comparativa de diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica [24].

Parámetro	WI-FI	Bluetooth	Lora/Lorawan	Zigbee	ESP-NOW (Espressif)
Frecuencia de Operación	2.4 GHz	2.4 GHz	915 MHz (América)	2.4 GHz	2.4 GHz
Alcance	50-100m	1-10m	2-15km	10-100m	50-100m

<b>Consumo energético</b>	Medio alto	Bajo	Muy Bajo	Bajo	Bajo
<b>Velocidad de transmisión</b>	~ 150 Mbps	~ 1-3 Mbps	~ 0.3-50Mbps	~ 250 Mbps	~ 1 Mbps
<b>Topología soportada</b>	Punto a multipunto	Punto a punto/malla	Estrella/Malla	Malla/estrella	Punto a Punto /multipunto
<b>Ventajas principales</b>	Alta velocidad	Bajo consumo, fácil emparejamiento	Gran alcance, ideal para zonas rurales	Bajo consumo de red robusta.	Comunicación directa sin router.
<b>Limitaciones</b>	Requiere router, alto consumo	Alcance reducido, menos robusto en campo abierto	Baja velocidad, requiere Gateway o infraestructura adicional	Menos alcance requiere coordinador	Solo para módulos ESP32, tamaño limitado de datos.
<b>Adecuado para zonas sin WI-FI router</b>	No	Poco adecuado	Muy adecuado	Útil en redes locales	Muy adecuado
<b>Costo \$</b>	3.5	4	9.5	11.25	2.5

Del análisis comparativo se concluye que las tecnologías como LoRaWAN ofrecen un mayor enlace; sin embargo, su implementación es costosa. Por otro lado, el WI-FI depende de un router, lo que genera un consumo de energía elevado.

Por estas razones se eligió el protocolo ESP-NOW, pues tiene la capacidad de establecer comunicación directa (Peer-to-Peer) entre microcontroladores, lo cual es una ventaja técnica necesaria para la implementación del proyecto; a más de ello, su bajo costo y tiempo de respuesta mínimo lo convierten en una alternativa adecuada para el control en tiempo real.

- **Descripción de la implementación del protocolo ESP-NOW en el sistema.**

ESP.NOW es una tecnología desarrollada por Espressif que opera en la banda de 2.4 GHz. A diferencia del Wi-Fi tradicional, este protocolo actúa directamente sobre la capa de enlace

de datos, usando paquetes especiales que permiten enviar la información mucho más rápida y sin la necesidad de intercambio de direcciones IP. Gracias a esto, el sistema puede comunicarse sin depender de internet, routers o puntos de acceso externos.

- **Configuración de seguridad y direccionamiento (MAC).**

Para asegurar una comunicación estable entre los módulos y evitar interferencias con señales de otros dispositivos cercanos, se implementó un filtrado basado en las direcciones físicas (MAC) de cada equipo. La figura 29 muestra las dos configuraciones básicas que se pueden usar con este protocolo. En la primera, un nodo central recibe información de varios transmisores, lo que resulta esencial para integrar múltiples sensores en un solo punto de control. En el segundo caso, varios nodos pueden enviar datos y comandos a un único receptor, lo que brinda mayor flexibilidad al sistema para intercambio de información.



**Figura 29.** Topologías de Comunicación en ESP-NOW [48].

Para que la comunicación sea estable y los sensores no envíen información a equipos que no forman parte del proyecto, se configuraron los transmisores con una lista de direcciones permitidas. De esta manera, cada módulo puede conectarse con los receptores registrados, cuyas direcciones MAC fueron guardadas previamente, asegurando que los datos permanezcan dentro del sistema tal como fueron configurados.

Las direcciones autorizadas dentro de la red son:

**Receptor principal (sistema automatizado):** (0xD0, 0xEF, 0x76, 0x5D, 0x47, 0x24),

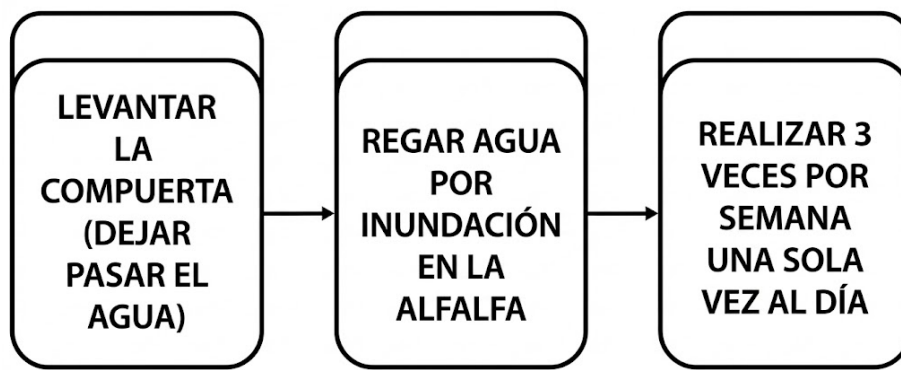
**Receptor secundario (sistema manual):** (0x08, 0xA6, 0xF7, 0xB1, 0xEA, 0x7C).

Trabajar con este direccionamiento garantiza que cada mensaje llegue exactamente a donde debe llegar.

### 3.6.2.12 Descripción de proceso.

- **Descripción del proceso de riego tradicional.**

El riego manual que realiza el agricultor consiste en levantar la compuerta metálica y permitir el paso de agua hasta que considere que el cultivo ya recibió lo necesario. Este proceso se lleva a cabo tres veces por semana. Generalmente este dura alrededor de 1 hora con 20 minutos y se lo realiza una sola vez al día, entre las 5:00 am y las 6:20 am.

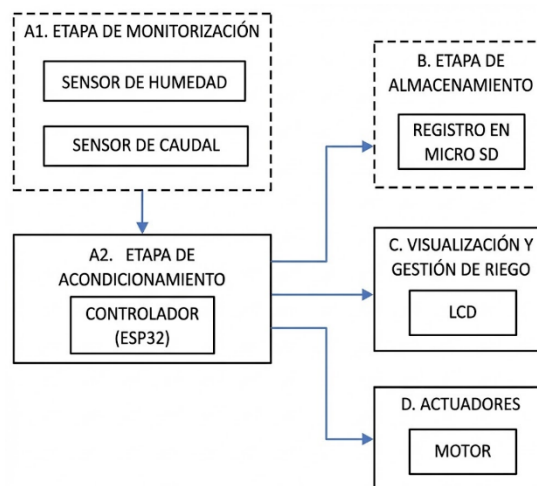


**Figura 30.** Diagrama del proceso de riego realizado por el agricultor

- **Descripción del proceso automatizado.**

Para definir el modo de operación de la compuerta automatizada se consideraron los criterios establecidos por [39], [38] y los valores referenciales de la Tabla 10. Estos aportan los rangos de humedad recomendados para el cultivo de alfalfa en cada etapa fenológica y de acuerdo al tipo de suelo; estos son parámetros indispensables para la toma de decisiones de riego. Esta lógica está programada en el nodo receptor principal que es el encargado de realizar todo el proceso.

La figura 31 muestra el diagrama general del funcionamiento dividido en cuatro etapas: monitoreo, acondicionamiento y decisión, almacenamiento, visualización y finalmente actuación.



**Figura 31.** Diagrama de bloques del sistema de riego automatizado

A continuación, se detalla las funciones principales de cada bloque del sistema:

- **Etapa de monitoreo:** Los sensores de humedad y de caudal se encargan de obtener datos correspondientes al entorno físico.
- **Etapa de acondicionamiento y control:** Recibe señales que son transmitidas desde la etapa 1; aquí se comparan los valores de humedad con los umbrales programados para determinar el estado de los actuadores.

- **Etapa de almacenamiento:** Una vez que la información ha sido procesada, el controlador envía los paquetes de datos, incluyendo fecha, humedad y caudal, hacia la memoria.
- **Etapa de visualización y gestión de riego:** El sistema permite la visualización y gestión del riego mediante una pantalla LCD, mostrando los datos en tiempo real para que el usuario pueda observar las condiciones directamente.
- **Etapa de actuadores:** Si la lógica de control definida en la etapa A2 indica que es necesario regar, se envía una señal correspondiente a la etapa de potencia para activar el motor y asegurar que el riego sea automático.

- **Cálculo de la humedad ponderada.**

Como la parcela agrícola trabaja con una sola compuerta automatizada al ingreso, el sistema necesita obtener un valor general que represente la humedad del suelo en todo el terreno. Para eso se toman las lecturas de 4 sensores distribuidos en la parcela y se combinan en una sola variable de control denominada humedad. En lugar de obtener un promedio simple donde se trata a todas las variables por igual, se aplicó un promedio ponderado, pues permite darle mayor importancia a las áreas donde el cultivo es más sensible al déficit de agua, conocidas como zonas críticas, y allí se ubica los sensores que deben tener mayor peso para tomar la decisión de riego.

**Asignación de pesos.**

- **Sensores 3 y 4 (zonas críticas):** se les asignó un peso de 0.35, ya que están en lugares que requieren mayor humedad debido a las condiciones del suelo u otros factores externos.
- **Sensores 1 y 2 (zonas de referencia):** al ser las zonas más cercanas a la compuerta, se les asignó un peso de 0.15 dado que tienen mayor ventaja natural en el riego debido a que se ubican cerca de la compuerta.

A partir de estos valores, la humedad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$H = \frac{(S_1 * 0.15) + (S_2 * 0.15) + (S_3 * 0.35) + (S_4 * 0.35)}{0.15 + 0.15 + 0.35 + 0.35}$$

Donde:

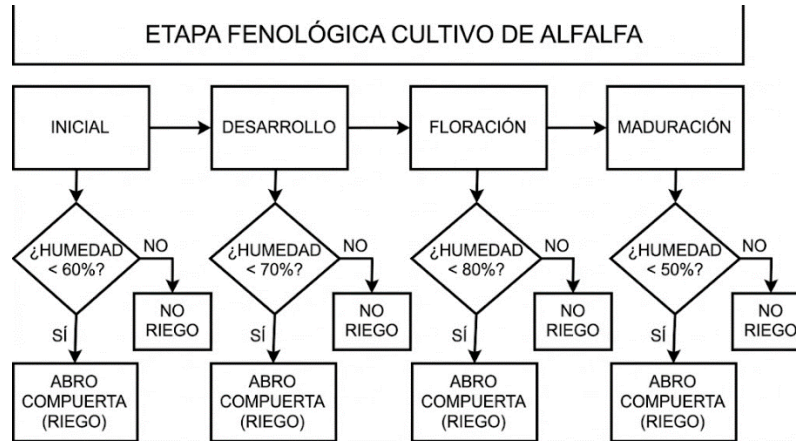
$S_x$  : corresponde a la lectura actual del sensor x, y en el denominador corresponde la suma de todos los pesos (total 1).

El promedio de humedad refleja el estado real del agua disponible en la parcela. Este valor se compara con los umbrales indicados en la tabla 10, que corresponden a la fase de crecimiento de la alfalfa que varía entre un 70% y un 80% de humedad; dependiendo de esta comparación, se va a decidir si se debe abrir o cerrar la compuerta para mantener las condiciones óptimas del riego.

- **Descripción del algoritmo de control.**

En el sistema automatizado se emplea una lógica basada en reglas fijas implementadas mediante sentencias condicionales (IF/ELSE), donde se compara la humedad del suelo que ha sido medida con los valores establecidos como óptimos. Si se detecta que los valores

están fuera de rango, se activa o se desactiva la compuerta mediante sus motores. Para más detalles sobre el código de control, véase el Anexo B. En la figura 32 se representa el diagrama de decisión utilizado, en el cual se contemplan las etapas de cultivo y los respectivos rangos de humedad establecidos en [39] y [38].



**Figura 32.** Árbol de decisión para establecer el riego.

### 3.6.2.13 Construcción del prototipo

Para desarrollar la investigación, se procedió a construir los diferentes componentes necesarios para el funcionamiento del sistema, que permiten el control de la compuerta. En la figura 33 se observa el ensamblaje del receptor principal; se aprecia cómo fueron integrados el microcontrolador ESP32-WROOM-32, el módulo de almacenamiento, el driver de potencia L298N sobre la placa base.



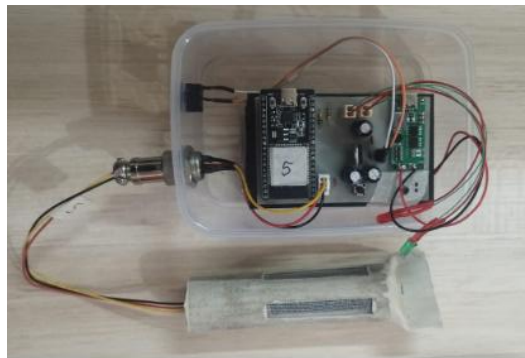
**Figura 33.** Ensamblaje del receptor principal

En la figura 34 se observa el ensamblaje de los dispositivos correspondientes a los nodos transmisores.



**Figura 34.** Ensamblaje nodos transmisores

En la figura 35 se observa cómo se integraron los componentes electrónicos al suministro de energía, con una batería recargable de iones de litio.



**Figura 35.** Ensamblaje final nodo transmisor

### 3.6.2.14 Implementación

- **Calibración y validación de sensores.**

Antes de instalar los sensores, se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento y ajustes en el software para asegurar que están configurados correctamente.

#### **Calibración Sensores de Humedad Capacitivos**

Se sometieron los 8 sensores del sistema (4 automáticos y 4 de monitoreo) a dos condiciones extremas controladas.

**Condición de sequedad (0%):** sensores expuestos en tierra seca y aire libre.

**Condición de saturación (100 %):** sensores sumergidos en agua.

En la tabla 21 se presenta un resumen de los valores promedio obtenidos del convertidor analógico-digital del ESP32 para cada sensor.

**Tabla 21:** Valores de referencia para la calibración de humedad

Valor Promedio	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
----------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------



Seco (Valor máx.)	2807	2823	2280	2775	2790	2415	2432	2353
Saturación (Valor min.)	978	983	241	947	1027	530	624	357

Para convertir estos valores se aplica la siguiente ecuación 2 de [25]:

$$H\% = 100 \times \left( \frac{V_{\max} - V_{\text{leído}}}{V_{\max} - V_{\min}} \right)$$

Donde:

$V_{\text{leído}}$ : Corresponde a la lectura actual del sensor.

### Calibración de los sensores de caudal.

Para comprobar si las mediciones son correctas, se comprueba el factor de conversión (k) del sensor DN-50 mediante una prueba física. Un volumen conocido de 42 litros de agua fue bombeado a través del sistema y comprobado con el recuento de pulsos registrado por el microcontrolador.

En la figura 36 se observa cómo se realizó la calibración de los sensores de caudal.



**Figura 36.** Calibración de sensores de caudal

### • Implementación y despliegue de campo.

Una vez calibrados los sensores, se procedió a la instalación definitiva del sistema en la parcela de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’. En esta fase se instaló todo el montaje mecánico y se colocaron los sensores en su lugar.

Se construyó una distribución usando una tubería de riego de 2 pulgadas para que coincidiera con el diámetro del sensor de flujo (DN-50) y evitar pérdidas de presión. También se instaló una derivación en T para separar el flujo de agua hacia la compuerta automática y el sistema manual. En la figura 37 se observa la instalación de la tubería y la T.





**Figura 37.** Instalación de tubería y T.

A esta estructura se acopló el mecanismo de la compuerta junto con el motor (25D-130). Se revisó que quedara bien alineado de forma vertical para que no existieran trabas y el movimiento fuera suave. Esto se puede observar en la figura 38.



**Figura 38.** Instalación final de la compuerta y motor.

- **Colocación de los sensores y demás bloques electrónicos.**

**Instalación del receptor principal:** La caja se instaló junto a la compuerta automatizada para mantener cortos los cables del motor y sensor de caudal. Dentro de ella se colocó el receptor 1, que funciona con una fuente de 12 V y 3 A. En la figura 39 se observa a detalle la instalación del receptor principal.



**Figura 39.** Integración y montaje de la Unidad Central de Control.

- **Instalación distribución de la red de sensores de humedad**

Para poder realizar el estudio comparativo, se instaló de manera idéntica y simultánea tanto para la parcela automatizada como para la parcela del riego tradicional. Se ubicó un total de 8 nodos de sensores, protegidos por cajas que evitan el deterioro debido a daños ambientales.

**Ubicación:** Los sensores se insertaron a una profundidad de 10 cm; se contempló un total de 12 surcos para el estudio por cada parcela. Estos fueron ubicados cada 3 surcos de acuerdo a las zonas clave de riego.

En la figura 40 se observa cómo se insertaron los sensores de humedad.



**Figura 40.** Puesta de sensores de humedad.

**Zonas clave de riego:** cabecera, zona media y zona final.

En las figuras 41 y 42 se observa la distribución de los sensores en ambas parcelas.



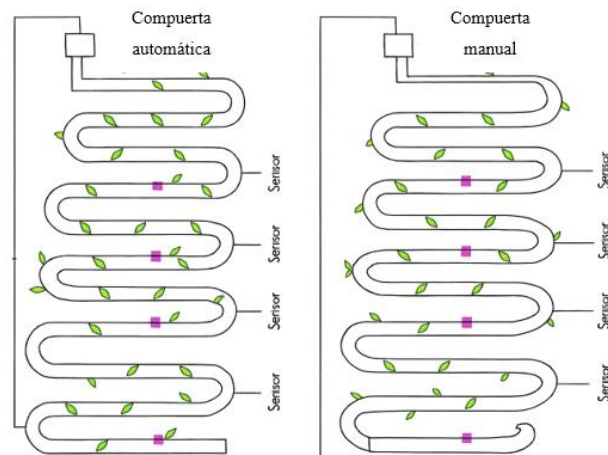
**Figura 41.** Distribución sensores de humedad sistema tradicional



**Figura 42:** Distribución de sensores de humedad sistema automatizado.



A continuación, en la figura 43 se observa de manera clara la distribución de sensores en las parcelas.



**Figura 43.** Croquis de distribución de los sensores.

- **Verificación del funcionamiento.**

#### **Validación de ESP-NOW**

En la figura 44 se observa cómo la información enviada por los sensores llega correctamente al receptor. Para esto se usó una pantalla LCD, donde se podía ver cómo llegaban los datos a los sensores; en las pruebas el enlace inalámbrico funcionó bien incluso a 100 m en línea recta.



**Figura 44.** Validación ESP-NOW para la compuerta automática y la manual.

#### **Lógica de control.**

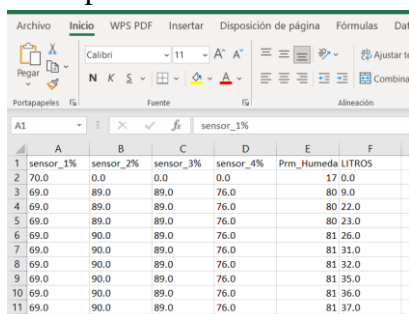
Aquí se verificó que la compuerta respondiera de forma correcta a los valores de humedad y que no se abra ni cierre sin control. En la figura 45 se observa cómo la compuerta se abrió cuando el valor de la humedad bajó del 70% y se volvió a cerrar cuando superó el 80%.



**Figura 45.** Lógica de control.

## Verificación de SD

Se comprobó el funcionamiento del registro de datos. Para ello se retiró la tarjeta micro SD y se abrió el archivo CSV en la computadora. Como se observa en la figura 46.



	A	B	C	D	E	F
	sensor_1%	sensor_2%	sensor_3%	sensor_4%	Prm_Humeda LITROS	
1	70.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0
2	69.0	89.0	89.0	76.0	80.0	9.0
3	69.0	89.0	89.0	76.0	80.0	22.0
4	69.0	89.0	89.0	76.0	80.0	23.0
5	69.0	90.0	89.0	76.0	81.0	26.0
6	69.0	90.0	89.0	76.0	81.0	31.0
7	69.0	90.0	89.0	76.0	81.0	32.0
8	69.0	90.0	89.0	76.0	81.0	35.0
9	69.0	90.0	89.0	76.0	81.0	36.0
10	69.0	90.0	89.0	76.0	81.0	37.0
11	69.0	90.0	89.0	76.0	81.0	37.0

**Figura 46.** Verificación de registro de datos.

### 3.6.3 Fase 3: Evaluación del sistema.

Después de comprobar el funcionamiento del sistema, se realizaron las pruebas de campo. El objetivo de esta fase fue medir la eficiencia hídrica del prototipo y comparar su desempeño frente al método tradicional utilizado por los agricultores de la Junta de Agua.

#### 3.6.3.1 Consumo de agua y variables de medición

Para determinar la eficiencia del sistema, se estableció un protocolo comparativo entre ambos métodos de riego. El procedimiento consistió en medir el uso del agua de regadío mediante el registro de: volumen consumido (litros) y humedad del suelo, con el fin de obtener datos válidos para su posterior análisis.

#### 3.6.3.2 Sistema tradicional

En el sistema tradicional, el riego se ejecutó mediante la apertura manual de la compuerta por parte del agricultor. Para la recolección de datos, se realizaron pruebas durante 20 días en la etapa fenológica de desarrollo de la alfalfa. Durante este periodo, se registraron los valores de humedad inicial y final, el volumen de agua consumido y el tiempo de apertura de la compuerta, estableciendo así datos referenciales para la comparación.

#### 3.6.3.3 Sistema Automatizado

Para la evaluación del prototipo, se implementó el sistema automatizado bajo las mismas condiciones del cultivo. La compuerta operó de manera autónoma, regulada por los sensores de humedad instalados. De igual manera, durante el periodo de pruebas, se procedió al registro automático de las variables correspondientes a la humedad inicial y final, consumo de agua y tiempo de apertura. Esta recolección de datos se realizó con el fin de contrastar la eficiencia hídrica frente al método manual.

## CAPÍTULO IV.

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados de las pruebas de campo.

A continuación, se presentan los datos obtenidos durante los 20 días de pruebas descritos en la metodología.

##### 4.1.1 Datos registrados en el sistema tradicional.

En el sistema tradicional, el riego se realizó mediante la apertura manual de la compuerta por parte del agricultor. Los datos registrados durante la etapa de desarrollo del cultivo se detallan en la Tabla 22.

**Tabla 22.**Datos obtenidos del riego realizado por el agricultor

N° Observaciones	Humedad Inicial	Humedad Final	Consumo de agua (L)	Tiempo de riego (min)
1	60%	98%	1048	34.93
2	55%	100%	1456	48.53
3	62%	95%	856	28.53
4	58%	96%	922	30.73
5	65%	94%	836	27.87
6	68%	90%	700	23.33
7	61%	95%	856	28.53
8	70%	88%	500	16.67
9	72%	89%	491	16.37
10	74%	88%	455	15.17
11	63%	93%	826	27.53
12	78%	80%	50,5	1.68
13	64%	92%	814	27.13
14	60%	95%	856	28.53
15	59%	99%	1012	33.73
16	71%	89%	491	16.37
17	58%	96%	898	29.93
18	73%	87%	457	15.23
19	70%	89%	491	16.37
20	62%	95%	856	28.53

Se observa una notable variación en los niveles de humedad final, con registros que superaron la capacidad de campo y la humedad recomendada (70% - 80%), lo cual evidencia la tendencia de sobre riego en el método tradicional, registrando un consumo total acumulado de 14871,5 litros durante el periodo de prueba.

#### 4.1.2 Datos registrados en el sistema automatizado.

En el sistema automatizado, el riego funcionó de manera autónoma, activando la compuerta únicamente cuando los sensores detectaban que la humedad del suelo estaba por debajo del rango establecido. Los datos registrados durante este periodo de prueba se presentan en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Datos del sistema automatizado

N° Observaciones	Humedad Inicial	Humedad Final	Consumo de agua (L)	Tiempo de riego (min)
1	76%	80%	35.42	1.18
2	55%	81%	198.42	6.61
3	63%	80%	135.92	4.53
4	60%	81%	156.33	5.21
5	64%	80%	131.25	4.38
6	62%	81%	140.92	4.7
7	67%	80%	104.25	3.48
8	68%	80%	100.2	3.34
9	65%	99%	1012	33.73
10	60%	81%	156.33	5.21
11	64%	80%	130.92	4.36
12	76%	80%	35,42	1.18
13	58%	81%	177	5.9
14	62%	80%	144.5	4.82
15	60%	81%	156.33	5.21
16	65%	80%	119.75	3.99
17	67%	80%	104.25	3.48
18	69%	80%	89.77	2.99
19	65%	80%	119.75	3.99
20	69%	80%	89.75	2.99

Al analizar los datos registrados, se obtiene un consumo total acumulado de 3338,5 litros. No obstante, es necesario mencionar que este valor se ve afectado por la Observación N° 9, en la que se registró un consumo atípico de 1012 litros debido a una falla mecánica externa, ajena al algoritmo de control.

En consecuencia, para evaluar la eficiencia real del prototipo se excluye este evento. Bajo esta consideración, el sistema automatizado presenta un consumo de 2326,5 litros, manteniendo la humedad estable dentro de los parámetros de diseño establecidos.

#### 4.2 Análisis de resultados.

En este apartado se analizan los resultados generales para determinar si el sistema automatizado logra ahorrar agua en comparación con el riego manual. En el sistema tradicional, el agricultor basa el riego en la observación superficial del terreno, mientras que

en el sistema automatizado el riego se controla según los valores de la humedad. Por lo tanto, los datos son independientes entre sí porque provienen de métodos distintos.

El primer análisis realizado fue de tipo descriptivo para ambos sistemas, con el objetivo de obtener valores como la media, mediana, varianza y otros parámetros necesarios para caracterizar el comportamiento de la cantidad de agua utilizada y la humedad del suelo, tal como se observa en la Tabla 24.

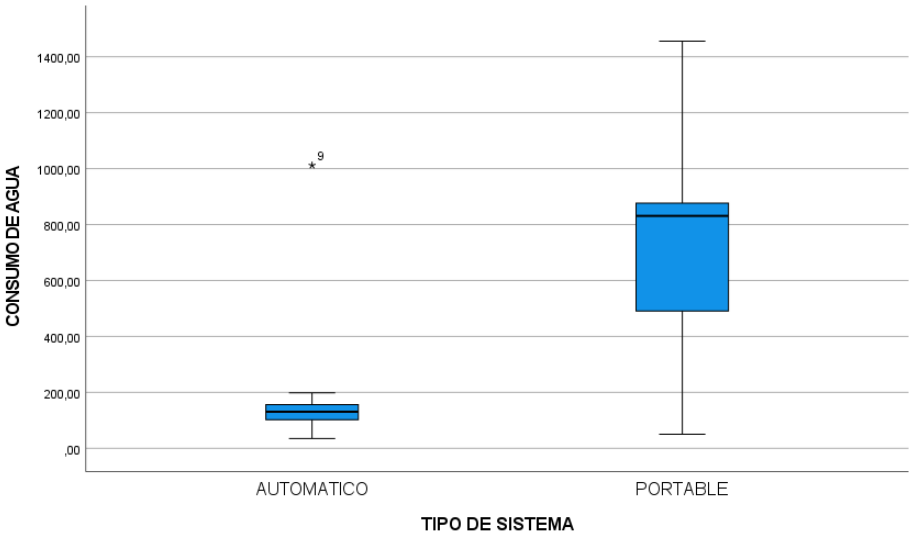
**Tabla 24.** Análisis descriptivo del sistema tradicional y automatizado.

Descriptivo				
Variable de estudio	Cantidad de agua (L)		Humedad (Porcentaje)	
Tipo de sistema	Tradicional	Automatizado	Tradicional	Automatizado
Media	743,57	127,28	92,00	81,00
Desviación estándar	298,87	203,07	4,87	4,19
Varianza	89325,03	41239,31	23,72	17,58
Mediana	831,00	131,08	93,50	80,00

Los resultados obtenidos presentan un consumo promedio de 743,57 L con una humedad promedio de 92,00 % para el sistema tradicional, mientras que el automatizado tiene un consumo de agua de 127,28 L con una humedad media de 81 %.

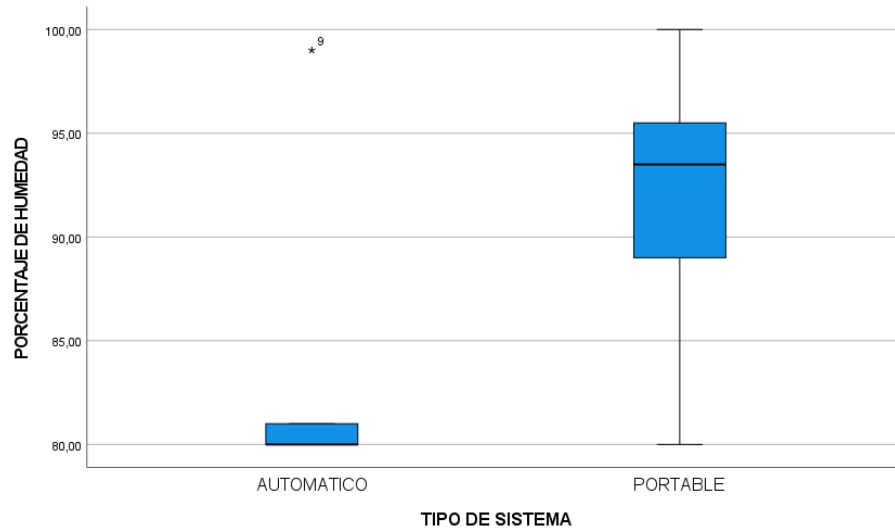
#### 4.2.1 Interpretación gráfica con diagrama de caja

La figura 47 muestra la diferencia en cómo se maneja el agua en ambos métodos. El sistema automático tiene rangos entre 100 y 180 litros; esto significa que es más estable y moderado, mientras que en el método manual hay muchas variaciones en cuanto a los valores, encontrando el pico más grande en 1456 litros. Esta comparación evidencia que con la compuerta automática se logra un consumo uniforme y se evita el desperdicio de agua.



**Figura 47.** Diagrama de caja de la cantidad de agua del sistema manual y automatizado.

En la figura 48 se observa la diferencia en cómo se controla la humedad del suelo con ambos sistemas. El automático tiene una humedad muy estable, con una mediana del 80 %. En cambio, el riego manual tiene mucha irregularidad y una media del 93,5 %, lo que indica que en el método tradicional las plantas reciben exceso de agua.



**Figura 48.** Diagrama de caja del porcentaje de humedad de cada tipo de sistema.

#### 4.3 Prueba de normalidad.

Para determinar estadísticamente si los datos del riego mediante la compuerta automática y la manual siguen una distribución normal o no, se aplicó la prueba de normalidad.

**H<sub>0</sub>** : Los datos medidos por cada tipo de sistema tienen una distribución normal.

**H<sub>1</sub>**: Los datos medidos por cada tipo de sistema no tienen una distribución normal.

En la tabla 25, se muestra la prueba de normalidad donde se indica que las variables cantidad de agua y porcentaje de humedad, no presentan una distribución normal, sig.< 0.05, por esta razón se utiliza el análisis no paramétrico de Mann-Whitney

**Tabla 25.** Prueba de normalidad entre el sistema automático y el manual.

PRUEBA DE NORMALIDAD				
SHAPIRO- WILK				
CONSUMO DE AGUA	Tipo de Sistema	Estadístico	gl	Sig. (p-valor)
	AUTOMÁTICO	0,388	20	< 0,01
	MANUAL	0,193	20	0,136
PORCENTAJE DE HUMEDAD	AUTOMÁTICO	0,315	20	< 0,01
	MANUAL	0,945	20	0,297

#### 4.4 Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes.

Para validar estadísticamente si las diferencias observadas en el análisis descriptivo son significativas, se aplicó la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney.

En la tabla 26 se observa el análisis de la hipótesis nula.



**Tabla 26.** Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes

Hipótesis Nula	Prueba	P-valor	Decisión
<b>La distribución de consumo de agua es la misma entre categorías de tipo de sistema.</b>	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	< 0,001	Se rechaza la hipótesis nula
<b>La distribución de consumo de porcentaje de humedad es la misma entre categorías de tipo de sistema.</b>	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	< 0,001	Se rechaza la hipótesis nula

Al rechazar la hipótesis nula, se confirma que el prototipo funciona de manera eficiente, ya que elimina la inestabilidad del riego manual y hace que el proceso de riego sea seguro y controlado. Además, se confirma que la automatización mantiene la humedad del suelo cercana al 80 %, evitando las saturaciones superiores al 90 % que ocurren con mucha frecuencia en el riego manual.

#### 4.5 Cálculo de la eficiencia hídrica

Para determinar el ahorro real del agua de regadío, se sumó el consumo de agua total registrado durante los 20 días de prueba para ambos sistemas. Para el cálculo de la eficiencia, no se tomó en cuenta la falla mecánica registrada en el sistema automático (Obs.9), Tabla 23, al fin de reflejar el desempeño real del prototipo.

Resultados totales:

- **Sistema Manual:** Gastó un total de 14871,5 litros.
- **Sistema Automático:** Gastó un total de 2326,5 litros.

Aplicando la ecuación 3 de la eficiencia [39], se compara la diferencia entre ambos métodos:

$$\text{Eficiencia hídrica (\%)}: \left( \frac{T_{sm} - T_{sa}}{T_{sm}} \right) \times 100$$

Donde:

$T_{sm}$ : Total sistema manual (L)

$T_{sa}$  : Total sistema automático (L)

$$\text{Eficiencia hídrica (\%)}: \left( \frac{14871,5 - 2326,5}{14871,5} \right) \times 100$$

**Eficiencia hídrica (%): 84.36.**

El sistema automatizado demostró una eficiencia hídrica del 84.36 % demostrando que la gestión realizada por la compuerta automática junto con los sensores de humedad y caudal reduce en gran medida el desperdicio de agua comparado con el método tradicional.

## **CAPÍTULO V.**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

- La revisión teórica permitió entender que los métodos de riego tradicionales no siempre son precisos, ya que dependen principalmente de la experiencia del agricultor. Este análisis respaldó la elección tecnológica del proyecto, mostrando que el uso de sensores capacitivos y un sistema de control automático ofrece un manejo del agua más eficiente que el riego manual. Además, el estudio ayudó a definir parámetros importantes para el diseño, como los rangos de humedad adecuados para la alfalfa y las propiedades del suelo franco-arenoso.
- Se diseñó e implementó un sistema automatizado de compuertas que opera de manera autónoma gracias al uso del protocolo ESP-NOW y un diseño electrónico modular. Esta selección tecnológica demostró ser la idónea para zonas rurales, ya que garantiza el funcionamiento del equipo sin depender de internet. Además, al integrar el análisis de flujo mediante sensores de efecto Hall con un control basado en los rangos de humedad se permitió regular el riego con precisión, activando la compuerta cuando las condiciones lo requieran.
- Las pruebas de funcionamiento realizadas en una parcela de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’ demostraron la efectividad del sistema; se comprobó estadísticamente mediante una prueba de U de Mann-Whitney que el sistema automatizado logra una reducción del 84,36 % en el consumo de agua de riego en comparación con el sistema tradicional. Asimismo, el sistema automatizado logra mantener la humedad del suelo cercana al umbral óptimo establecido (80 %), evitando saturación y desperdicio recurrente de agua de regadío.

#### **5.2 Recomendaciones**

- Se recomienda implementar un sistema de carga por medio de paneles solares en los transmisores para asegurar autonomía energética en zonas de difícil acceso.
- Se sugiere desarrollar una interfaz móvil que permita la visualización de gráficas históricas de datos y gestión de alertas en tiempo real.

## CAPÍTULO VI.

### 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Villazante, «Diseño de un sistema de riego autónomo e inteligente,» La Paz, Bolivia, 2022.
- [2] BBC News Mundo, «Los 5 cultivos a nivel mundial que requieren más agua para su producción (y su impacto en las comunidades y el medio ambiente),» Octubre 2024.
- [3] W. A. W. Foundation, «Desperdicio hídrico: Acabar con las pérdidas de agua, prioridad mundial,» 29 Agosto 2024.
- [4] J. Ortiz, «Desarrollo de un prototipo de un sistema de riego automatizado para el procesamiento, monitoreo y análisis de datos utilizando lógica difusa en tiempo real e IoT para optimizar el uso de agua aplicada en el cultivo,» 2021.
- [5] M. Arroyo, «Visión General del Riego en el Mundo. Serie Agua y Riego,» *Artículos técnicos de INTAGRI*, n° 39, p. 4, 2023.
- [6] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «Información Agroambiental y Tecnificación Agropecuaria,» *INEC*, Noviembre 2020.
- [7] Ecología cotidiana, «¿Qué pasa si riegas demasiado una planta?,» 1 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://ecologiacotidiana.es/que-pasa-si-riegas-demasiado-una-planta/>. [Último acceso: 16 Enero 2025].
- [8] Centro de Investigaciones sobre Desertificación, «Un sistema de riego analiza el estado de cada planta para evitar el desperdicio de agua.,» 4 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.agroclm.com/2024/01/04/un-sistema-de-riego-analiza-el-estado-de-cada-planta-para-evitar-el-desperdicio-de-agua/>. [Último acceso: 15 Enero 2025].
- [9] Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), «Directrices científico-técnicas para establecimiento de sistemas de monitorización por sensores del contenido de humedad del suelo.,» *CSIC*, Octubre 2023.
- [10] J. Enciso, D. Porter y X. Périés, «Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego.,» *AgriLife Extension*, Julio 2020.
- [11] A. Plúas, «Análisis del manejo eficiente del agua mediante sensores de humedad en un sistema de riego por goteo, en el recinto San Andrés,» Guayaquil, 2020.
- [12] Agbar Agriculture S.A.U, «Sistemas de riego automático para la agricultura en España,» Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://agbaragriculture.com/sistemas-de-riego-automatico-para-la-agricultura-en-espana/>. [Último acceso: 17 Enero 2025].
- [13] D. Eisenhauer, D. Martin, M. Heeren y G. Hoffman, «Irrigation Systems Management,» *ASABE*, 2021.

- [14 K. Chulde, «Implementación de un sistema automatizado de riego por goteo parcial, a campo abierto en el Centro Experimental del Riego de la Facultad de Recursos Naturales,» Riobamba, 2017.
- [15 National Irrigation Authority, «Gravity Fed Irrigation System,» *National Irrigation System*, 25 Febrero 2022.
- [16 PASOLAC, «Riego por surco,» *Programa de Agricultura Sostenible en Laderas de América Central*, Junio 2021.
- [17 Cenicaña, «Riego por surcos,» 6 Abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.cenicana.org/riego-por-surcos/>. [Último acceso: 19 Enero 2025].
- [18 M. López, E. Neri, H. Rodriguez, Y. Moreno, M. Rocandio y M. Segura, «La importancia de los sistemas de riego para el uso eficiente del agua en la agricultura.,» *Ciencia Latina Internacional*, vol. 8, nº 4, Julio-Agosto 2024.
- [19 Aqtshop, «Tipos de sistemas de riego por aspersión y cómo funcionan,» 16 Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://aqtshop.com/blog/tipos-de-sistemas-de-riego-por-aspersion-y-como-funcionan/>. [Último acceso: 20 Enero 2025].
- [20 Grupo Hidráulica, «¿Cómo implementar un sistema de riego por goteo?,» 24 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://grupohidraulica.com/noticias/2023/04/24/como-implementar-un-sistema-de-riego-por-goteo/>. [Último acceso: 20 Enero 2025].
- [21 Agriculture Victoria, «Automatic irrigation,» 5 Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://agriculture.vic.gov.au/farm-management/water/irrigation/automatic-irrigation>. [Último acceso: 20 Enero 2025].
- [22 S. Mohamed, B. Mostapha, A. Ibtisam, E. G. Jaouad y A. A. Badiaa, «A Smart Agricultural System Based on PLC and a Cloud Computing Web Application Using LoRa and LoRaWan.,» Universidad de Valencia., España, 2023.
- [23 D. A. Maruti, J. Vijay, K. Vilas y M. Kanawade, «Smart Irrigation System with Hybrid Power Generation using SCADA.,» *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, vol. 5, p. 24, 2025.
- [24 S. Arief, G. Budi, N. Fajar, A. Nindya y M. Sri, «Smart Soil Moisture Control Based on IoT ESP-32 for Horticulture Cultivation in Coastal Area,» *ESP International Journal of Communication Engineering & Electronics Technology*, vol. 96, p. 8, 27 Marzo 2024.
- [25 G. Pereira, M. Chaari y D. Fawwad, «IoT-Enabled Smart Drip Irrigation System Using ESP32.,» *FAB-LAB, Qatar Scientific Club*, p. 23, 7 Julio 2023.
- [26 S. Berrios y H. Rivera, «Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0.,» *Ingeniería Investiga*, vol. 4, p. 12, 1 Junio 2022.

- [27 S. ., M. A. Ibharonujele, S. .. Shuaibu, R. Beremeh, M. Diyari y A. Muhammad,  
] «Design and Implementation of an Intelligent IoT-Based Smart Irrigation System,»  
] *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, vol. 12, p. 14, 17  
] Marzo 2025.
- [28 L. Caicedo, F. Méndez, E. Gutiérrez y J. Flores, «Soil Moisture Measurement: Review  
] of Methods and Characteristics.,» *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e  
] Ingenierías del ICBI*, vol. 9, n° 17, p. 18, 05 julio 2021.
- [29 D. Rivera y C. O. W. Satizábal, «Comparative Analysis of Temperature, Humidity and  
] Light Sensors for Use in Vermicompost Production Systems.,» *Entre Ciencia e  
] Ingeniería*, vol. 18, n° 35, pp. 3-4, 4 mayo 2024.
- [30 M. Osorio, J. Haro, W. Carrillo y J. Negrete, «Suelos: caracterización e importancia.,»  
] *ITMS*, p. 16, 2022.
- [31 R. Tapia, R. León y C. Torres, «Riego deficitario y densidad de siembra en indicadores  
] morfofisiológicos y productivos de híbrido de maíz.,» *ESPAMCIENCIA*, vol. 12, n° 2,  
] pp. 3-9, 20 Diciembre 2021.
- [32 A. Aslam, M. Cheema, S. Saleem y A. Basit, «Application of Sensor-Based Precision  
] Irrigation Methods for Improving Water Use Efficiency of Maize Crop.,» *MDPI*, p. 4,  
] 2022.
- [33 M. Gaiya, J. Yuanbo, L. Haiyan, W. Sinan y Q. Guangping, «Water-Fertilizer  
] Synergistic Effects and Resource Optimization for Alfalfa Production: A Central  
] Composite Design and Response Surface Methodology Approach,» *College of Water  
] Conservancy and Hydropower Engineering.*, pp. 1-8, 27 febrero 2025.
- [34 ECOTONO, «Estudio de Impacto Ambiental y Plan de Manejo Ambiental para la  
] construcción, operación, mantenimiento y cierre.,» Riobamba, 2020-2021.
- [35 Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo, «Obras de  
] rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura principal del sistema de riego  
] Chambo.,» Riobamba, 2020.
- [36 AGROSAVIA, «Buenas prácticas agrícolas y de manufactura en los cultivos.,»  
] Colombia, 2023.
- [37 J. Doorenbos y A. H. Kassam, *Yield Response to Water.*, Roma: FAO, 1979, p. 69.  
]
- [38 R. Allen, L. Pereira, D. Raes y M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for  
] Computing Crop Water Requirements.*, vol. 56, FAO, Ed., Italia: FAO, Rome (Italy).  
] Land and Water Development Div., 1998, p. 56.
- [39 STMicroelectronics., «Dual full-bridge driver [Hoja de datos],» 2023. [En línea].  
] Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>. [Último acceso: 14  
] Noviembre 2025].

- [40 F. Barroso, M. Inácio y F. Oliveira, «Embedded Fuzzy Controller for Application in Irrigation Systems.,» *Engenharia Agrícola*, vol. 42 (spe), 2022.
- [41 J. Delgado, «Estudio de un sistema de riego automatizado para mejorar la producción agrícola en la hacienda “las cabeza” del cantón Flavio Alfaro,» Jipijapa, 2021.
- [42 CleanRanks Team SEO, «Proain Tecnología Agrícola,» 5 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/que-es-la-tecnologia-de-riego-inteligente-y-como-cuida-el-futuro-de-la-agricultura#:~:text=El%20riego%20inteligente%20es%20un,las%20plantas%20en%20cada%20momento..> [Último acceso: 21 enero 2025].
- [43 A. Klinger, «Diseño e implementación del sistema SCDA en el módulo de comunicación IEC 61850 para monitoreo de los IED de los módulos de protección de sistemas de generación, líneas de transmisión y redes de distribución,» Guayaquil, 2020.
- [44 A. Iberia, «AUMA Solutions of the world,» 7 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://aumaiberia.com/actuadores-en-la-gestion-inteligente-del-agua/>. [Último acceso: 26 enero 2025].
- [45 V. Pinto, J. Gogalves y P. Costa, «Modeling and Control of a DC Motor Coupled to a Non-Rigid Joint,» *Institute for Systems and Computer Engineering, Technology and Science, CRIIS Centre for Robotics in Industry and Intelligent Systems.*, p. 19, 2020.
- [46 G. Pereira, «Comparison of moisture sensors using the Arduino microcontroller in sandy loam soil,» *DELOS*, p. 18, 3 Marzo 2025.
- [47 A. Quispe, «Sistema inteligente basado en agricultura 5.0 para automatizar el,» Riobamba, 2025.
- [48 G. Martinho, S. Brown, J. Cuervo y N. Schorrock, «Fire Extinguishing Robot,» *EEL 4914 Senior Design I*, p. 40, 2022.
- [49 V. Cherlika, «EOS Data Analytics,» 3 Julio 2025. [En línea]. Available: OS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-alfalfa/>. [Último acceso: 5 Noviembre 2025].
- [50 R. Pasic, I. Kuzmanov y K. Atanasovski, «ESP-NOW communication protocol with ESP32.,» *Revija za univerzalno odličnost.*, vol. 1, p. 55, febrero 2021.

## CAPÍTULO VII.

### 7. ANEXOS

- Anexo A. Entrevista

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

Entrevista dirigida al señor usuario de la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’, parroquia urbana Yaruquíes, Riobamba-Ecuador

**Tema:**

**Fecha:** 14 de agosto de 2025

**Nombre:** Sr. Luis Janeta

**Objetivo:** Diagnosticar la situación operativa actual del sistema de riego en la Junta de Agua ‘María Auxiliadora’ e identificar problemáticas relacionadas con la gestión y distribución del riego.

- **¿Cuál es el procedimiento actual que utilizan los agricultores y la Junta para la apertura, cierre de compuertas y distribución del agua de riego en las parcelas?**

Verá, aquí todo el trabajo es manual, lo hacemos de acuerdo a la experiencia que se tiene. Nosotros nos manejamos por turnos, por ejemplo, cuando le toca al compañero, él tiene que ir hasta la toma o la compuerta principal. Ahí, con el azadón o la pala, retira la tierra o las piedras, o levanta la tabla de madera que usamos de compuerta para que pase el agua al canal secundario. Una vez que termina sus horas de riego, tiene que volver a ir para cerrar y dejar tapando para que el siguiente vecino pueda regar. Es un trabajo físico duro, de estar subiendo y bajando todo el tiempo

- **¿Cuáles son las dificultades o problemas más frecuentes que se presentan durante los turnos de riego con el sistema actual?**

El problema que tenemos es grave pues hay muchos vecinos que desperdician el agua, se pasan casi 6 horas regando el agua en terrenos pequeños cuando hay gente que lo necesita, a más de ello, los vecinos suelen dejar las compuertas entreabiertas para que se siga regando el agua. Hace aproximadamente 15 días hubo un derrumbe en un terreno en ese sentido; con la fuerte lluvia y con la compuerta entreabierta, se inundó y se perdió gran parte de la siembra

de una vecina de aquí. Además, por la inclinación que tienen algunos terrenos en la parte alta se inunda de inmediato mientras que en la parte baja casi no llega agua.

- **¿Cuentan los agricultores con algún tipo de herramienta técnica o instrumento de medición para determinar el momento exacto y la cantidad de agua que necesitan los cultivos?**

No contamos con nada de eso, simplemente aquí se riega “al ojo” y por la experiencia de años que ya se tiene uno. Cuando ya se mira la tierra cuarteada o seca, es símbolo de falta de agua. Pero no sabemos en realidad si las plantas lo necesitan.

- **Anexo B. Código.**

### Receptor principal

```
#include <WiFi.h>
#include "esp_wifi.h" // <-- Esta línea es OBLIGATORIA para usar
esp_wifi_set_ps()
#include <esp_now.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

// LCD 16x2 I2C
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

//// datos bien
boolean ledState = LOW;
float calibrationFactor = 0.45;
volatile unsigned long pulseCount = 0;
byte pulse1Sec = 0;
float flowRate = 0.0; // L/min
float litrosPorSegundo = 0.0; // L/s
float totalLitros = 0.0; // L acumulados
// Parámetros del sensor YF-DN50
#define PULSOS_POR_LITRO 12.0 // según hoja técnica
long currentMillis = 0;
unsigned long previousMillis = 0;
const unsigned long interval = 1000; // 1 segundo

// Pines del Encoder motor
const int pinA = 26; // Canal A
const int pinB = 25; // Canal B
volatile long pulsos = 0;
volatile int direccion = 0;
```



```

int a = 0,aa=0, ab=0,b=0,aux=0,t=0,bb=0,cc=0;
bool val_abi,val_cerr;
float w1 = 1, w2 = 2, w3 = 2, w4 = 1; // pesos para los sensores

// Pines microSD
#define SD_CS 5
#define SD_MISO 19
#define SD_MOSI 23
#define SD_SCK 18
File archivo;
// Sensor de flujo
#define SENSOR 4
volatile unsigned long pulsosFlujo = 0;
float litrosMin = 0;
unsigned long ultimoCalculoFlujo = 0;
unsigned long i=0;
// pines leds
const int led0=15;
const int led1=16; // led verde

// Pines de finales de carrera
const int pinFC_Abierto = 33; // HIGH = puerta abierta
const int pinFC_Cerrado = 32; // HIGH = puerta cerrada

// Pines del L298N (canal B)
const int pinIN3 = 14;
const int pinIN4 = 12;

// Pines de los pulsadores
const int bt1=35, bt2=34; // HIGH = botón presionado

// Variables globales
const int pulsosPorVuelta = 11;
long vueltasHorario = 0;
long vueltasAntihorario = 0;
long pulsos_abrir = 0;
long pulsos_cerrar = 0;
int val_bt1=0,val_bt2=0;
int pro_hume=0, pro_cons=0, pro_compu=0, estado=0;
float sensor_1=0,sensor_2=0,sensor_3=0,sensor_4=0;
float humedad1=0.0,humedad2=0.0,humedad3=0.0,humedad4=0.0;
int flujo=0,vueltas=0;

// para volumen de agua
float factor_conversion=7.5; //para convertir de frecuencia a caudal, valor
de datasheet puede ser 7.11
float volumen_1=0.0;
long dt=0; //variación de tiempo por cada bucle

```

```

long t0=0; //millis() del bucle anterior
float frecuencia_1=0.0;
float caudal_1_L_m=0.0;
float caudal_1_L_h=0.0,volumen_total=0;
float litrosTotales = 0.0;
float litrosSeg=0;
volatile int NumPulsos_1;

// PID
double setpoint = 80.0;  ///// cambiar segun la necesidad se debe poner
segun la cantidad de agua necesesaria
int espera=0;
long posicionVirtual = 0;
double error = 0;
float error_anterior = 0.0;
float por_objetivo_pos=0,por_objetivo_neg=0;
int vue_pos=0,vue_neg=0;
// Constantes PID (ajustables)
double Kp = 0.4;
double Ki = 0.0005;
double Kd = 0.1;
// Estado
bool estaAbriendo = true;
bool abriendo = false;
bool cerrando = false;
// Límites de posición (basados en datos que proporcionó)
const int vueltasMaximasApertura = 1700;
const int vueltasMaximasCierre = 3700;
const int totalVueltas = vueltasMaximasApertura + vueltasMaximasCierre;
///para verificar conexión
unsigned long tiempoUltimoMensaje = 0;
const unsigned long tiempoDesconexion = 5000;  // 5 segundos sin mensajes =
desconectado
unsigned long tiempoUltimoMensaje1 = 0;
unsigned long tiempoUltimoMensaje2 = 0;
unsigned long tiempoUltimoMensaje3 = 0;
unsigned long tiempoUltimoMensaje4 = 0;
///

// Variables para control de motor por tiempo
unsigned long tiempo_abrir = 0;
unsigned long tiempo_cerrar = 0;
unsigned long t_inicio_abrir = 0;
unsigned long t_inicio_cerrar = 0;
unsigned long por_aper=0;
bool modo_abriendo = false;
bool modo_cerrando = false;

```

```

// Variables para tareas periódicas
unsigned long t_millis_motor = 0;
unsigned long t_millis_vista = 0;
const unsigned long intervalo_motor = 100;    //1000
const unsigned long intervalo_vista = 300; //100

///// ARCHIVO PARA MICRO
File dataFile;

// Estructura de datos enviada por cada transmisor
typedef struct struct_message
{
    float humedad;
    int id;
} struct_message;

struct_message incomingReadings;

// Callback cuando llega un mensaje
void OnDataRecv(const esp_now_recv_info *info, const uint8_t *incomingData,
int len)
{
    memcpy(&incomingReadings, incomingData, sizeof(incomingReadings));
    // Clasificar según ID
    switch (incomingReadings.id)
    {
        case 1:
            humedad1 = incomingReadings.humedad;
            tiempoUltimoMensaje1 = millis();
            break;
        case 2:
            humedad2 = incomingReadings.humedad;
            tiempoUltimoMensaje2 = millis();
            break;
        case 3:
            humedad3 = incomingReadings.humedad;
            tiempoUltimoMensaje3 = millis();
            break;
        case 4:
            humedad4 = incomingReadings.humedad;
            tiempoUltimoMensaje4 = millis();
            break;
        default:
            Serial.print("ID desconocido: ");
            Serial.println(incomingReadings.id);
            break;
    }
}

```

```

    }
    tiempoUltimoMensaje = millis(); // Actualiza última vez que recibimos
    algo
    //Serial.print("Datos recibidos de dispositivo ");
    // Serial.print(incomingReadings.id);
    // Serial.print(": Humedad = ");
    // Serial.println(incomingReadings.humedad);
}

// ----- ISR ENCÓDER -----
void IRAM_ATTR encoderISR()
{
    pulsos++;
}

// ----- ISR SENSOR DE FLUJO -----
void IRAM_ATTR pulseCounter()
{
    pulseCount++;
}

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    // Modo WiFi Station
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    ////
    esp_wifi_set_ps(WIFI_PS_NONE);
    ////
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Configurando...");
    delay(100);

    pinMode(pinA, INPUT);
    pinMode(pinB, INPUT);
    pinMode(pinFC_Abierto, INPUT);
    pinMode(pinFC_Cerrado, INPUT);
    pinMode(bt1, INPUT);
    pinMode(bt2, INPUT);
    pinMode(pinIN3, OUTPUT);
    pinMode(pinIN4, OUTPUT);
    pinMode(led1, OUTPUT);

    // Configurar sensor de flujo

```

```

pinMode(SENSOR, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR), pulseCounter, RISING);

// Interrupción encoder
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinA), encoderISR, RISING);

detenerMotor();
digitalWrite(led1, LOW);
delay(100);

// Inicializar SD
SPI.begin(SD_SCK, SD_MISO, SD_MOSI, SD_CS);
if (!SD.begin(SD_CS))
{
    lcd.clear();
    lcd.print("SD FAIL");
    Serial.println("Error: No se detecta la SD");
    while (1);
}

// Crear archivo si no existe con encabezados
archivo = SD.open("/datos.csv", FILE_APPEND);
if (!archivo)
{
    lcd.clear();
    lcd.print("Error archivo SD");
    Serial.println("Error: No se puede abrir el archivo");
    while (1);
}

if (archivo)
{
    // archivo = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
    archivo.println("sensor_1%;sensor_2%;sensor_3%;sensor_4%;Prm_Humedad%;
Setpoint%;Error%;Pulsos;L/min;L/s;Total_Litros");
    archivo.close();
    Serial.println("Archivo creado");
}

lcd.clear();
lcd.print("Configuracion");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Lista");
delay(3000);
lcd.clear();
Control_inicial();
// Iniciar ESP-NOW

```

```

if (esp_now_init() != ESP_OK)
{
    Serial.println("Error inicializando ESP-NOW");
    return;
}

// Registrar callback
esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
Serial.println("Receptor listo. Esperando datos...");

}

void loop()
{
    val_bt1 = digitalRead(bt1);
    val_bt2 = digitalRead(bt2);
    if (val_bt1 == 1) aux = 0;
    if (val_bt2 == 1) aux = 1;

    volumen();
    verificar_conexion();
    mostrarDatosTiempoReal();

    // Promedio ponderado de humedad
    pro_hume = (sensor_1 * w1 + sensor_2 * w2 + sensor_3 * w3 + sensor_4 * w4)
/ (w1 + w2 + w3 + w4);
    error = setpoint - pro_hume;

    // Apertura deseada proporcional al error
    float apertura_deseada = constrain((setpoint - pro_hume) / setpoint *
100.0, 0.0, 100.0);

    // --- CASO ESPECIAL: humedad superior al setpoint -> cerrar totalmente --
-
    if (pro_hume >= setpoint) {
        apertura_deseada = 0.0; // fuerza cierre total
    }

    // Si la diferencia entre apertura actual y deseada es significativa (>2%)
    if (abs(apertura_deseada - por_aper) > 2.0)
    {
        float delta_porcentaje = abs(apertura_deseada - por_aper);
        if (apertura_deseada > por_aper)
        {
            // ----- ABRIR -----
            float tiempo_abrir = delta_porcentaje / 100.0 * 52000.0;
            unsigned long tiempo_inicio = millis();

```

```

while ((millis() - tiempo_inicio) < tiempo_abrir)
{
    // seguridad: si llega al final de carrera de abierto, se detiene
    if (digitalRead(pinFC_Abierto) == 1)
    {
        por_aper = 100;
        break;
    }
    movimiento(1);
    volumen();
    mostrarDatosTiempoReal();
    verificar_conexion();
    delay(100);
}
detenerMotor();
}
else
{
    // ----- CERRAR -----
    float tiempo_cerrar = delta_porcentaje / 100.0 * 43000.0;
    unsigned long tiempo_inicio = millis();

    while ((millis() - tiempo_inicio) < tiempo_cerrar)
    {
        // seguridad: si llega al final de carrera de cerrado, se detiene

```

- **Anexo B. Certificación.**

## CERTIFICACIÓN

Yo, Sr. Segundo Mario Pilco Toaza con C.I.: 0603486549 en calidad de Presidente de la Junta de Agua Secao Toma 1 'María Auxiliadora', CERTIFICO que la estudiante Anahí Morelly León Barahona con C.I.: 0604811638, de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Chimborazo, ha desarrollado e implementado el proyecto de investigación titulado: **"DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE COMPUERTAS BASADO EN EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE AGUA PARA PREVENIR EL SOBRE RIEGO EN LOS CULTIVOS DE LA JUNTA DE AGUA 'MARÍA AUXILIADORA' DE LA PARROQUIA URBANA YARUQUÍES, RIOBAMBA-ECUADOR"**. Este trabajo fue ejecutado durante el periodo comprendido entre el 1 de octubre y el 31 de octubre del presente año.

Como representante de la Junta, hago constar que he estado presente durante la fase de implementación y pruebas de campo. He verificado personalmente el funcionamiento y efectividad del sistema, mismo que ha demostrado cumplir con el propósito de regular el flujo y evitar el desperdicio de agua, beneficiando técnicamente a nuestra gestión de riego.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo la interesada hacer uso del presente documento en lo que se estime necesario.

Atentamente,



Sr. Segundo Mario Pilco Toaza