



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE RIEGO MEDIANTE UN SISTEMA
AUTOMATIZADO EN EL CULTIVO DE RAPHANUS SATIVUS BAJO
CONDICIONES DE INVERNADERO”

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Ambiental

AUTOR: KEVIN ELIAN ROBLES MOLINA

TUTORA: ING. PAOLA JACKELINE DUQUE SARANGO, PH.D.

Cuenca - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Kevin Elian Robles Molina con documento de identificación N° 0104622600, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 19 de septiembre del 2024

Atentamente,



Kevin Elian Robles Molina

0104622600

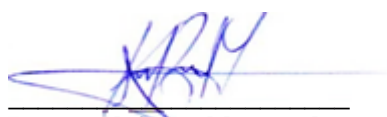
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Kevin Elian Robles Molina con documento de identificación N° 0104622600, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajo experimental: “Análisis de la eficiencia de riego mediante un sistema automatizado en el cultivo de Raphanus Sativus bajo condiciones de invernadero”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 19 de septiembre del 2024

Atentamente,



Kevin Elian Robles Molina

0104622600

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Paola Jackeline Duque Sarango con documento de identificación N° 1104257835, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE RIEGO MEDIANTE UN SISTEMA AUTOMATIZADO EN EL CULTIVO DE RAPHANUS SATIVUS BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO”, realizado por Kevin Elian Robles Molina con documento de identificación N° 0104622600, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo Experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 19 de septiembre del 2024

Atentamente,



Ing. Paola Jackeline Duque Sarango, MSc
1104257835

Índice

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1	Problema.....	10
1.2	Delimitación Geográfica.....	11
1.3	Pregunta de Investigación	11
1.4	Hipótesis.....	11
2	OBJETIVOS	12
2.1.1	General:	12
2.1.2	Específico:.....	12
3	MARCO TEÓRICO.....	12
	Recurso agua	12
3.1	Ciclo Hidrológico	13
3.2	Cuenca Hidrográfica.....	13
3.3	Funciones de una Cuenca hidrológica	14
3.4	Suelo.....	14
3.4.1	Propiedades físicas del suelo.....	15
3.4.2	Textura del suelo	15
3.4.3	Densidad aparente	15
3.4.4	Propiedades químicas del suelo	15
3.4.5	Propiedades biológicas del suelo	15
3.5	Ciclos biogeoquímicos.....	16
3.6	Evapotranspiración	16
	¿Qué es la evapotranspiración?.....	16
3.6.1	Factores que afectan la evapotranspiración	17
3.7	Método de medición.....	18
3.7.1	Directa	18
3.7.2	Indirecta.....	18
3.8	Importancia del agua en los sistemas de riego.....	19
3.8.1	Agricultura en la Provincia del Azuay	19
3.8.2	Necesidades hídricas del cultivo.....	20
3.1	Capacidad de Campo	20
3.2	Punto de marchitez permanente.....	20
3.3	Impacto del riego ineficiente en los recursos hídricos y en el medio ambiente	
	21	

3.3.1	Erosión	21
3.3.2	Desertización	21
3.4	Eficiencia en el recurso agua y su importancia para la sostenibilidad ambiental 21	
3.5	Sistemas de riego tradicionales	22
3.5.1	Tipos de sistemas de riego tradicional	23
3.6	Sistema de riego automatizado y controlado por computadora	23
3.6.1	Conceptos básicos de Python	23
3.6.2	Conceptos básicos de Arduino	24
3.6.3	Sistemas automatizados	24
3.6.4	Cableado	25
3.6.5	Programado	25
3.6.6	Riegos automatizados.....	25
3.7	Estrategias de programación de riego	25
3.8	Impacto social en el uso de sistemas automatizados.....	26
4	METODOLOGÍA.....	26
4.1	Materiales	26
4.1.1	Invernadero	27
4.1.2	Programa de Riego	28
4.1.3	Ecuaciones	29
4.1.4	Diseño del Sistema de riego mecanizado y automatizado.....	35
4.1.5	Sistemas de Conexión.....	36
4.1.6	Calibración del sensor.....	37
4.1.7	Monitoreo del consumo de agua	39
4.1.1	Flujogramas del sistema de riego mecanizado y automatizado	41
4.1.2	Instalación de equipos.....	41
4.1.3	Instalación de tuberías	42
4.1.4	Preparación del sustrato	43
4.1.5	Siembra de semillas	43
4.1.6	Control de malezas y técnicas agrícolas	45
5	RESULTADOS	45
5.1	Análisis del consumo de agua	45
	En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos del consumo total del agua entre ambos sistemas.	45

5.2	Frecuencia de Riego	46
5.3	Humedad del suelo en todo el ciclo del cultivo	48
5.4	Volumen de irrigación aplicado en el ciclo del cultivo	49
5.5	Análisis del rendimiento del cultivo.....	49
5.5.1	Número de Hojas	50
5.5.2	Altura de la planta	52
5.5.3	Longitud de la raíz.....	53
5.5.4	Peso del rábano sin hojas	54
6	DISCUSIÓN	56
7	CONCLUSIONES	57
8	RECOMENDACIONES	58
9	BIBLIOGRAFÍA	58
10	ANEXOS	61
10.1	Datos Agrometeorológicos	61
10.2	Invernadero.....	62
10.3	Vista en el interior del invernadero	62
10.4	Secado de muestra para calibración de sensor	63
10.5	Medición de la humedad del suelo con muestra de agua.....	63
10.6	Medición de la humedad del suelo con sustrato en estado húmedo	64
10.7	Medición de la humedad del suelo con sustrato en estado seco	64
10.8	Siembra de semillas	65
10.9	Primera semana- Riego mecanizado	65
10.10	Primera semana – Riego Automatizado	66
10.11	Raleo de cultivo - Primera semana	66
10.12	Segunda semana - Riego Mecanizado	67
10.13	Segunda semana - Riego Automatizado	67
10.14	Tercera semana- Riego Mecanizado.....	68
10.15	Tercera semana- Riego Automatizado.....	68
10.16	Cuarta semana- Riego mecanizado.....	69
10.17	Cuarta semana- Riego automatizado	69
10.18	Cosecha del rábano.....	70
10.19	Medida de la Altura de la planta.....	70
10.20	Peso del rábano	71

Índice de Tablas

Tabla 1. Listado de materiales	26
Tabla 2. Datos Agrometeorológicos	29
Tabla 3. Junta de desarrollo: Sensores de Humedad	36
Tabla 4. Junta de desarrollo: Conexiones en Arduino	36
Tabla 5. Junta de desarrollo. Conexiones con relé módulo	37
Tabla 6. Datos de referencia para la calibración del sensor de Humedad.	38
Tabla 7. Consumo de agua según el tipo de riego.....	40
Tabla 8. Comparación entre el volumen total de riego aplicado en cada parcela.....	45
Tabla 9. Frecuencia de riego entre sistemas de riego.	47
- Tabla 10. Riego mecanizado- Número de hojas.....	50
Tabla 11. Riego automatizado- Número de hojas	51
12.Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales- Número de hojas	51
Tabla 13. Riego mecanizado- Altura de la planta	52
Tabla 14. Riego automatizado- Altura de la planta	52
15. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales- Altura de la planta	52
Tabla 16. Riego mecanizado- Longitud de la raíz	53
Tabla 17. Riego automatizado- Longitud de la raíz	53
18. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales- Longitud de la raíz	54
Tabla 19. Riego mecanizado- Peso del rábano sin hojas.....	54
Tabla 20. Riego automatizado- Peso del rábano sin hojas.....	55
21. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales- Peso del rábano	55

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Delimitación Geográfica. Robles(2024).Parroquia Checa (Captura de pantalla). Recuperado de Google Earth.	11
Ilustración 2. Tipos de sistemas de Riego. Fuente: Jiménez, 2010.	23
Ilustración 3. Diseño de parcela neta. Fuente: Elaboración propia	28
Ilustración 4. Diagrama de conexión. Fuente: WayinTop,sf.....	36
Ilustración 5. Pruebas de calibración de sensor con muestra de agua. Fuente: Elaboración propia.....	38
Ilustración 6. Pruebas de calibración de sensor con sustrato en estado húmedo. Fuente: Elaboración propia	39
Ilustración 7. Pruebas de calibración de sensor con sustrato en estado seco. Fuente: Elaboración propia.....	39
Ilustración 8. Flujograma- sistema de riego mecanizado. Fuente: Elaboración propia .	41
Ilustración 9. Flujograma- sistema de riego automatizado. Fuente: Elaboración propia	41
Ilustración 10. Diagrama de instalación de componentes con un protoboard. Fuente: Elaboración Propia.....	42
Ilustración 11. Instalación de arduino, relé módulo, protoboard. Fuente: Elaboración propia.....	42

Ilustración 12. Humus de la empresa EMAC EP. Fuente: Elaboración propia.....	43
Ilustración 13. Siembra de semillas- Parcela automatizada. Fuente: Elaboración propia	44
Ilustración 14. Siembra de semillas- Parcela mecanizada. Fuente: Elaboración propia	44
Ilustración 15. Consumo total de agua entre sistemas de riego. Fuente: Elaboración propia.....	46
Ilustración 16. Porcentaje de Humedad relativa en el ciclo del cultivo. Fuente: Elaboración Propia.....	48
Ilustración 17. Dinámica del Volumen de riego aplicado por hilera- Sistema automatizado. Fuente: Elaboración propia	49
Ilustración 18. Comparación entre el peso del rábano con hojas.....	56
Ilustración 19. Comparación entre el peso del rábano sin hojas	56

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Temperatura media del aire a 2 m de altura	30
Ecuación 2. Pendiente de la curva de presión de vapor	30
Ecuación 3. Presión atmosférica.....	30
Ecuación 4. Constante psicrométrica	30
Ecuación 5.....	30
Ecuación 6.....	31
Ecuación 7. Presión de vapor de saturación.....	31
Ecuación 8. Presión real de vapor	31
Ecuación 9. Flujo del calor de suelo.....	31
Ecuación 10. Radiación solar o de onda corta.....	31
Ecuación 11. Radiación solar para un día despejado	32
Ecuación 12. Radiación neta de onda larga.....	32
Ecuación 13. Radiación neta de onda corta	33
Ecuación 14. Radiación neta.....	33
Ecuación 15. Evapotranspiración de referencia	33
Ecuación 16. Evapotranspiración del cultivo	34
Ecuación 17. Lámina neta.....	34
Ecuación 18. Volumen de riego	34
Ecuación 19. Método Volumétrico	39

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

Se estima que para el 2050 la producción agrícola deberá aumentar aproximadamente un 70%. Para satisfacer la demanda de agua en el futuro se deberá reasignar entre el 25 % y el 40 % de dicho recurso. Esta reasignación se prevé que provendrá de la agricultura (Banco mundial, 2022). Alrededor de 0.5% corresponde a fuentes de agua dulce aptas para la producción agropecuaria, consumo humano y ecológico. De estos sectores, la agricultura es el que consume más agua, representando globalmente alrededor de 69%. (FAO, 2002; UNESCO, 2003).

La falta de agua puede afectar la producción agrícola y, por lo tanto, la economía global. Además, el uso excesivo de agua puede tener un impacto negativo en el medio ambiente (Fundación Aquae, 2021).

Los sistemas de riego automatizado permiten un eficiente uso del agua basado en el balance hídrico del suelo para espacios reducidos (Rodríguez, et al, 2018). Teniendo en cuenta el cambio constante del clima por el cambio climático y la extensión de épocas de estiaje; es posible realizar un ajuste automático de la programación de riego en base a las necesidades de agua del cultivo, el estado del suelo y la previsión meteorológica (García, 2021).

Es necesario optar por nuevas tecnologías en el sector agrícola, donde se optimice procesos y sea de mayor facilidad la recopilación de información, ya que permite conocer los factores ambientales que inciden en el aumento de la producción y resiliencia de cultivo.

La investigación analiza una alternativa para la optimización del agua en sistemas de riego tradicionales, a partir de la evapotranspiración del cultivo y de las condiciones de humedad presentes en el suelo.

1.2 Delimitación Geográfica

El presente estudio se llevó a cabo en la zona rural del Cantón Cuenca, Provincia del Azuay, que comprende la Parroquia de Checa. Se analizó la meteorología y las características del suelo para estimar las necesidades hídricas en un cultivo de Raphanus sativus.

Ilustración 1. Delimitación Geográfica. Robles(2024).Parroquia Checa (Captura de pantalla). Recuperado de Google Earth.



1.3 Pregunta de Investigación

¿Es efectivo el sistema de riego automatizado en comparación con el sistema de riego tradicional, para la optimización del consumo de agua en el cultivo de Raphanus Sativus?

1.4 Hipótesis

Los sistemas de riego automatizados permiten optimizar el consumo del agua, sin alterar el rendimiento del cultivo a través de sensores de humedad y un programa de riego basado en las condiciones físicas del suelo, la meteorología y el tipo de cultivo.

2 OBJETIVOS

2.1.1 General:

Evaluar la eficiencia de riego en el cultivo de Raphanus sativus bajo condiciones controladas de invernadero utilizando un sistema automatizado de irrigación frente al sistema de cultivo tradicional

2.1.2 Específico:

Diseñar un programa de riego basado en las condiciones de humedad y evapotranspiración del cultivo experimental

Implementar un kit en sistema de riego automatizado bajo condiciones de invernadero para control y monitoreo en los sistemas de irrigación

Analizar el rendimiento de los cultivos en relación a la eficiencia de riego, mediante los requerimientos hídricos implementados en cada sistema

3 MARCO TEÓRICO

Recurso agua

El agua es una sustancia de capital importancia para la vida con excepcionales propiedades consecuencia de su composición y estructura. Es una molécula sencilla formada por tres pequeños átomos, uno de oxígeno y dos de hidrógeno (Carbajal and González 2013). El agua se está presente en diferentes estados. En su estado líquido fluye por ríos, arroyos y océanos. En su aspecto sólido se encuentra en los polos, o cuando los lagos y ríos se congelan y se convierten en hielo. Por último, el agua en forma gaseosa es el vapor y lo encontramos en la atmósfera.(Fundación AQUAE 2020).

Aproximadamente el 97% de toda el agua en la Tierra está en los océanos. El otro 3% se mantiene como el agua dulce en los glaciares y capas

de hielo, las aguas subterráneas, lagos, suelos, la atmósfera, y dentro de la vida (Geográfica De Lima n.d.-a).

El agua presente en los suelos es sumamente importante para el desarrollo de los ecosistemas terrestres, especialmente para las plantas. El agua interviene por una parte en la formación del suelo, facilitando los procesos de meteorización fisicoquímica y translocación de sustancias, y por otra parte en la fertilidad del mismo, transportando nutrientes y/o contaminantes (Pachés 2019).

3.1 Ciclo Hidrológico

Es un modelo conceptual que describe el almacenamiento y movimiento del agua entre la Biosfera, Atmósfera, Litosfera, Hidrosfera. En nuestra Atmósfera, se mueve desde un depósito o reservorio a otro, a través de los diferentes procesos entre los cuales tenemos: Evaporación, Condensación, Precipitación, Sedimentación, Escorrentía, Infiltración, Sublimación, Transpiración, Fusión, y flujo de agua subterránea (Geográfica De Lima n.d.-a)

3.2 Cuenca Hidrográfica

En la cuenca hidrográfica, se distinguen por lo general tres sectores característicos: Alto, Medio y Bajo. En función a las características topográficas del medio, pueden influir en sus procesos hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos (citado por Ordoñez 2015, de Llerena, 2003).

- Cuenca alta

La cuenca alta corresponde a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por los parteaguas o las divisorias de aguas (Gobierno de México, sf).

- Cuenca Medio

Donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en donde el río principal mantiene un cauce definido (Geográfica De Lima n.d.-b).

- Cuenca Bajo

Es la zona baja donde los ríos pierden velocidad, fuerza y sedimentan todos los materiales recogidos formando llanuras ((Duque-Sarango, P., & Hernández 2020; Duque-Sarango and Pinos 2022).

3.3 Funciones de una Cuenca hidrológica

Vásconez, et al. 2019 indica las siguientes funciones que cumple una cuenca hidrológica.

- Función ambiental: Regula la recarga hídrica, constituyen sumideros de CO₂ y conserva la biodiversidad.
- Función ecológica: Provee hábitat para la fauna, la flora y tiene influencia sobre la calidad física y química del agua.
- Función hidrológica: Drena el agua de la precipitación, recarga las fuentes de agua subterránea y de agua superficial.

3.4 Suelo

Es considerado también como un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera y con los estratos que están debajo de él, que influye en el clima y en el ciclo hidrológico del planeta, y que sirve como medio de crecimiento para diversos organismos (Pérez 2023). Aporta nutrimentos y otros compuestos a las plantas y estas luego proporcionan la materia orgánica necesaria para mantener la vida, la fertilidad, y la estructura del suelo (Garro 2016).

3.4.1 Propiedades físicas del suelo

3.4.2 Textura del suelo

Representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; arena gruesa, arena media, arena fina, limo, arcilla. (Rucks, et al. 2004).

3.4.3 Densidad aparente

Cuando la densidad aparente de suelo aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces. La DA es afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente de materia orgánica (Salamanca Jiménez, Siavosh, and Khalajabadi s.f.).

3.4.4 Propiedades químicas del suelo

Afectan su composición química (macro y micro nutrientes), entre las cuales podemos mencionar: pH, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), conductividad eléctrica (CE), el contenido de materia orgánica (MO) (Citado por López 2021, de López y Estrada, 2015).

3.4.5 Propiedades biológicas del suelo

Están compuesto principalmente de microorganismo, artrópodos, invertebrados, entre otros. Cada organismo realiza una función específica. Algunos, son fotosintéticas, otros, son capaces de fijar nitrógeno atmosférico. Sin embargo, la mayoría de los organismos del suelo utilizan la materia orgánica o la mineral como fuente de nutrientes y energía. Muchos están especializados en desintegra sustancias inorgánicas, que pueden ser devueltas a la atmósfera o arrastradas con las aguas de drenaje.

Los microorganismos del suelo –bacterias, arqueas, hongos, virus y protozoos– representan solo el 0,1–2 % del volumen total del suelo en los pastizales, sin embargo, están involucrados en el 90 % de las funciones del ecosistema (Gobierno de Argentina, 2023).

3.5 Ciclos biogeoquímicos

El suelo puede considerarse como un reactor bio-físico-químico en donde se descompone en material orgánico y es reciclado dentro de él gracias a los ciclos biogeoquímicos. Son los distintos mecanismos que tiene la naturaleza para hacer circular los elementos químicos de unos seres vivos a otros permitiendo que siempre esté disponible.

Los ciclos biogeoquímicos más destacados son:

- Ciclo del agua
- Ciclo del oxígeno
- Ciclo del carbono
- Ciclo del nitrógeno
- Ciclo del fósforo
- Ciclo del azufre
- Ciclo del potasio
- Ciclo del calcio

3.6 Evapotranspiración

¿Qué es la evapotranspiración?

La evapotranspiración (ET) de un cultivo será la suma del agua del suelo que es utilizada por las plantas en el proceso de transpiración , y la evaporación

del agua del suelo que rodea la planta. Para determinar la evapotranspiración de un cultivo (ETc) es necesario partir de la evapotranspiración de referencia (ETo) para un determinado cultivo, utilizando los coeficientes de cultivo.

3.6.1 Factores que afectan la evapotranspiración

La evapotranspiración se ve afectada por múltiples factores como:

6.1.1.1. Climatológicos

- Radiación solar
- Humedad Relativa
- Temperatura
- Velocidad del viento

6.1.1.2. Características del suelo

- Textura
- Estructura
- Densidad
- Composición Química

6.1.1.3. Factores vegetales

- Tipo de plantación
- Profundidad de la raíz
- Densidad foliar
- Altura de las plantas
- Estado de crecimiento

(Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación España, sf).

3.7 Método de medición

3.7.1 Directa

Esta técnica mide la evapotranspiración en tiempo real para cualquier tipo de cultivo vegetal en función del suelo, clima y disponibilidad del agua de la zona de estudio (Dávila, 2015). Los equipos suelen ser muy costosos por lo que no se aplica de manera común. Entre los equipos más conocidos, tenemos lo siguiente:

- Evapotranspirómetros
- Lisímetros
- Parcelas y cuencas experimentales
- Perfiles de humedad del suelo

3.7.2 Indirecta

Se aplican a través de ecuaciones empíricas y modelos computacionales (SIG).

6.1.1.4. Métodos micrometeorológicos (microclima)

Estiman la evapotranspiración en cortos intervalos de tiempo (< 30 min).

6.1.1.5. Método Climatológicos

Utilizan datos semanales o mensuales para estimar la evapotranspiración. El siguiente método presenta el menor porcentaje de error y los resultados más próximos en términos de resolución:

- Método de Penman Monteith

La estimación precisa de la evapotranspiración de referencia permite obtener valores más reales sobre las necesidades hídricas de los cultivos.(Ortiz

y Chile A. 2020). Se recomienda como método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia. El método requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (00 Fao 1990).

3.8 Importancia del agua en los sistemas de riego

3.8.1 Agricultura en la Provincia del Azuay

El fértil suelo azuayo es propicio para la agricultura. En sus valles centrales se cultiva maíz, cereales, hortalizas y una gran variedad de frutas; en el extremo occidental de la cordillera se obtienen productos tropicales como caña de azúcar, algodón, café, entre otros. Analizando los mercados, destino de los productos que cultivan las diferentes organizaciones en la provincia, se evidencia que la mayor cantidad está destinada al mercado local, representado en el 83,70%; la diferencia, es decir, el 16,30% se destina a los mercados provinciales (Duque Sarango, Heras Naranjo, and Lojano Criollo 2018; Seminario-Calle et al. 2023) (AGROAZUAY,2021).

Un millón 408 mil 414 dólares invirtieron en Azuay el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) -a través de la Subsecretaría de Riego y Drenaje- para construir 323 microreservorios, además de estudios de riego y riego tecnificado para pobladores de esa provincia. Augusto Vélez, director Zonal 6 de Riego y Drenaje, manifestó que “la construcción de los microreservorios permite irrigar campos agrícolas y ganaderos para conservar y mitigar la necesidad del líquido vital en épocas de estiaje (Gobierno del Ecuador, 2021).

Las cuencas hidrográficas del Azuay se nutren de las fuentes de agua ubicadas por encima de los 2.800 msnm y actualmente más del 35% del área

del Macizo del Cajas esta concesionado para minería. Otro 35% sufre de los efectos de la ampliación de la frontera agrícola. En total, el 70% se encuentra en grave riesgo.

3.8.2 Necesidades hídricas del cultivo

Es el volumen de agua que necesita la planta para alcanzar su potencial de crecimiento, rendimiento y multiplicación. Tiene una relación directa con la frecuencia y la intensidad del riego.

3.1 Capacidad de Campo

Es el contenido de agua de un suelo, después que ha sido mojado abundantemente y se ha dejado drenar libremente, evitando las pérdidas por evapotranspiración. Normalmente este contenido de agua se toma alrededor de 24 a 48 horas después de un riego o lluvia abundante, teniendo la precaución de cubrir el suelo con un plástico para evitar la evaporación (Silva, et al. 2015).

Se dice que un suelo tiene una buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación del sistema radicular de las plantas y su nutrición. (Rucks). A medida que aumenta la materia orgánica y el espacio poroso, disminuye la densidad aparente y viceversa (Citado por Iniestra, et al. n.d.-a).

3.2 Punto de marchitez permanente

Es el contenido de agua de un suelo al cual la planta se marchita y ya no recupera su turgencia al colocarla en una atmósfera saturada durante 12 horas (Silva, et al. 2015).

3.3 Impacto del riego ineficiente en los recursos hídricos y en el medio ambiente

Un suelo contaminado desencadena una serie de acontecimientos. Cambia la biodiversidad del suelo y disminuye la cantidad de materia orgánica y el poder filtrante que posee. Además, contamina las aguas subterráneas y el agua almacenada en el suelo, provocando un desequilibrio de nutrientes en ambas.

3.3.1 Erosión

La mitad de la tierra habitable del planeta se usa para agricultura; y se produce comida que nunca se comerá en el 28% de esa tierra. Estos alimentos causan el 8% de las emisiones de GEI a nivel mundial (Iturralde and Hogan, 2022).

3.3.2 Desertización

La desertificación es la degradación de la tierra en regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores, incluso variaciones climáticas y actividades humanas (Asensi et al. 2019; Paola Duque-Sarango, Patiño, and López 2019).

3.4 Eficiencia en el recurso agua y su importancia para la sostenibilidad ambiental

La eficacia de un sistema de riego por gravedad es sólo del 50%, lo que supone un resultado negativo para garantizar una sostenibilidad medioambiental. Tres de los principales problemas a los que se enfrenta la gestión del agua en la actualidad son la contaminación, la escasez y el cambio climático. Es factible modificar la forma en que se gestiona el agua, aumentando su eficacia y limitando su uso en diversas actividades dependientes del ser

humano, como los procesos residenciales e industriales, la agricultura, la ganadería y el aseo personal. Esto puede garantizar que las personas más vulnerables tengan acceso al recurso y a su vez disminuir los impactos producidos sobre el suelo, el agua, la fauna y la vegetación del medio ambiente.

3.5 Sistemas de riego tradicionales

Los sistemas de riego tradicional son metodologías culturales que se han ido adoptando y modificando a través de los años.

Para conocer un caudal de salida (riego), es necesario contar con un depósito (balde) de CANAL volumen conocido en el cual se colecta el agua, anotando el tiempo que demora en llenarse; dividiendo el volumen de agua recogido en el recipiente por el tiempo (en segundos) que demoró en llenarse, se obtiene el caudal en litros por segundo (P Duque-Sarango et al. 2019; Montalvo-Ochoa et al. 2020). Esta operación se repite 2 o 3 veces y se promedia con el fin de asegurar una mayor exactitud.

$$Q = \frac{v}{t}$$

Es posible conocer el volumen de agua que se aplica en cada hilera mediante la ecuación

$$V = Q \cdot t$$

Donde:

V= Volumen de agua necesario por irrigación (Parcela neta y/o por surcos)

Q= Caudal de salida del agua

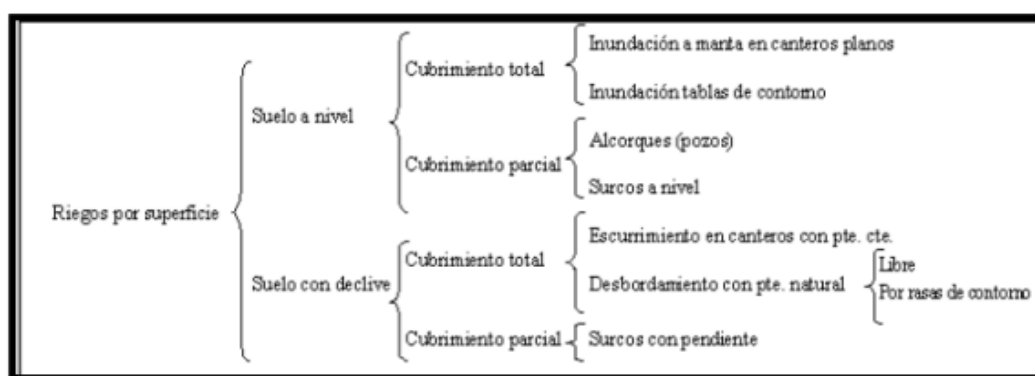
t= Tiempo de irrigación

3.5.1 Tipos de sistemas de riego tradicional

Actualmente existen diferentes sistemas de riego recomendables para cada región y/o cultivo, algunos de ellos son: riego por goteo, por aspersión, por bombeo y por gravedad, entre otros (Gobierno de México, 2021).

Figura 1. Tipos de sistemas de riego. Fuente: Jiménez, 2010

Ilustración 2. Tipos de sistemas de Riego. Fuente: Jiménez, 2010.



Eficiencia Hídrica en sistemas de riego tradicional

3.6 Sistema de riego automatizado y controlado por computadora

3.6.1 Conceptos básicos de Python

El software libre se ha convertido en uno de los movimientos tecnológicos de mayor auge en el siglo XXI. Para su desarrollo ha sido necesario contar con un grupo de herramientas que hagan óptima su utilización y sean fáciles de aprender. Python es un lenguaje de programación que cumple con lo planteado y se viene perfilando como una opción recomendada para el desarrollo de software libre.

A través de Python es posible desarrollar las siguientes actividades:

- Desarrollo de aplicaciones web con frameworks como Django o Flask.
- Automatización de tareas y procesamiento de datos.

- Machine learning y deep learning con librerías como TensorFlow y PyTorch.
- Desarrollo de juegos con librerías como Pygame.

3.6.2 Conceptos básicos de Arduino

Arduino es una plataforma de electrónica/software abierto (código abierto – open source) para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos (PUCE, 2019).

3.6.3 Sistemas automatizados

La automatización de un proceso consiste en la sustitución de aquellas tareas tradicionalmente manuales por las mismas realizadas de manera automática por máquinas, robots o cualquier otro tipo de automatismo. De este modo, gracias al uso adicional de sensores, controladores y actuadores, así como de métodos y algoritmos de conmutación, se consigue liberar al ser humano de ciertas tareas (Anon n.d.-d).

Agiliza las tareas rudimentarias y repetitivas y puede convertir varios procesos empresariales similares en una sola acción con unas pocas pulsaciones de teclas. Entre las ventajas conocidas de la automatización de los procesos se encuentra el aumento de la productividad y la eficiencia (Anywhere, s. f.). La automatización utiliza tecnologías para monitorear y controlar máquinas y dispositivos.

3.6.4 Cableado

Utiliza circuitos eléctricos, contactos eléctricos, relés eléctricos y demás elementos que serán conectados siguiendo una secuencia lógica de control para su funcionamiento (Zapata, Topón-Visarrea & Tipán, 2021).

3.6.5 Programado

Reemplaza los elementos de mando, tales como relés eléctricos, contactores auxiliares, temporizadores, contadores, etc; por PLC's. Para que pueda funcionar el sistema con lógica programada, se debe crear un software en los lenguajes de programación que manejan los fabricantes de PLC's. Cualquier cambio en la programación no necesariamente incluye una modificación en el cableado de las entradas y salidas al PLC

3.6.6 Riegos automatizados

El riego automático es un sistema para distribuir agua a las plantas de manera controlada, por medio de sistemas de aspersión o goteo. Este sistema permite distribuir el agua en la ubicación, cantidad, frecuencia y horario que se desee.

El sistema de riego automático, se podría aplicar la solución a cualquier tipo de cultivo, donde la extensión de terreno, no sea muy grande, es decir, aplicado en las áreas verdes de los hogares. El uso de la plataforma arduino, contribuye a la investigación por tener precios accesibles en la implementación de los sistemas de control y además brinda una flexibilidad de crear programas en comparación con otras plataformas (Guijarro-Rodríguez et al. 2018.).

3.7 Estrategias de programación de riego

El concepto de riego deficitario controlado consiste en utilizar menos agua durante los periodos fenológicos donde el rendimiento y la calidad de los cultivos

no se ven afectados (déficit hídrico controlado). Las estrategias de riego deficitario dependerán de varios factores como el tipo de suelo, cultivo, meteorología, etc. Las más utilizadas son la siguientes:

- Riego suplementario o complementario
- Riego deficitario de baja frecuencia
- Riego parcial y alternamente
- Riego deficitario sostenido
- Riego deficitario controlado

3.8 Impacto social en el uso de sistemas automatizados

La sociedad puede beneficiarse de los sistemas automatizados mediante la automatización de tareas cotidianas, registro de datos, procesos de comunicación entre otros.

4 METODOLOGÍA

4.1 Materiales

Tabla 1. Listado de materiales

INSUMOS	CANTIDAD
Arduino y Relé Módulo	1
Kit de sensores para riego automatizado	1

Caja de ELEGOO 120 PCCS	1
Caja de soporte de batería (Arduino)	1
Cable Flexible #16 (30 m)	1
Tubos de PVC	13 metros
Recipientes de 10 L	4
Humus	25 lb
Semillas (1 libra)	1 onz
Baterías AA	2 pares de tipo AA
Protoboard	1

Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Invernadero

El área total del invernadero es de 22, 50 m^2 , de 2,5 metros de ancho por 9 metros de largo. Se obtuvieron dos parcelas útiles de 1,50 m^2 y parcelas netas de 1,20 m^2 con 4 hileras ubicadas entre 20 cm cada una.

Ilustración 3. Diseño de parcela neta. Fuente: Elaboración propia



4.1.2 Programa de Riego

Para calcular la evapotranspiración de referencia, se procede a utilizar el método de Penman-Monteith modificada para ecosistemas de páramos, realizado por Córdova María, (2013). A partir de la evapotranspiración de referencia, se determinaron los requerimientos de agua según el tipo de cultivo (ET_c) (Raphanus Sativus). En este caso, la parcela (A) aplicó los requerimientos hídricos (ET_c) de forma diaria, mientras que en la parcela (B) se aplicaron diferentes volúmenes de riego, según el contenido de humedad en el suelo.

Mediante la página National Aeronautics and Space Administration (NASA) se lograron obtener los datos agrometeorológicos a partir de coordenadas geográficas (Ubicación del invernadero).

Tabla 2. Datos Agrometeorológicos

Datos	
Temperatura máxima	18.43°C
Temperatura mínima	6.31°C
Humedad máxima	91.50%
Humedad mínima	82.81%
Velocidad del viento	1.5 m/s

Fuente: Elaboración propia

Los datos fueron recopilados únicamente del mes de Junio, desde el año de 2001 hasta 2021. Mediante un archivo CSV, se subió la información al lenguaje de programación (VSCode) con el fin de obtener resultados automáticos de la evapotranspiración de referencia como los requerimientos hídricos.

4.1.3 Ecuaciones

Las ecuaciones aplicadas al programa de riego son la siguientes:

- Método de Penman-Monteith (Evapotranspiración del cultivo de referencia)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (\text{Ecuación 15})$$

En donde:

ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/día]

Rn : radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m² .día]

G : flujo del calor de suelo [MJ/m² .día]

T : temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]

e_s : presión de vapor de saturación [kPa]

e_a : presión real de vapor [kPa]

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

γ : constante psicrométrica [kPa/°C]

z : altura sobre el nivel del mar (m)

Los valores anteriores se obtienen de la siguiente manera:

Ecuación 1. Temperatura media del aire a 2 m de altura

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

$$T = \frac{18,43 + 6,31}{2}$$

$$T = 12.37 \text{ [°C]}$$

Ecuación 2. Pendiente de la curva de presión de vapor

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0.6108 * e^{\frac{17.27 (12.37)}{12.37 + 237.3}} \right]}{(12.37 + 237.3)}$$

$$\Delta = 23.59 \text{ [kPa/°C]}$$

Ecuación 3. Presión atmosférica

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065(2496.1)}{293} \right)^{5.26}$$

$$P = 75.07 \text{ [kPa/°C]}$$

Ecuación 4. Constante psicrométrica

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} (75.07)$$

$$\gamma = 0.04992 \text{ [kPa/°C]}$$

Ecuación 5

$$e^o(T_{max}) = 0.6108 * e^{\frac{17.27 (18.43)}{18.43 + 237.3}}$$

$$e^o(T_{max}) = 2.12$$

Ecuación 6

$$e^o(T_{min}) = 0.6108 * e^{\frac{17.27 (6.31)}{6.31+237.3}}$$

$$e^o(T_{min}) = 0.96$$

Ecuación 7. Presión de vapor de saturación

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2}$$

$$e_s = \frac{2.12 + 0.96}{2}$$

$$e_s = 1.54 \text{ [kPa]}$$

Ecuación 8. Presión real de vapor

$$e_a = \frac{e^o(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + e^o(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100}}{2}$$

$$e_a = \frac{0.96 \frac{91.5}{100} + 2.12 \frac{82.81}{100}}{2}$$

$$e_a = 1.32 \text{ [kPa]}$$

Ecuación 9. Flujo del calor de suelo

$$G_{mes,i} = 0.14[T_{mes,i} - (T_{mes,i} - 1)]$$

Al no contar con valores observados del flujo de calor en el suelo (G) se debe asumir el valor de cero para periodos diarios. De esta manera se obtiene el valor de la ETo para cada uno de los días del periodo de estudio (Córdova, 2013).

- Radiación neta

Ecuación 10. Radiación solar o de onda corta

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a$$

$$R_s = 0.17 \sqrt{(18.43 - 6.31)} 36.8$$

$$R_s = 21.78 \text{ [MJ/m}^2 \text{ .día]}$$

Donde:

R_s : Radiación solar o de onda corta [MJ/m² .día]

k_{RS} : Coeficiente de ajuste (0,16-0,19) [°C-0,5].

R_a : Radiación extraterrestre [MJ/m² .día].

Ecuación 11. Radiación solar para un día despejado

$$R_{so} = (0.75 * 10^{-5} Z) R_a$$

$$R_{so} = (0.75 * 2 * 10^{-5} (2496.1) * 36.8$$

$$R_{so} = 29.44 \text{ [MJ/m}^2 \text{ .día]}$$

Donde:

R_{so} : Radiación solar para un día despejado [MJ/m² .día]

Ecuación 12. Radiación neta de onda larga

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max, k^4} + T_{min, k^4}}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$$R_{nl} = 4.903 \times 10^{-9} \left(\frac{35.44 + 29.91}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{1.32}) \left(1.35 \frac{21.78}{29.44} - 0.35 \right)$$

$$R_{nl} = 3.81 \text{ [MJ/m}^2 \text{ .día]}$$

Donde:

R_{nl} : Radiación neta de onda larga [MJ/m² .día]

T_{max, k^4} : Temperatura máxima [K=°C+273,16]

T_{min, k^4} : Temperatura mínima [K=°C+273,16]

σ : constante de Stefan-Boltzmann [$4,903 \times 10^{-9}$ MJ/K⁴ .m⁴ .día]

Ecuación 13. Radiación neta de onda corta

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

$$R_{ns} = (1 - 0.23) * 21.78$$

$$R_{ns} = 16.77 \text{ [MJ/m}^2 \text{ .día]}$$

Donde:

R_{ns} : Radiación neta de onda corta [MJ/m² .día]

α : Albedo de la superficie

Ecuación 14. Radiación neta

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_n = 16.77 - 3.81$$

$$R_n = 12.96 \text{ [MJ/m}^2 \text{ .día]}$$

Donde:

R_n : Radiación neta

R_{ns} : Radiación neta de onda corta [MJ/m² .día]

R_{nl} : Radiación neta de onda larga [MJ/m² .día]

Ecuación 15. Evapotranspiración de referencia

$$ET_o = \frac{0.408(23.59)(12.96 - 0) + (0.04992) \frac{900}{12.37 + 273} (1.5)(1.54 - 1.32)}{23.59 + 0.04992 (1 + 0.34(1.5))}$$

$$ET_o = 5.28 \text{ [mm/día]}$$

- Requerimientos de riego por tipo de cultivo

Ecuación 16. Evapotranspiración del cultivo

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

$$ET_c = 0.95 \times 5.28$$

$$ET_c = 5.01 \text{ [mm/día]}$$

Donde:

ET_c= Evapotranspiración del cultivo [mm/día]

ET_o= Evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/día]

K_c= Coeficiente de Cultivo

Ecuación 17. Lámina neta

$$Ln = \frac{ET_c \times \text{área} \times F_{\text{cobertura}}}{100}$$

$$Ln = \frac{5.01 \times 1.2 \times 40}{100}$$

$$Ln = 2.41 \text{ (mm)}$$

Donde:

Ln= Lámina neta de riego (mm)

ET_c= Evapotranspiración del cultivo [mm/día]

Área: área de cultivo (m²)

F_{cobertura}: Factor de cobertura

Ecuación 18. Volumen de riego

$$Vr = \frac{Ln}{Ef}$$

$$Vr = \frac{2.41}{0.5}$$

$$Vr = 4.81 \text{ (mm)}$$

Donde:

Vr = Volumen de riego (mm)

Ef = Eficiencia de riego

El volumen de riego que se necesita aplicar en la siembra de Raphanus sativus con una parcela útil de $1,20 \text{ m}^2$ es de 4.81 litros.

El volumen de riego total estimado en el sistema de riego mecanizado es de:

$$VrTotal = 4.81 * 30 \text{ dias}$$

$$VrTotal = 144.3 \text{ litros}$$

El volumen de riego por hilera se define de la siguiente manera:

$$VrHilera = \frac{VrTotal}{\#Hileras} = \frac{4.81}{4}$$

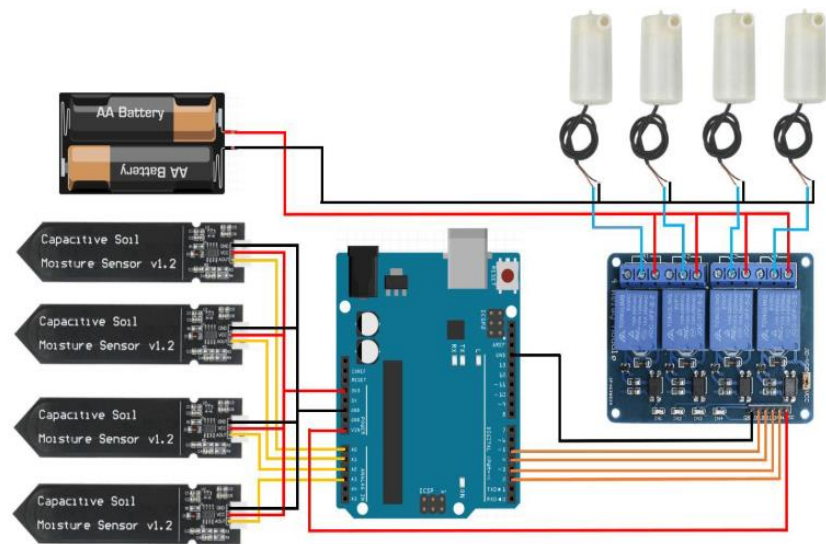
$$VrHilera = 1.20 \text{ L}$$

4.1.4 Diseño del Sistema de riego mecanizado y automatizado

Al adquirir un kit de riego automatizado (WayinTop). Se obtuvo un manual de código abierto (GitHub), con instrucciones de instalación, modificación y uso del sistema de riego (Lenguaje C/C++).

Con Visual Studio Code se correlacionó los resultados brindados por el sensor humedad del suelo (arduino) con las ecuaciones de evapotranspiración (Python) para así ejecutar el riego inteligente.

Ilustración 4. Diagrama de conexión. Fuente: WayinTop,sf



4.1.5 Sistemas de Conexión

Tabla 3. Junta de desarrollo: Sensores de Humedad

Junta de desarrollo en Arduino	
Sensor de Humedad del Suelo	A0←--→AOUT
Uno	3.3 V←--→VCC
	GND←--→GND

Fuente: WayinTop, sf

Tabla 4. Junta de desarrollo: Conexiones en Arduino

Junta de Desarrollo	4 canal 5V Relé Módulo
VCC	VIN
GND	GND
D2	IN1
D3	IN2

D4	IN4
D5	IN5

Fuente: WayinTop, sf

Tabla 5. Junta de desarrollo. Conexiones con relé módulo

4 canal 5V Relé Módulo	Bombas de agua de 2.5-6 V
K1	Bomba de agua 1
K2	Bomba de agua 2
K3	Bomba de agua 3
K4	Bomba de agua 4

Fuente: Elaboración propia

4.1.6 Calibración del sensor

La capacitancia entre electrodos mide el contenido de humedad del suelo; en suelos muy húmedos, tendremos una capacitancia baja, y en suelos muy secos, una capacitancia alta. Este método aumenta significativamente la vida útil del sensor (NAYLAMP MECHATRONICS 2022).

La calibración de sensor se basa en la del método gravimétrico. Se hace la caracterización y el registro de datos de gravimetría por medio de la muestra del terreno que se busca estudiar. Inicialmente el terreno pasa por un proceso de secado para extraer toda la humedad presente (Albino, n.d.).

Para calibrar el sensor, se estableció un rango del 0 al 100%, donde se promedió mediciones de muestras en distintas condiciones.

Tabla 6. Datos de referencia para la calibración del sensor de Humedad.

Calibración del sensor de Humedad		
Muestra	Dato brindado por el sensor	Porcentaje
Vaso con agua	0.3167	100%
Vaso con muestra de humedad luego de 24 horas	0.4448	71.2
Vaso con muestra seca	0.5523	0%

Fuente: Elaboración propia

Al calibrar el sensor, se tomaron las siguientes consideraciones:

- Ubicación y número de dispositivos por parcela neta: 1 sensor de humedad por parcela
- Intervalo de profundidad del sensor: 4 cm
- Almacenamiento de datos: Archivo CSV
- Conocer los rangos de humedad (60%-80%) que se necesita aplicar al sistema automatizado
- Horario de riego: 17:00- 18: 00 pm

Ilustración 5. Pruebas de calibración de sensor con muestra de agua. Fuente: Elaboración propia



```

PROBLEMS  OUTPUT  TERMINAL  PORTS  DEBUG CONSOLE
humedad : 0.3617
humedad : 0.3636
humedad : 0.3582
humedad : 0.347
humedad : 0.3314
humedad : 0.3167
humedad : 0.3138
humedad : 0.3157
humedad : 0.3177
humedad : 0.3167
  
```

Ilustración 6. Pruebas de calibración de sensor con sustrato en estado húmedo. Fuente: Elaboración propia

```

PROBLEMS OUTPUT TERMINAL PORTS DEBUG CONSOLE
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448
humedad : 0.4448

```

Ilustración 7. Pruebas de calibración de sensor con sustrato en estado seco. Fuente: Elaboración propia

```

PROBLEMS OUTPUT TERMINAL PORTS DEBUG CONSOLE
humedad : 0.5572
humedad : 0.5582
humedad : 0.5572
humedad : 0.5582
humedad : 0.5572
humedad : 0.5582
humedad : 0.5572
humedad : 0.5582
humedad : 0.5572
humedad : 0.5582

```

4.1.7 Monitoreo del consumo de agua

Antonio·bello et al. 2000. menciona que el método volumétrico permite medir pequeños caudales de agua, como en los surcos de riego. Para ello es necesario contar con un depósito (balde) de volumen conocido en el cual se colecta el agua, anotando el tiempo que demoró en llenarse. Esta operación puede repetirse 2 ó 3 veces y se promedia, con el fin de asegurar una mayor exactitud.

Se aplicó el método volumétrico para conocer el caudal que genera una bomba de agua, donde el volumen de irrigación (por hilera) se puede controlar según el tiempo de ejecución del programa.

Al realizar la prueba del método volumétrico, se obtuvo los siguientes resultados:

Ecuación 19. Método Volumétrico

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{1}{27.03}$$

$$Q = 0.037 \text{ L/s}$$

Donde:

Q: Caudal (L/s)

V: Volumen del recipiente (Litros)

t: Tiempo en que tarda llenar un recipiente de 1 litro. (segundos)

Tabla 7. Consumo de agua según el tipo de riego

Tipo de Riego	Caudal (Q)	Volumen por hilera (L)	Tiempo (S)	Volumen de Riego Total (L)
Manual Mecanizado	0.037	1.2025	32.5	4.81
Riego Inteligente (100% optimización- >80% de Humedad en el suelo)	0.037	0	0	0
Riego Inteligente (80% optimización- 60% de Humedad en el suelo)	0.037	0.962	26	3.848
Riego Inteligente (60% optimización-60 a 80% de humedad en el suelo)	0.037	0.7215	19.5	2.886

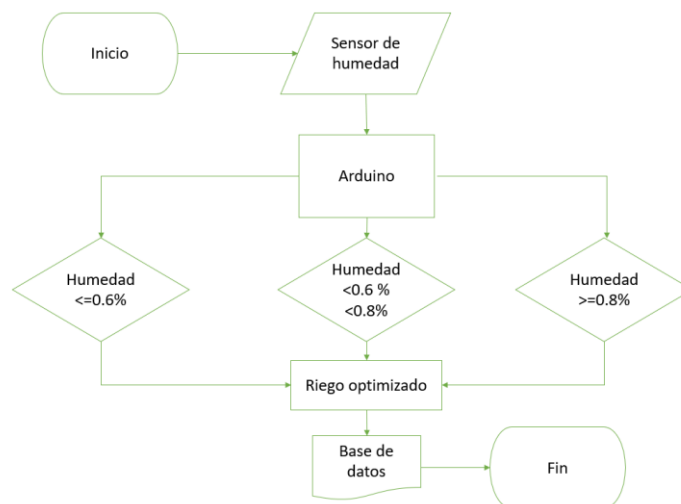
Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Flujogramas del sistema de riego mecanizado y automatizado

Ilustración 8. Flujograma- sistema de riego mecanizado. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 9. Flujograma- sistema de riego automatizado. Fuente: Elaboración propia



4.1.2 Instalación de equipos

Se procedió a instalar el Arduino con sus componentes en base al diagrama de conexión (Ilustración 10). Cabe mencionar que fue necesario el uso de un protoboard para el funcionamiento de las bombas. De igual manera se utilizaría el protoboard si es el caso de emplear dos o más sensores de humedad, sin embargo, en el trabajo de investigación se ejecutó solo un sensor de humedad.

Ilustración 10. Diagrama de instalación de componentes con un protoboard. Fuente: Elaboración Propia

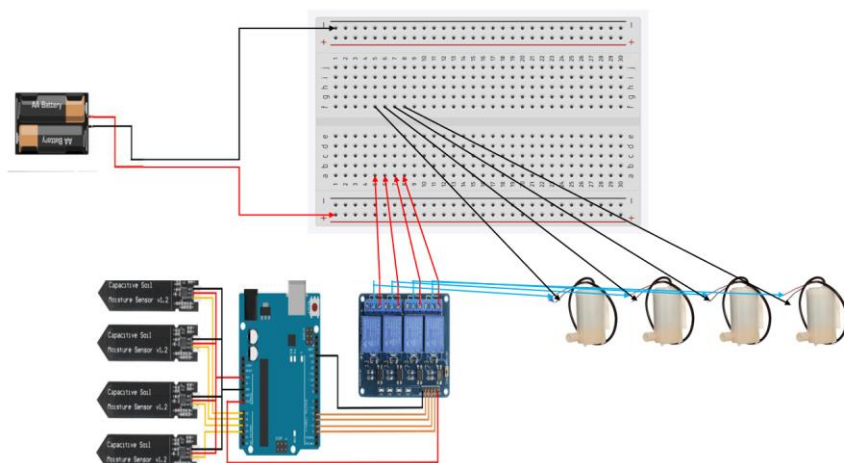
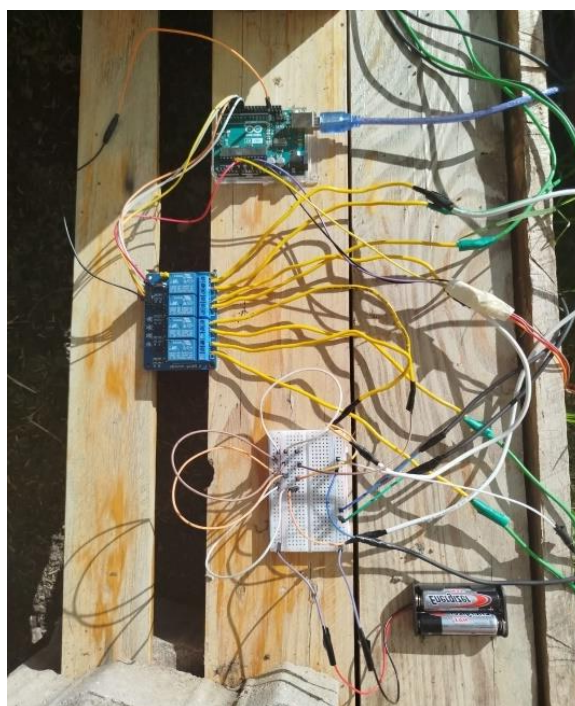


Ilustración 11. Instalación de arduino, relé módulo, protoboard. Fuente: Elaboración propia



4.1.3 Instalación de tuberías

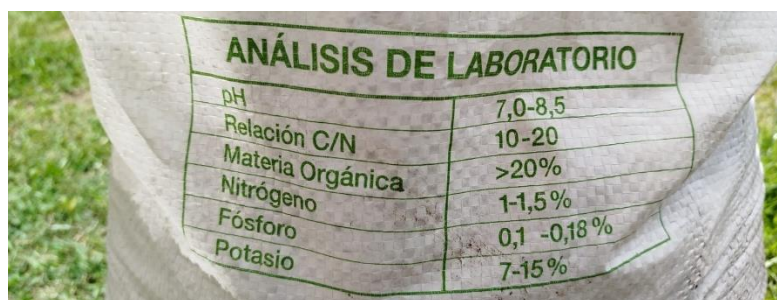
Ambos sistemas emplearon una irrigación por gravedad controlada a través de tuberías con orificios que distribuyen el agua hacia todas las hileras. De igual manera se realizaron surcos para una mejor retención del agua en la zona del cultivo.

4.1.4 Preparación del sustrato

Jenny and Alay s.f. realizó un estudio sobre la respuesta agronómica del cultivo de rábanos (*Raphanus sativus*) con diferentes sustratos orgánicos. Las variables a evaluar fueron: porcentaje de germinación, altura de la planta, número de hojas, tamaño de hojas, peso del bulbo, diámetro del bulbo y rendimiento del rábano por tratamiento. Se concluyó que sobresalen los tratamientos con sustratos orgánicos, siendo el “sustrato humus” al que supera en rendimiento de sustratos y el de menor costo de producción. La muestra de pH determinó los días de corte siendo a los 32 días después de la germinación.

Para preparar el sustrato (Humus+Tierra) se adquirió un saco de abono, de la empresa “EMAC EP” en donde se procedió a airear y mullir la tierra una hora antes de la siembra.

Ilustración 12. Humus de la empresa EMAC EP. Fuente: Elaboración propia



ANÁLISIS DE LABORATORIO	
pH	7,0-8,5
Relación C/N	10-20
Materia Orgánica	>20%
Nitrógeno	1-1,5%
Fósforo	0,1 -0,18 %
Potasio	7-15 %

4.1.5 Siembra de semillas

En la siembra de hortalizas de raíz, se debe utilizar el método de siembra a chorro continuo. Los surcos deberán mantener una distancia entre sí, pero las semillas se sembrarán una al lado de otra a una distancia máxima de 1 cm. Una vez hayan germinado las semillas, se deberá realizar un raleo, que consiste en retirar las plantas más chiquitas o más débiles (Rivera, 2015).

Se aplicó una siembra directa con un total de 80 semillas por parcela neta. Se plantaron 4 semillas por sitio entre 5 cm. Al obtener una germinación del 90% (8 días), se realizó un raleo con el fin de obtener un espacio adecuado para su respectivo crecimiento. Con ello se obtuvo un total de 40 rábanos por parcela neta (10 rábanos en cada hilera).

Cabe mencionar que se aplicó el programa de riego una vez realizado el raleo, es decir 9 días después de su germinación.

Ilustración 13. Siembra de semillas- Parcela automatizada. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 14. Siembra de semillas- Parcela mecanizada. Fuente: Elaboración propia



4.1.6 Control de malezas y técnicas agrícolas

Durante las etapas fenológicas del cultivo se realizó un control de malezas de manera manual. Se aporcó los rábanos en ambas parcelas a la tercera semana.

5 RESULTADOS

5.1 Análisis del consumo de agua

En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos del consumo total del agua entre ambos sistemas.

Tabla 8. Comparación entre el volumen total de riego aplicado en cada parcela

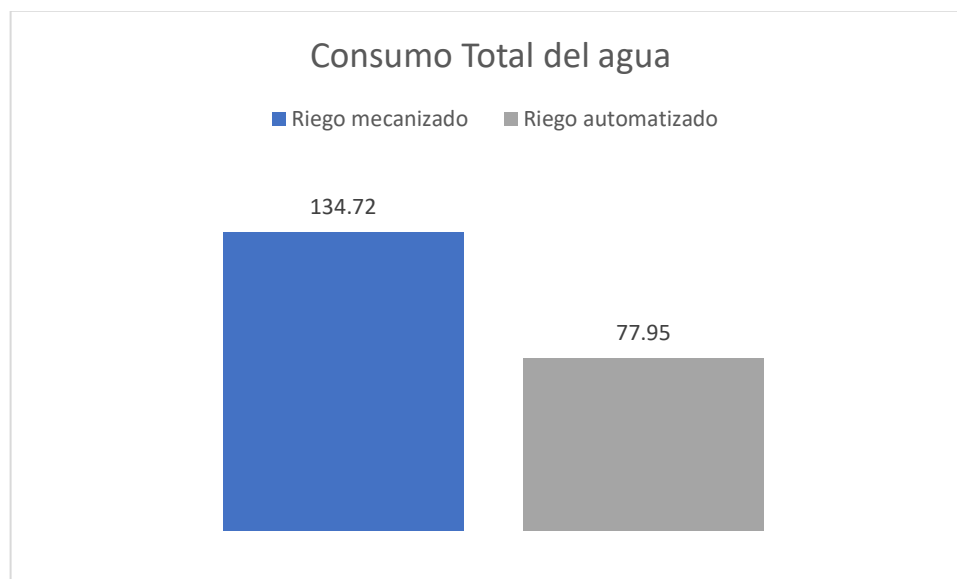
Fecha (DD-MM-YYYY)	Volumen Total de Riego Sistema mecanizado (L)	Volumen Total de Riego Sistema automatizado (L)
3/6/2024	4.81	1.08
4/6/2024	4.81	1.08
5/6/2024	4.81	0.72
6/6/2024	4.81	0.72
7/6/2024	4.81	1.08
8/6/2024	4.81	0.00
9/6/2024	4.81	1.08
10/6/2024	4.81	1.08
11/6/2024	4.81	1.08
12/6/2024	4.81	0.00
13/06/2024	4.81	1.08
14/06/2024	4.81	1.08
15/06/2024	4.81	0.72
16/06/2024	4.81	0.00
17/06/2024	4.81	0.00
18/06/2024	4.81	1.08
19/06/2024	4.81	0.72
21/06/2024	4.81	0.72
22/06/2024	4.81	0.72
23/06/2024	4.81	1.08
24/06/2024	4.81	1.08
25/06/2024	4.81	0.00
26/06/2024	4.81	0.00
27/06/2024	4.81	0.72
28/06/2024	4.81	0.72

29/06/2024	4.81	1.08
30/06/2025	4.81	0.72
1/7/2026	4.81	0.00
TOTAL	134.72	77.95

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la parcela mecanizada aplicó un total de 134,72 L, mientras que en la parcela automatizada aplicó un total de 77,95 L. El sistema de riego inteligente ahorró un total de 56.77 L con relación al sistema de riego mecanizado.

Ilustración 15. Consumo total de agua entre sistemas de riego. Fuente: Elaboración propia



Si relacionamos el consumo total de agua entre ambos sistemas, se obtiene un ahorro del 42.14% del agua (sistema automatizado) en una parcela neta de 1, 20 m^2 .

5.2 Frecuencia de Riego

Al establecer un rango de medición en el sensor de humedad (Tabla 6), se procedió a ejecutar el riego (1 vez al día) según la condición de humedad presente en el suelo (Tabla 7) obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 9. Frecuencia de riego entre sistemas de riego.

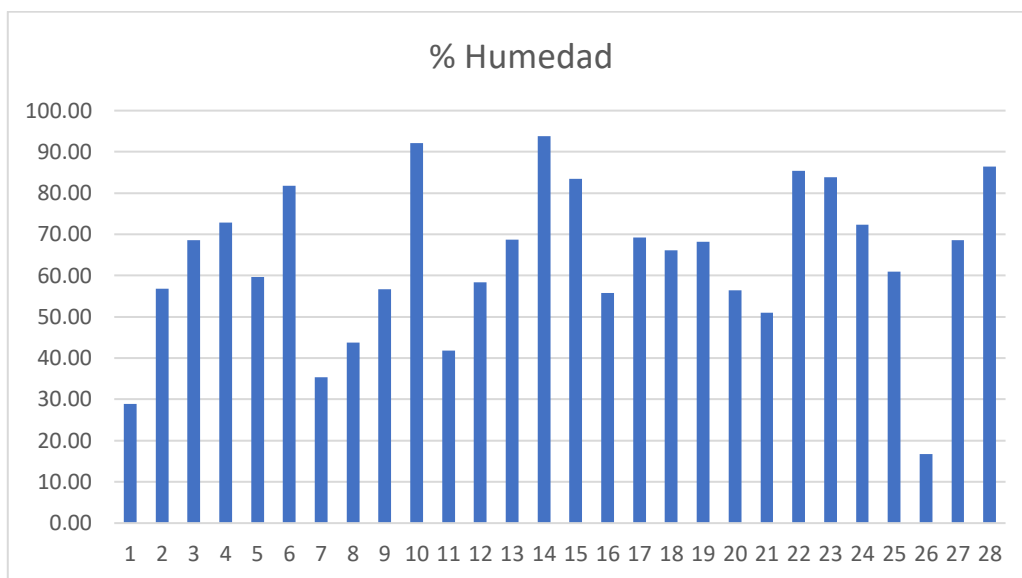
Fecha (DD-MM-YYYY)	Riego Mecanizado	Riego automatizado	% Humedad- Riego automatizado
3/6/2024	1	1	28.93
4/6/2024	1	1	56.85
5/6/2024	1	1	68.62
6/6/2024	1	1	72.83
7/6/2024	1	1	59.72
8/6/2024	1	0	81.83
9/6/2024	1	1	35.32
10/6/2024	1	1	43.79
11/6/2024	1	1	56.74
12/6/2024	1	1	92.17
13/06/2024	1	1	41.77
14/06/2024	1	1	58.39
15/06/2024	1	1	68.73
16/06/2024	1	0	93.77
17/06/2024	1	0	83.48
18/06/2024	1	1	55.73
19/06/2024	1	1	69.26
21/06/2024	1	1	66.12
22/06/2024	1	1	68.25
23/06/2024	1	1	56.47
24/06/2024	1	1	51.04
25/06/2024	1	0	85.40
26/06/2024	1	0	83.86
27/06/2024	1	1	72.40
28/06/2024	1	1	60.95
29/06/2024	1	1	16.68
30/06/2025	1	1	68.62
1/7/2026	1	0	86.47
Total	28	22	63.72

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que el sistema automatizado obtuvo una menor frecuencia de riego entre el sistema mecanizado, con una diferencia de seis días y con un promedio 63.72% de humedad del suelo registrado.

5.3 Humedad del suelo en todo el ciclo del cultivo

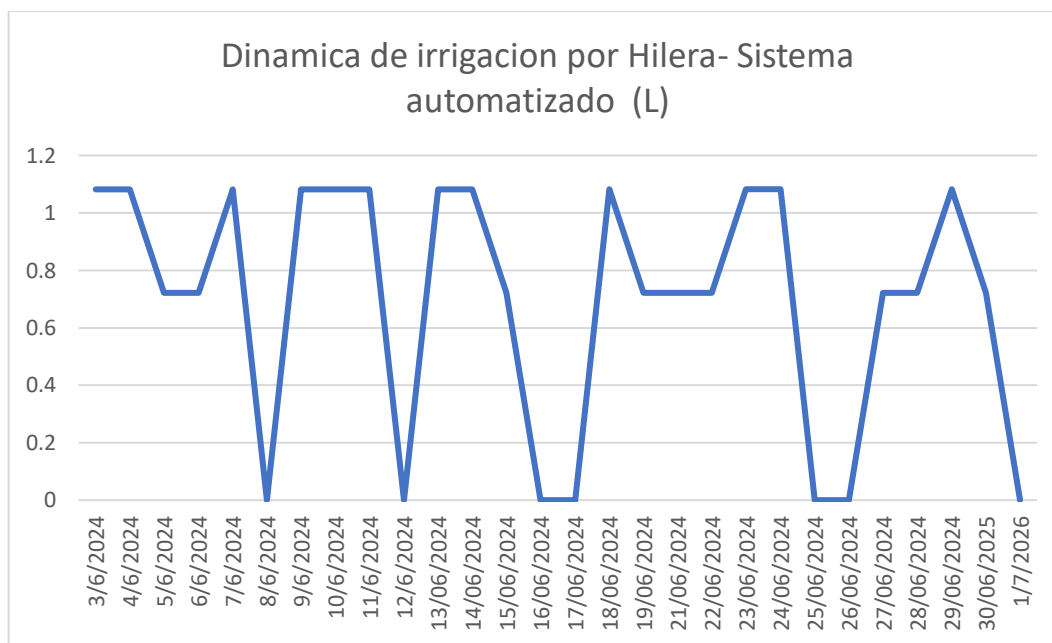
Ilustración 16. Porcentaje de Humedad relativa en el ciclo del cultivo. Fuente: Elaboración Propia



En la ilustración 16 se observa el comportamiento de la humedad presente el suelo de manera diaria. En el eje “y”, los picos que se encuentran mayores a 80.00% significa que el sistema de riego no ha sido ejecutado. Los valores que se encuentran entre 60.00-80.00%, ejecutaron un determinado volumen de riego y para los rangos inferiores a 60.00%, se aplicó un volumen de 4.33 L. La humedad del suelo permaneció entre un rango del 60% durante toda la etapa del cultivo. Esto es un indicador positivo ya que nos demuestra que la parcela no sufrió estrés hídrico tanto en el crecimiento, calidad y cosecha del cultivo.

5.4 Volumen de irrigación aplicado en el ciclo del cultivo

Ilustración 17. Dinámica del Volumen de riego aplicado por hilera- Sistema automatizado. Fuente: Elaboración propia



En la ilustración 17 podemos observar la dinámica de irrigación en el lapso de 28 días. En el eje “y” se observa el consumo de agua y en el eje “x” la fecha de irrigación. Los resultados son inversamente proporcionales a la ilustración 16. Es decir, mientras mayor sea el contenido de humedad presente en el suelo, menor es el consumo de agua.

5.5 Análisis del rendimiento del cultivo

Se realizó la cosecha de rábanos en un lapso de 28 días después de la germinación. Se caracterizó el número de hojas, altura de la planta, longitud de la raíz y peso de cada rábano. Al obtener los datos indicados, se procedió a realizar una prueba estadística (t de student) entre los grupos estudiados (A y B) con el fin de evaluar la existencia de diferencias significativas entre el rendimiento del cultivo y el consumo de agua aplicado.

Para realizar la prueba estadística (t de student), es necesario plantear las siguientes alternativas, en cuanto a la toma de decisión:

Hipótesis nula: No hay diferencia significativa en el número promedio de hojas por rábano entre el grupo con riego mecanizado y el grupo con riego automatizado

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

Donde:

μ_1 : Representa el número promedio de hojas/ altura de la planta, longitud de la raíz y peso del rábano; en el grupo con riego mecanizado.

μ_2 : Representa el número promedio hojas/ altura de la planta, longitud de la raíz y peso del rábano; en el grupo con riego automatizado.

Hipótesis alternativa: Hay una diferencia significativa en el número promedio hojas/ altura de la planta, longitud de la raíz y peso del rábano; entre el riego mecanizado y el riego automatizado.

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_2$$

5.5.1 Número de Hojas

- Tabla 10. Riego mecanizado- Número de hojas

# Número de plantas	Riego mecanizado			
	Número de Hojas			
	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
1	6	7	6	7
2	6	6	7	8
3	6	6	7	7
4	7	8	8	7
5	6	8	7	8
6	6	7	6	6
7	8	7	6	7
8	5	7	6	6
9	7	6	7	6

10	7	8	7	7
Fuente: Elaboración propia				

Tabla 11. Riego automatizado- Número de hojas

Riego automatizado				
# Número de plantas	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
1	6	7	6	6
2	6	7	7	7
3	7	6	7	7
4	6	6	7	7
5	7	7	6	7
6	7	7	6	7
7	7	7	7	8
8	7	7	7	6
9	7	5	7	7
10	6	7	7	7

Fuente: Elaboración propia

12.Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales- Número de hojas

	Mecanizado	Automatizado
Media	6.75	6.7
Varianza	0.55128205	0.31794872
Observaciones	40	40
Varianza agrupada	0.43461538	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	78	
Estadístico t	0.33918173	
P(T<=t) una cola	0.36769216	
Valor crítico de t (una cola)	1.66462464	
P(T<=t) dos colas	0.73538433	
Valor crítico de t (dos colas)	1.99084707	

Fuente: Elaboración propia

El resultado estadístico t (0.339) pertenece a la región de aceptación de la hipótesis nula (+- 1.99) en lo cual podemos decir que no existe una diferencia significativa entre el número de hojas de rábano entre cada parcela. Es importante recalcar la importancia de las hojas en su crecimiento y desarrollo, ya que influye en la fotosíntesis, respiración, transpiración, formación de raíces y del tubérculo.

5.5.2 Altura de la planta

Tabla 13. Riego mecanizado- Altura de la planta

Riego mecanizado				
# Número de plantas	Altura de planta (cm)			
	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
1	28	27	22	33
2	27	26	27	27
3	27	27	25	29
4	28	22	29	31
5	33	31	23	25
6	27	28	23	31
7	31	31	26	30
8	27	29	25	24
9	25	31	28	20
10	26	30	34	27

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Riego automatizado- Altura de la planta

Riego automatizado				
# Número de plantas	Altura de planta (cm)			
	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
1	28	28	28	28
2	26	25	27	24
3	23	27	26	27
4	22	27	31	31
5	23	30	26	33
6	19	33	29	29
7	32	29	30	33
8	25	27	36	23
9	26	23	31	27
10	24	24	28	27

Fuente: Elaboración propia

15. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales- Altura de la planta

	Mecanizado	Automatizado
Media	27.5	27.375
Varianza	10.25641026	12.39423077
Observaciones	40	40
Varianza agrupada	11.32532051	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	78	
Estadístico t	0.166111523	
P(T<=t) una cola	0.434249506	
Valor crítico de t (una cola)	1.664624645	

P(T<=t) dos colas	0.868499013
Valor crítico de t (dos colas)	1.990847069

Fuente: Elaboración propia

A través del resultado obtenidos, la altura de la planta no tiene influencia entre el sistema de riego implantado ya que el valor estadístico t (0.166) pertenece a la región de aceptación de la hipótesis nula (+-1.99).

5.5.3 Longitud de la raíz

Tabla 16. Riego mecanizado- Longitud de la raíz

Riego mecanizado				
# Número de plantas	Longitud de la Raiz (cm)			
	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
1	8	9	7	8
2	7	7	8	9
3	10	8	7	8
4	9	9	7	9
5	8	7	8	8
6	9	8	7	7
7	8	9	6	9
8	9	8	7	9
9	9	11	7	6
10	11	8	9	8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Riego automatizado- Longitud de la raíz

Riego automatizado				
# Número de plantas	Longitud de la Raiz (cm)			
	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
1	8	9	7	7
2	7	8	10	10
3	7	7	10	11
4	6	7	8	10
5	8	8	7	8
6	6	8	9	7
7	9	7	8	9
8	6	6	8	8
9	7	7	8	10
10	6	7	9	9

Fuente: Elaboración propia

	Mecanizado	Automatizado
Media	8.15	7.925
Varianza	1.31025641	1.712179487
Observaciones	40	40
Varianza agrupada	1.511217949	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	78	
Estadístico t	0.818528799	
P(T<=t) una cola	0.207774509	
Valor crítico de t (una cola)	1.664624645	
P(T<=t) dos colas	0.415549017	
Valor crítico de t (dos colas)	1.990847069	

Fuente: Elaboración propia

La longitud de la raíz obtuvo un valor estadístico t (0.81) y una región de aceptación de (+-1.99). Esto indica que el contenido de humedad en el suelo se encontró en condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo del tubérculo.

5.5.4 Peso del rábano sin hojas

Tabla 19. Riego mecanizado- Peso del rábano sin hojas

# Número de plantas	Riego mecanizado			
	Peso del rábano sin hojas (g)			
	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
1	31	44	9	54
2	27	38	55	50
3	44	46	10	16
4	49	51	37	22
5	29	9	19	54
6	32	34	21	38
7	33	52	13	53
8	30	66	32	20
9	28	12	38	9
10	21	33	41	46
Total		1346		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Riego automatizado- Peso del rábano sin hojas

# Número de plantas	Riego automatizado			
	Peso del rábano sin hojas (g)			
	Hilera 1	Hilera 2	Hilera 3	Hilera 4
1	59	61	27	34
2	34	32	40	23
3	25	35	47	27
4	18	33	38	29
5	16	30	31	26
6	19	40	58	32
7	51	42	31	35
8	12	23	55	18
9	26	35	44	23
10	12	21	48	21
Total	1311			

Fuente: Elaboración propia

21. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales- Peso del rábano

	Mecanizado	Automatizado
Media	33.65	32.775
Varianza	232.2333333	162.1788462
Observaciones	40	40
Varianza agrupada	197.2060897	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	78	
Estadístico t	0.278652465	
P(T<=t) una cola	0.390624482	
Valor crítico de t (una cola)	1.664624645	
P(T<=t) dos colas	0.781248965	
Valor crítico de t (dos colas)	1.990847069	

Fuente: Elaboración propia

El peso del rábano obtuvo un valor estadístico t (0.278) con una región de aceptación de hipótesis nula (+/-1.99). Los resultados confirman que la cantidad de agua aplicada un sistema de riego automatizado, no tiene diferencia significativa entre la producción de rábanos.

Ilustración 18. Comparación entre el peso del rábano con hojas

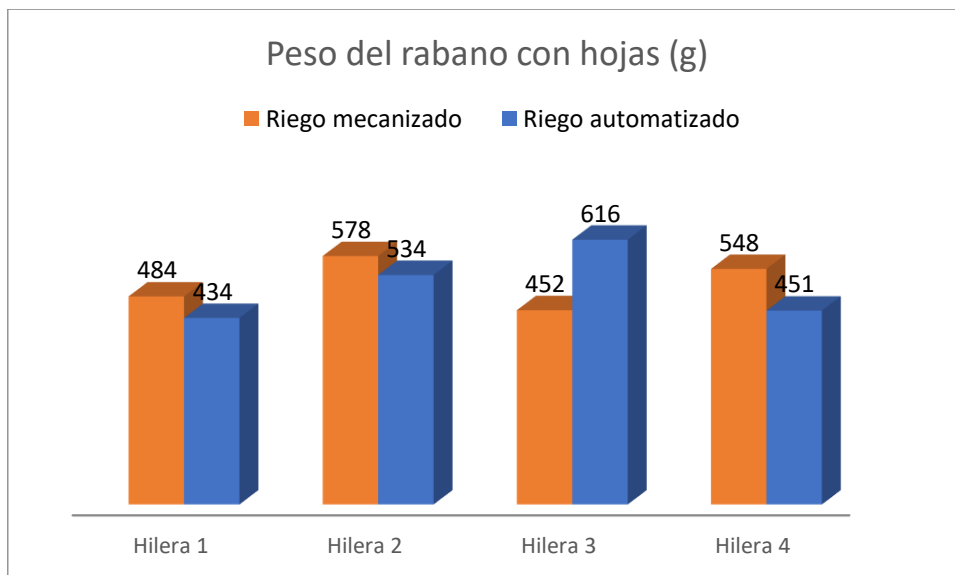
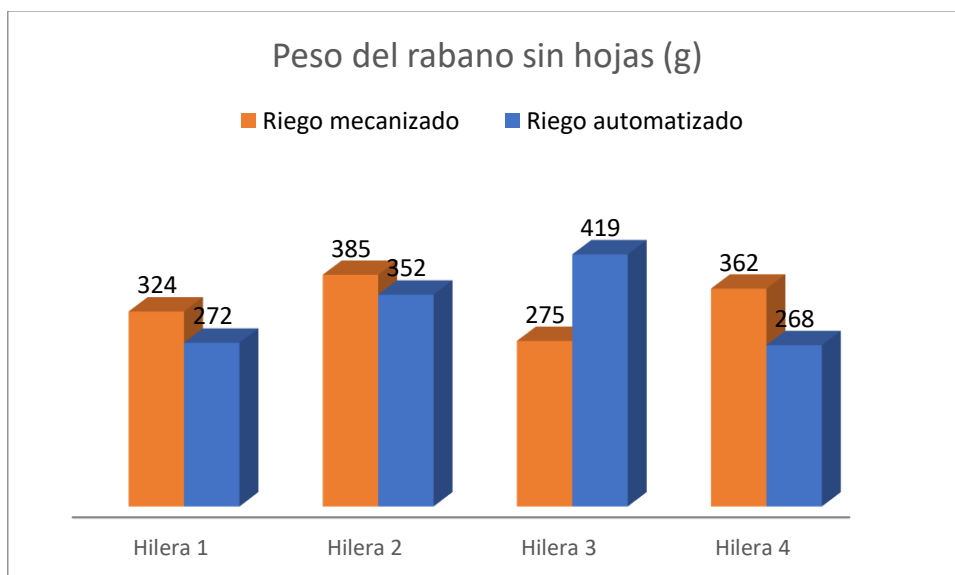


Ilustración 19. Comparación entre el peso del rábano sin hojas



6 DISCUSIÓN

El sistema automatizado presenta una mayor eficiencia de irrigación en comparación con el sistema mecanizado. Las condiciones de producción no se vieron afectadas, sin embargo, la parcela automatizada, presentó un mayor número de rábanos sin varianzas significativas entre sus pesos.

Los resultados indican una viabilidad en optar nuevas metodologías de irrigación, donde se dé una mejor distribución del recurso, en función al área

cultivable. Sistemas de riego como goteo o por exudación, presentan costos altos de material y requiere un mantenimiento constante del mismo, resultando poco factible para los productores.

Los sistemas de riego automatizado son una herramienta eficaz para los agricultores que poseen poco acceso al recurso agua, ya sea por condiciones geográficas o climáticas.

Este estudio presenta algunas limitaciones, el tamaño de la muestra es pequeña y el estudio se realizó en un único centro. Al aumentar el tamaño de la muestra (área de cultivo) es necesario utilizar un mayor número de sensores, donde este dependerá del relieve y el tipo de suelo.

7 CONCLUSIONES

Al evaluar los resultados de la investigación, entre un sistema de riego automatizado y mecanizado, se pudo concluir con lo siguiente:

El sistema automatizado obtuvo un ahorro del 42.14% (56.77 L) del consumo de agua en relación al sistema mecanizado. La humedad del suelo durante el ciclo de cultivo (parcela automatizada) , se encontró en un rango del 60%, siendo óptimo para la producción de Raphanus sativus.

Los resultados estadísticos obtenidos de la cosecha, indican que no hay una diferencia significativa en la producción de rábanos entre ambas parcelas, al aplicar diferentes volúmenes de riego. Con ello se confirma la hipótesis planteada al inicio del estudio.

Es necesario realizar dos o más monitoreos de la humedad del suelo (Frecuencia de riego) para mejorar las condiciones del suelo, en función al crecimiento del rábano, con ello se pretende mejorar la eficiencia de riego y evitar

que el suelo se encuentre en un estado de marchitez permanente, generando así un estrés en la producción del cultivo. También es posible aumentar la eficiencia del sistema mediante un mayor número de condicionantes como es temperatura, humedad del aire, intensidad de riego y horario de irrigación. Estas condicionantes varían de acuerdo al piso climático, estación del año y fases lunares.

8 RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar un mayor número de sensores de acuerdo al área del cultivo para garantizar una correcta distribución del recurso y mejorar la eficiencia de riego.

Es esencial conocer el tipo de suelo y el relieve en el cual se pretende aplicar el tipo de estudio.

9 BIBLIOGRAFÍA

Anon. 2006. *INTRODUCCIÓN DESERTIFICACIÓN Y SEQUÍA*.

Anon. n.d.-a. "2395-8030-TI-31-03-00201."

Anon. n.d.-b. *Cuencas Hidrográficas*.

Anon. n.d.-c. *Fundamentos de Automatización y Redes Industriales*.

Anon. n.d.-d. "Metodo Gravimetrico- Calibracion Del Sensor Humedad."

Anon. n.d.-e. *PAC-Performance-Centered Adaptive Curriculum for Employment Needs MASTER DEGREE: Industrial Systems Engineering*.

Antonio·bello, Marco, U. María, and Teresa Pino. n.d. *GOBIERNO DE CHILE MINtSTtI UO OI AGRICULTURA CNR · INIA ICAMKNAJK1 BOLETÍN INIA Nº 28 MEDICIÓN DE PRESIÓN Y CAUDAL*.

Asensi, E., E. Alemany, P. Duque-Sarango, and D. Aguado. 2019. "Assessment and Modelling of the Effect of Precipitated Ferric Chloride Addition on the Activated Sludge Settling Properties." *Chemical Engineering Research and Design* 150:14–25. doi: 10.1016/j.cherd.2019.07.018.

Carbajal, Ángeles, and María González. 2013. "Propiedades y Funciones Biológicas Del Agua." *Universidad Complutense de Madrid* 4(2):1–16.

- Duque Sarango, Paola, Catherine Heras Naranjo, and Diana Lojano Criollo. 2018. "Modelamiento Del Tratamiento Biológico de Aguas Residuales ; Estudio En Planta Piloto de Contactores Biológicos Rotatorios." *Revista Ciencia UNEMI* 11(March):88–96. doi: 10.29076/issn.2528-7737vol11iss28.2018pp88-96.
- Duque-Sarango, P., & Hernández, B. 2020. "Estudio Integral Del Recurso Hídrico de La Microcuenca Del Rio Guarango, Cuenca – Ecuador." *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação* 30:240–52.
- Duque-Sarango, P, R. Cajamarca-Rivadeneira, B. C. Wemple, and M. E. Delgado-Fernández. 2019. "Estimation of the Water Balance of for a Small Tropical Andean Catchment [Estimación Del Balance Hídrico De Una Cuenca Andina Tropical]." *Granja* 29(1):56–69. doi: 10.17163/lgr.n29.2019.05.
- Duque-Sarango, Paola, Daysi M. Patiño, and Xavier E. López. 2019. "Evaluación Del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS Para La Simulación Hidrológica de Una Microcuenca Andina Tropical." *Información Tecnológica* 30(6):351–62. doi: 10.4067/s0718-07642019000600351.
- Duque-Sarango, Paola, and Verónica Pinos. 2022. "Modeling of the Guangarcucho Municipal Wastewater Treatment Plant Using WEST, Cuenca-Ecuador." 33–46. doi: 10.1007/978-3-030-93718-8_4.
- Fundación AQUAE. 2020. "¿Qué Es El Agua?: Tipos, Composición y Funciones | Fundación Aquae." *¿Qué Es El Agua?: Tipos, Composición y Funciones*.
- Garro, J. 2016. "El Suelo y Los Abonos Orgánicos." *Sector Agro Alimentario* 11(1):17–20.
- Geográfica De Lima, Sociedad. n.d.-a. "Contribuyendo al Desarrollo de Una Cultura Del Agua y La Gestión Integral de Recurso Hídrico" LIMA-PERÚ 2011 *Cartilla Técnica Cartilla Técnica CICLO HIDROLÓGICO CICLO HIDROLÓGICO*.
- Geográfica De Lima, Sociedad. n.d.-b. "Contribuyendo al Desarrollo de Una Cultura Del Agua y La Gestión Integral Del Recurso Hídrico" ¿QUÉ ES CUENCA HIDROLÓGICA? ¿QUÉ ES CUENCA HIDROLÓGICA?
- Guijarro-Rodríguez, Alfonso A., ; Lorenzo, J. Cevallos Torres, Debora K. Preciado-Maila, Bryan Nagib, and Zambrano Manzur. n.d. N° 37) Año 2018 • Pág. Vol. 39.
- Jenny, Blanca, and Holguin Alay. n.d. *Previo a La Obtención Del Título de: INGENIERA AGROPECUARIA*.
- Montalvo-Ochoa, F., V. Robles-Bykbaev, P. Duque-Sarango, and K. Gonzalez-Arias. 2020. "An Educational Rule-Based Expert System to Determine Water Quality for Environmental Engineering and Biotechnology Students." Pp. 1–6 in *EDUNINE 2020 - 4th IEEE World Engineering Education Conference: The Challenges of Education in Engineering, Computing and Technology without Exclusions: Innovation in the Era of the Industrial Revolution 4.0, Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- NAYLAMP MECHATRONICS. 2022. "SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO CAPACITIVO." *Temperatura y Humedad*.
- Ordoñez, Juan Julio. 2015. *¿QUÉ ES CUENCA HIDROLÓGICA?*

10 ANEXOS

10.1 Datos Agrometeorológicos

NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual																
Dates (month/day/year): 01/01/2001 through 12/31/2021																
Location: Latitude Longitude																
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2496.1 meters																
The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999																
Parameter(s):																
RH2M MERRA-2 Relative Humidity at 2 Meters (%)																
T2M_MAX MERRA-2 Temperature at 2 Meters Maximum (C)																
T2M_MIN MERRA-2 Temperature at 2 Meters Minimum (C)																
PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN		
RH2M	2001	86.81	86.38	87.44	87.31	87.56	90.31	88.56	85.75	79.75	81.25	82.44	86.31	85.81		
RH2M	2002	84.81	86.94	87.44	88.38	90.38	89.81	90.25	85.81	81.44	83.19	86.38	87.94	86.94		
RH2M	2003	86.38	86.88	86.38	90	91.5	90.62	89.19	86.19	86	84.44	84.56	85.88	87.31		
RH2M	2004	84.56	85.19	88.06	87.94	90.44	91.5	89.44	86.19	84.12	84.12	86	87.31	87.06		
RH2M	2005	81.44	84.56	85	85.12	83.19	83.25	81.38	76.88	77.38	82	79.62	81.38	81.75		
RH2M	2006	80.56	85.75	87	86.06	87.12	87.06	84.75	83.06	78.31	73.75	77.31	78.31	82.38		
RH2M	2007	80.56	78.19	81.12	80.88	81.19	82.81	80.31	80.62	80.38	82.88	85.25	81.94	81.38		
RH2M	2008	85.88	86.81	88.56	89.19	91.38	90.94	90.5	85.19	84.56	84.31	82.81	81.62	86.81		
RH2M	2009	85.19	86.62	89.19	88.38	84.25	85.12	83.94	83.31	81.81	83.69	78.44	84.81	84.56		
RH2M	2010	83.81	83.25	83.75	86.5	84.62	83.88	82.12	76.62	79.25	79.19	81.44	83.5	82.31		
RH2M	2011	84.88	87.38	85.88	89.06	89.88	89.25	88.94	85.56	83.5	81.19	84.88	88.06	86.5		
RH2M	2012	90.12	89.06	91.38	89.38	90.88	90.5	88.62	85.38	82.06	84.25	85.06	83.88	87.56		
RH2M	2013	87.69	88.69	88.31	86	88	89.38	90.06	87.31	83.19	85.06	82.19	84.94	86.75		
RH2M	2014	86.31	88.19	87.56	85.62	85.56	87	86.69	83.5	80.88	83.56	82.31	83.44	85.06		
RH2M	2015	85.69	86.06	87.31	89.19	89.75	89.94	87.81	84.75	80	82.94	83.06	83.06	85.81		
RH2M	2016	84.12	87	88.19	89.56	89.62	90.19	87.62	85	83.94	82.44	81	86.38	86.25		
RH2M	2017	87.25	87.44	89.19	90.31	90	90.5	87.81	85	84.06	84.19	84.81	86	87.25		
RH2M	2018	88.75	88.81	88.94	88.75	89.62	87.88	86.75	86.25	80.5	84.44	87.38	86.81	87.06		
RH2M	2019	87.75	89.44	87.81	88.75	87.12	88.88	86.69	85.5	80.94	85.06	86.44	88.56	86.88		
RH2M	2020	85.94	87.81	87.19	88.56	90.44	87.88	88.25	82.5	83.38	80.94	82.06	85.31	85.88		
RH2M	2021	87.19	87.44	90.19	89.81	89.62	88	87.25	83.19	80.5	83.75	87.06	89.12	86.94		
T2M_MAX	2001	19.55	20.68	19.98	20	19.33	17.38	16.89	18.18	20.17	20.76	22.26	20.58	22.26		
T2M_MAX	2002	20.09	19.7	19.63	20.73	18.58	17.42	17.93	19.15	20.88	20.08	19.33	19.57	20.88		
T2M_MAX	2003	19.85	20.42	21.14	19.18	18.63	17.56	17.01	18.76	20.41	20.65	20.95	20.19	21.14		
T2M_MAX	2004	21.93	19.77	19.53	19.57	18.76	16.63	17.44	18.33	19.05	20.86	20.33	19.33	21.93		
T2M_MAX	2005	23.1	21.64	20.4	20.66	21.69	19.89	20.52	21.88	22.34	21.31	23.46	22.12	23.46		
T2M_MAX	2006	23.09	21.36	19.97	20.16	19.44	18.69	19.39	19.19	21.33	25.01	25.4	22.76	25.4		
T2M_MAX	2007	23.08	23.76	21.87	21.63	22.05	19.45	21.59	20.82	21.36	21.31	20.39	22.51	23.76		
T2M_MAX	2008	19.81	21.01	18.69	19.95	17.08	17.44	17.58	19.59	19.86	20.79	21.9	20.33	21.9		
T2M_MAX	2009	20.61	19.55	19.44	19.01	19.66	19.73	19.47	21.98	20.34	21.6	23.86	20.97	23.86		
T2M_MAX	2010	21.58	22.14	21.9	21.32	21.99	19.24	21.2	21.15	22.15	23.68	23.33	22.61	23.68		
T2M_MAX	2011	20.75	21.55	20.48	18.96	19.94	18.97	18.92	18.76	19.75	21.36	21.3	19.66	21.55		
T2M_MAX	2012	19.52	18.49	17.98	18.84	17.4	18.04	17.91	18.62	19.69	20.82	21.61	20.98	21.61		
T2M_MAX	2013	20.48	19.65	20.94	21.32	19.22	18.54	17.28	18.71	20.14	20.9	21.61	21.39	21.61		
T2M_MAX	2014	20.35	19.76	20.63	20.15	20.18	19.42	18.62	18.91	21.23	20.86	21.99	22.94	22.94		
T2M_MAX	2015	20.55	21.06	20.12	19.33	19.33	18.13	19.58	19.69	20.61	21.4	22.31	20.84	22.31		
T2M_MAX	2016	22.05	20.98	22.2	20.18	19.12	17.83	17.55	19.25	20.55	22.43	23.89	20.46	23.89		
T2M_MAX	2017	20.17	20.12	19.19	18.62	18.83	18.33	18.46	19.85	19.75	21.09	21.61	20.63	21.61		
T2M_MAX	2018	20.35	20.32	19.48	19.98	19.26	17.74	17.66	17.96	19.78	20.84	20.87	19.82	20.87		
T2M_MAX	2019	20.07	19.39	19.89	20.13	19.94	18.86	19.01	18.41	21.15	19.95	21.55	20.43	21.55		
T2M_MAX	2020	22.69	20.92	20.82	19.82	20.16	19.14	18.18	20.37	21.15	22.52	22.19	20.39	22.69		
T2M_MAX	2021	19.7	20.69	19.78	19.13	19.51	18.6	18.1	20.14	20.31	21.51	20.3	20.19	21.51		
T2M_MIN	2001	7.95	8.44	8.68	8.65	6.76	5.37	5.28	4.51	5.77	7.01	7.19	9.28	4.51		
T2M_MIN	2002	8.08	9.02	8	8.47	8.15	4.38	5.28	3.97	6.18	6.83	6.13	8.16	3.97		
T2M_MIN	2003	8.42	7.97	8.51	8.16	7.33	6.94	2.64	5.86	6.57	8.09	8.81	7.87	2.64		
T2M_MIN	2004	8.05	8.38	9.17	8.8	6.37	5.01	6.01	5.1	6.43	6.52	7.45	8.54	5.01		
T2M_MIN	2005	8.11	10.17	9.33	8.83	8.46	7.7	7.35	7.82	7.63	8.49	7.01	9.58	7.01		
T2M_MIN	2006	8.8	9.14	9.21	8.85	6.57	5.58	5.62	5.9	6.78	6.35	9.07	8.21	5.58		
T2M_MIN	2007	9.7	7.33	9.76	9.03	9.86	6.98	7.62	6.19	5.99	8.42	7.62	6.47	5.99		
T2M_MIN	2008	8.62	7.9	7.7	8.68	7.23	5.94	5.82	6.42	4.9	7.13	8.75	8.26	4.9		
T2M_MIN	2009	9.15	8.28	9.3	8.76	7.94	7.15	5.78	6.43	7	8.37	8.05	8.69	5.78		
T2M_MIN	2010	9.31	9.13	9.55	9.39	8.72	6.98	7.7	6.03	7	7.31	9.23	7.62	6.03		
T2M_MIN	2011	8.27	8.24	8.21	8.71	6.67	6.44	6.53	6.08	6.83	7.39	7.92	8.99	6.08		
T2M_MIN	2012	9.62	8.66	8.14	8.62	7.15	6.26	5.26	4.8	6.11	7.53	8.48	8.76	4.8		
T2M_MIN	2013	8.04	8.68	9.3	5.55	7.68	6.3	5.03	4.48	6.37	7.83	8.53	8.29	4.48		
T2M_MIN	2014	8.58	9.76	9.16	7.33	8.74	5.65	5.62	5.58	6.48	6.33	9.32	7.97	5.58		
T2M_MIN	2015	7.58	8.82	10	8.8	7.6	6.8	6.63	6.73	6.02	8.09	7.87	8.26	6.02		
T2M_MIN	2016	9.61	9.69	11.05	9	8.07	6.24	5.44	5.87	7.41	7.78	7.41	9.52	5.44		
T2M_MIN	2017	8.58	9.26	9.55	9.17	7.67	7.23	4.73	6.36	7.73	8.08	9.35	8.25	4.73		
T2M_MIN	2018	8.56	9.93	9.24	8.61	8.22	4.5	5.95	5.73	4.62	9.01	9.64	7.69	4.5		
T2M_MIN	2019	7.49	9.04	9.05	9.55	7.85	6.43	5.52	4.56	6.57	7.32	8.37	9.02	4.56		
T2M_MIN	2020	9.18	7.94	9.94	7.37	8.27	7.48	6.29	6.37	7.64	6.48	9.49	8.96	6.29		
T2M_MIN	2021	8.06	9.77	8.66	8.92	7.69	7.09	4.65	5.12	7.03	8.97	9.15	9.6	4.65		

10.2 Invernadero



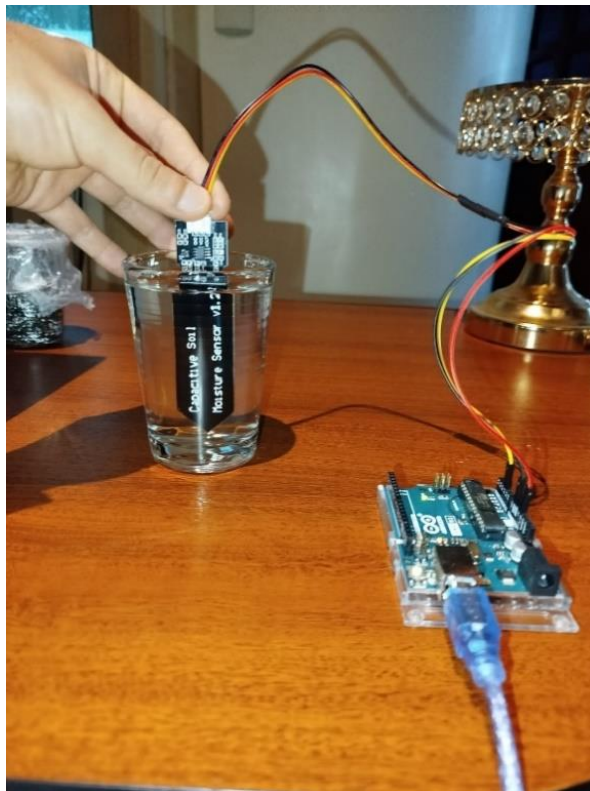
10.3 Vista en el interior del invernadero



10.4 Secado de muestra para calibración de sensor



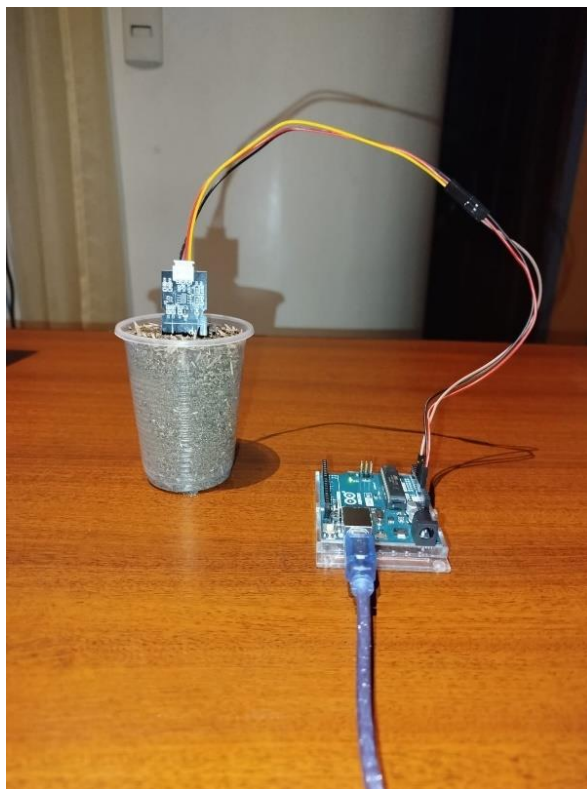
10.5 Medición de la humedad del suelo con muestra de agua



10.6 Medición de la humedad del suelo con sustrato en estado húmedo



10.7 Medición de la humedad del suelo con sustrato en estado seco



10.8 Siembra de semillas



10.9 Primera semana- Riego mecanizado



10.10 Primera semana – Riego Automatizado



10.11 Raleo de cultivo - Primera semana



10.12 Segunda semana - Riego Mecanizado



10.13 Segunda semana - Riego Automatizado



10.14 Tercera semana- Riego Mecanizado



10.15 Tercera semana- Riego Automatizado



10.16 Cuarta semana- Riego mecanizado



10.17 Cuarta semana- Riego automatizado



10.18 Cosecha del rábano



10.19 Medida de la Altura de la planta



10.20 Peso del rábano

