

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO PARA
CULTIVOS VERTICALES DE LECHUGA TIPO *LACTUCA SATIVA L. VAR.*
ACEPHALA DILL EN BOGOTÁ.

JUAN SEBASTIÁN MONTAÑO ALVARADO
NICOLÁS SERGE WOLGAN STAFFELBACH HENAO

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C
2023

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO PARA
CULTIVOS VERTICALES DE LECHUGA TIPO *LACTUCA SATIVA L. VAR.*
ACEPHALA DILL EN BOGOTÁ.

JUAN SEBASTIÁN MONTAÑO ALVARADO
NICOLÁS SERGE WOLGAN STAFFELBACH HENAO

DIRECTOR
MEng JAIME ALEJANDRO QUIROGA FORERO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C
2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Director

Firma Coordinador

Firma Calificador

Bogotá D.C, Febrero 26 de 2023.

CONTENIDO

1.	RESUMEN.....	5
2.	INTRODUCCIÓN.....	7
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
3.1	PREGUNTA PROBLEMA.....	11
4.	JUSTIFICACIÓN.....	12
5.	OBJETIVOS.....	15
5.1	OBJETIVO GENERAL.....	15
5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
6.	MARCO REFERENCIAL.....	16
6.1	ESTADO DEL ARTE.....	16
6.2	MARCO TEÓRICO.....	18
6.3	MARCO CONCEPTUAL.....	23
6.3.1	Cultivos verticales.....	23
6.3.2	Requerimientos hídricos de la lechuga.....	23
6.3.3	Microcontrolador.....	24
6.3.4	Actuadores.....	26
6.3.5	Sensores.....	26
6.3.6	Sistema de riego.....	28
6.4	MARCO LEGAL.....	29
6.5	MARCO GEOGRÁFICO.....	31
6.6	MARCO HISTÓRICO.....	31
7.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	33
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
8.1	REQUERIMIENTOS.....	36
8.2	DISEÑOS.....	37
8.2.1	Diseño de tuberías:.....	38
8.2.2	Diseño esquemático electrónico del circuito de control:.....	46
8.2.3	Diseño de control:.....	48
8.3	IMPLEMENTACIÓN.....	51

8.4 DATOS	56
9. CONCLUSIONES	66
10. RECOMENDACIONES	68
11. BIBLIOGRAFÍA	69
12. ANEXOS	74
12.1 ANEXO 1	74
12.2 ANEXO 2	75
12.3 ANEXO 3	78
12.4 ANEXO 4	80
12.5 ANEXO 5	80
12.6 ANEXO 6	81

LISTA DE TABLAS

Ventajas y desventajas	10
Marco teórico	20
Marco legal para la implementación del proyecto	27
Datos tomados del cultivo de prueba	51
Datos tomados del cultivo de control	53
Datos tomados del tamaño de las plantas	55
Costos tubería	63
Costos electrónica	65

LISTA DE IMÁGENES

Mapa interactivo de las huertas urbanas en Colombia	12
ATMega328/P hoja de especificaciones	21
Configuración de relevos para salidas digitales	22
Electroválvula	23
Sensor de flujo YF-S201	24
Sensor de humedad YL-1000	25
Ubicación del proyecto	28
Diagrama de flujo del proyecto	32
Diseño de tuberías	35
Diseño de tuberías primera sección	37
Diseño de tuberías segunda sección	39
Diseño de tuberías tercera sección	40
Diseño de tuberías cuarta sección	41
Render de la distribución del cultivo	44
Ubicación del sistema electrónico	44
Esquemático electrónico	45
Diagrama de bloques de control	47
Diagrama de bloques de balance de agua	48
Plántula de lechuga	50
Primera semana de cultivo	51
Segunda semana de cultivo	52
Último día de cultivo	53
Consumo de agua cultivo de prueba	55
Consumo de agua cultivo de control	57

1. RESUMEN

En la actualidad la capacidad de optimizar el uso del agua es una de las prioridades de la sociedad, debido al aumento paulatino de la población mundial teniendo la misma cantidad de agua potable disponible en la tierra, sin contar el hecho de contaminación de agua por el uso industrial y de fertilizantes en el caso agrícola.

Este proyecto está desarrollado para facilitar a las personas fuera del mundo agrícola e incentivar el cultivo domestico de plantas en espacios reducidos, como lo son los espacios de los apartamentos de Bogotá o grandes ciudades donde la agricultura no se encuentra presente en la cotidianidad de las personas, por lo que facilitaría el autocultivo de manera responsable con el medio ambiente.

Mediante el uso de la automatización se busca ahorra un 13% de agua en los diferentes sistemas de riego de los cultivos, facilitando así al usuario final lograr tener un autocultivo sin tener conocimientos en el sector agrícola, utilizando la tarjeta de desarrollo Arduino UNO por su tecnología “*open source*” que permite al usuario la facilidad de programar el cultivo de tal manera que no requiera la presencia del usuario para regarlo y aun así tener un control sobre la cantidad de veces que su cultivo está regándose, permitiendo también tener un cultivo en condiciones ideales para el buen desarrollo de las plantas sembradas en el mismo, adicionalmente el proyecto cuento con accesorios de instrumentación que permiten contralar el suministro hídrico de cada uno de los cultivos como lo son: un relé, una electroválvula, sensores resistivos de humedad del suelo y sensores de flujo de efecto hall.

Una de las aplicaciones de control es lograr tener como su nombre lo indica el control sobre las variables de humedad del suelo y el consumo de agua, para esto la aplicación de control fue desarrollada en el lenguaje Arduino, con la capacidad de utilizar un lector de memorias SD para almacenar los datos correspondientes a la humedad del suelo y al consumo de agua con esto generar un reporte que permita mediante el uso de aplicativos conocidos como Excel interpretar y tomar acciones sobre el correcto funcionamiento del sistema de automatización.

Adicional a esto y teniendo en cuenta que el usuario final por temas laborales o personales no se encuentre en la casa para estar controlando el proyecto y verificar el correcto funcionamiento del mismo, se decide implementar un sistema de acceso remoto mediante el uso de la Raspberry PI 3 el cual cuenta con un sistema operativo igual al de un computador que permite tener aplicativos de acceso remoto como lo es VNC Viewer, anydesk y el IDE de Arduino el cual es necesario para la programación y toma de datos del proyecto, esta tarjeta permite mediante el uso de WIFI y ethernet la conexión a internet logrando tener acceso desde cualquier punto en el que se cuente con acceso a internet, cabe aclarar que

el lugar de instalación del proyecto debe contar con un punto de acceso de internet dedicado para el proyecto.

Palabras clave: Arduino, sensor de humedad de suelo, sensor de flujo de agua, electroválvula.

2. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto busca la implementación de cultivos verticales en hogares urbanos, con el fin de lograr reducir el consumo de agua utilizando elementos electrónicos que permitan la toma de datos teniendo así un control sobre los cultivos de plántulas, permitiendo implementar un cultivo agrícola teniendo en cuenta el poco conocimiento que se tiene en materia agrícola en grandes ciudades.

La realización del proyecto se realizó con el fin de poder llevar el campo a las casas de las ciudades debido a que la mayoría de casas en las ciudades recurren a compra de productos agrícolas en tiendas tipo Fruver, se encuentra la necesidad de generar en las personas el proceso de autocultivo en casas urbanas.

En el ámbito profesional como ingeniero mecatrónico, surge el interés de colaborar a las personas que tienen poco conocimiento acerca de cómo cuidar un cultivo y se busca implementar un proyecto que permita al ciudadano corriente adquirir un cultivo que genere insumos alimenticios en el hogar sin la necesidad de tener conocimientos previos en el campo.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad debido a los cambios climáticos que se presentan en el mundo, se vuelve cada vez más importante hacer una buena disposición del agua, siendo la agricultura una de las actividades económicas que tienen mayor impacto y requerimiento hídrico (Agricultura, El Sector Que Más Agua Demanda En El País, s.f.), se torna cada vez más importante optimizar el uso del agua, garantizando un consumo responsable sin afectar al proceso de producción agrícola.

Una nueva práctica que se está utilizando son los cultivos verticales, estos se emplean en edificios, rascacielos e interiores de las casas con el objetivo de realizar producciones a pequeña escala de productos alimenticios específicos, como lo pueden ser leguminosas, cereales, floricultura, hortalizas, plantas aromáticas etc.

Con esto se busca depender menos de mercados externos y cultivos horizontales tradicionales, las casas o edificios que realizan este tipo de prácticas agrícolas pueden tener una producción de comida en el interior de la casa (indoor), lo cual colabora con la canasta básica familiar, otro beneficio de tener una producción de comida es una reducción de gastos afectando positivamente la economía de las personas que allí habitan, este tipo de cultivos requieren de un porcentaje menor de agua que un cultivo horizontal y un 50% menos de pesticidas y fertilizantes al tratarse de un cultivo tipo indoor. (Díaz et al., 2016).

El principal factor de deshidratación de una planta en un cultivo es la evapotranspiración que esta tiene, las fuerzas que actúan sobre el agua en el suelo disminuyen la energía potencial del agua haciendo que esta se encuentre menos disponible para las plantas, al mantener el suelo húmedo se mejora la energía potencial del agua y se logra hacer que las plantas tengan mejor absorción tanto de agua como de nutrientes que el sustrato le pueda ofrecer a las plantas, es importante tener en cuenta que cuando la energía potencial es baja se dice que el cultivo se encuentra estresado.(Allen et al., 2006).

El consumo de agua potable en Bogotá en el sector agrícola e industrial representa el 82% del total consumido en un día, siendo aproximadamente 1'275.264.000 litros de agua potable (Idárraga, 2014), esto representa un reto para la sociedad de la capital del país, teniendo que buscar las mejores alternativas para disminuir ese consumo de agua.

Actualmente hay un aumento en la demanda de alimentos en las ciudades para garantizar una seguridad alimentaria a toda su población, lo cual se empieza a ver reflejado en la creación de huertas y jardines urbanos dentro de las grandes ciudades de Colombia, esto debido a que a lo largo del tiempo Bogotá ha sido una

de las ciudades en las que se evidencian más casos de desplazados internos debido al conflicto armado que presenta el país (Pinilla et al., 2018).

La población de la ciudad ha ido en aumento y se ve necesario implementar nuevos métodos de producción para abastecer esta necesidad alimentaria para todas las personas, buscando optimizar al máximo los recursos disponibles como el espacio de siembra y el agua.

En la siguiente tabla se identifican las diferentes bondades que pueden presentarse a la hora de automatizar el riego de los cultivos, al tiempo que se presentan una serie de retos o desventajas para tener en cuenta a la hora de realizar el análisis para elegir las alternativas sobre el riego de las plantas.

Ventajas	Desventajas
<p>Se debe tener en cuenta la capacidad del sustrato de retener el agua necesaria para la planta, esto debido a que el suelo una vez se riega tiene un proceso de drenado hasta que llega a su capacidad de campo, es decir el agua remanente una vez el drenado se detiene en contra de las fuerzas gravitatorias, en cultivos donde la capacidad de campo disminuye debido a la baja humedad de la tierra y la alta absorción de agua por parte de las raíces de la planta entra en estado de marchitez permanente, lo que se busca al momento de automatizar este proceso es que la planta no llegue a este punto sino que se mantenga con la capacidad de campo adecuada para el correcto crecimiento de la misma.(Villegas & Torres, 1977)</p>	<p>Incrementa el costo inicial del proyecto ya que se debe tener un buen sustrato que cumpla con las capacidades de retener el agua, un buen sustrato debe contener minerales y nutrientes que permitan tanto el crecimiento de sus raíces como la nutrición de la planta para un óptimo crecimiento, por lo que garantizar estas condiciones en un cultivo vertical incrementa el costo de producción.</p>
<p>Optimiza el recurso hídrico en los cultivos.</p>	<p>Requiere de mantenimientos preventivos para el correcto funcionamiento del sistema. (Ventajas de Los Sistemas de Riego Automatizados Ignasi Conillas, s.f.)</p>

Ventajas	Desventajas
Se garantiza la capacidad de campo del sustrato.	Requiere de una correcta disposición de los residuos al momento de hacer algún cambio en instrumentación electrónica. (Ventajas Del Riego Automático Casas Que Innovan, s.f.)
La cantidad de nutrientes que absorbe la planta mejora. (Ventajas de Los Sistemas de Riego Automatizados Ignasi Conillas, s.f.)	Aumenta el gasto energético debido al consumo de los equipos de instrumentación utilizados durante el proyecto.
Los fertilizantes se dispersan de forma más uniforme evitando malgastarlos.	El aumento de insectos en el área habitable de la casa debido al material biológico en crecimiento
Mejora la productividad de los cultivos (Ventajas Del Riego Automático Casas Que Innovan, s.f.)	Se debe tener cuidado al momento de utilizar, fertilizantes y pesticidas ya que el uso inadecuado de estos podría llegar a afectar de manera negativa las plántulas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los sistemas de riego automatizado (Autores, 2022).

El reducir el consumo de agua es una de las prioridades a nivel mundial ya que el consumo de agua ha ido en crecimiento en los últimos años debido a la gestión de recursos hídricos que realizan cada uno de los países, cabe mencionar que el planeta tierra está constituido en un 71% por agua, pero no por agua dulce, esta representa únicamente el 3% del agua del planeta según las Naciones Unidas hay suficiente agua para toda la población mundial, pero está mal distribuida, un estudio de la ONU afirma que para el 2050 la escasez del agua podría afectar a 5.000 millones de personas debido a la alta demanda que se presenta actualmente y la contaminación de los diferentes suministros de esta.(Ávila, 2019).

Según el acueducto de Bogotá, una persona promedio utiliza unos 110 litros diarios de agua en sus labores de higiene y consumo, pero actualmente por la contingencia del Covid-19 aumentó a 122 litros diarios de agua (Acueducto de Bogotá, 2020) por el aumento de la rutina del lavado de manos y procesos de bioseguridad.

Según la Cámara de Comercio de Bogotá, el requerimiento hídrico de un cultivo horizontal de lechugas es de entre 300mm y 600mm al año (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015), lo cual representa una cantidad de 300 y 600 litros por metro cuadrado al año.

3.1 PREGUNTA PROBLEMA

¿Cómo se puede optimizar el requerimiento hídrico en cultivos de pequeña escala de lechugas, a través de la automatización del sistema de riego?

4. JUSTIFICACIÓN

Uno de los beneficios que ofrece un cultivo vertical es el tiempo de producción, un cultivo horizontal tiene un promedio de 30 a 70 días de producción y cosecha (Rikolto, 2018), sin tener en cuenta el proceso de postcosecha y el tiempo desde el resultado final hasta llegar a la mesa del consumidor final, con este proyecto se espera que en los cultivos verticales de lechuga tengan un tiempo de producción menor, esto con el fin de aumentar la producción mensual a un menor costo y directamente en la casa del cliente final, este proyecto no solo busca ser funcional en términos de aportar al correcto crecimiento de la lechuga, si no también busca convertirse en un proceso de producción a corto plazo para la alimentación de las personas que lo implementen en sus hogares.

El proceso de automatización ayuda en gran parte a reducir los costos de mano de obra y disminuye las necesidades de mano de obra al momento de regar el cultivo, en muchos casos esto es mal visto debido a que se genera menos empleo.

Si se analiza el factor de automatización en los cultivos se puede evidenciar que en la mayoría de casos los cultivos que se pierden se deben a fallas en los cuidados que se tienen durante la etapa de crecimiento de las plantas, al automatizar se quita este problema, ya que se tiene un mayor control sobre las variables del cultivo y permite tener un cultivo saludable, con esto se logra obtener una mayor producción y un menor desperdicio. (Castañón, 2004).



Ilustración 1. Mapa interactivo de las huertas urbanas en Colombia. (Mapeo de Abastecimiento Agroalimentario En Colombia - RENAAC, s.f.)

A partir del crecimiento de las huertas urbanas (Ilustración 1) y de la necesidad de disminuir el consumo de agua nace el proyecto. La automatización del riego de las plantas a partir del uso de microcontroladores y sensores puede permitir optimizar

el uso del agua sin poner en riesgo la soberanía alimentaria de las grandes ciudades.

El aumento del consumo de agua debe ser reducido en otro punto de la cadena de consumo. La automatización del sistema de riego de cultivos verticales implica una disminución del consumo de agua pues el riego solamente se efectúa cuando el sensor de humedad instalado en la tierra de las plantas reporta un porcentaje menor al requerimiento hídrico de la planta.

Esta reducción del consumo de agua también se repercute en la reducción del valor de la factura del agua, esto reduce también el costo final del producto cosechado.

Según (Gutiérrez et al., s.f.) se ahorra aproximadamente un 70% de agua de riego que equivalen aproximadamente a 40 litros diarios de agua en un jardín promedio. Esto con respecto a la automatización de un sistema de riego por goteo.

Además de esto la automatización garantiza que la tierra de la planta mantenga el porcentaje de humedad correcto, para esto se utilizan sensores de humedad los cuales permiten obtener datos mediante la lectura de valores en términos de voltaje o corriente.

Se adquieren y ordenan los datos esta información se puede utilizar para analizar el comportamiento del cultivo y con esto conocer el porcentaje de humedad del suelo en los diferentes momentos del día, uno de los principales problemas que encontramos en los cultivos tipo indoor es el espacio donde se coloca el cultivo, debido a que el lugar donde esté puede no tener la cantidad de luz necesaria o tener mucho sol directo, este es un factor que importa en la evo-transpiración de la tierra.

Si se ubica el cultivo en un espacio con mucho calor el agua que retiene la tierra se tiende a evaporar más rápido, al automatizar este proceso y después de la toma de datos es posible regular los tiempos en los que el cultivo debe ser regado, esto ayuda a que las personas que no tengan conocimientos agrícolas, pero quieran tener una producción dentro de su casa lo puedan hacer teniendo un control completo sobre el cultivo. (García et al, 2013)

Es importante tener en cuenta que en la ilustración 1 únicamente se logra observar los viveros registrados, Bogotá al ser una de las ciudades más grandes de Colombia cuenta con diferentes viveros de vegetales y frutas que se encuentran entre los diferentes sectores de la ciudad y que no se encuentra registrados, así mismo es notable como cada vez más se incentiva el auto cultivo en la casa haciendo que cada vez más gente busque formas de generar sus propios viveros para el consumo propio esto hace que se vea necesario garantizar el requerimiento hídrico en este tipo de cultivos. (Pinilla et al., 2018).

La implementación de cultivos verticales permite abastecer la necesidad de alimentos en los hogares, ya que se permite el cultivo de varias hortalizas al mismo tiempo (Chinchilla, 2020), esto permite presentar el proyecto como una alternativa para tener en cuenta a la hora de tomar decisiones para garantizar la demanda de alimentos creciente en Bogotá.

Tomar el cultivo vertical e implementar una automatización de su sistema de riego permite que las familias produzcan sus propios alimentos, sin tener la necesidad de conocer la manera en que las variables influyen en el crecimiento de la planta.

Los cultivos verticales suelen tener una cantidad limitada de plantas, de manera que es posible hacer el monitoreo y seguimiento de variables relacionadas con el cultivo, tales como la humedad del suelo y el agua consumida, de manera que se puede tener un control sobre el uso de recursos necesarios para el desarrollo del cultivo.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de riego autónomo para la reducción del consumo de agua en cultivos verticales de lechuga, en Bogotá.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar el requerimiento hídrico de cultivos verticales de lechuga ubicados en Bogotá.
2. Implementar un sistema de tuberías para el proceso de riego del cultivo de lechugas.
3. Evaluar el desempeño del sistema y la operatividad de los elementos electrónicos.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad la medición y el monitoreo de variables que interactúan en un cultivo tiene una gran importancia para tomar la decisión de automatización (Avellaneda et al., 2022), buscando la manera de implementar tecnologías nuevas en el desarrollo agrícola del país, como el IoT.

Después de la crisis del COVID-19, se intensificó la necesidad impulsar el desarrollo de la producción de alimentos en entornos urbanos debido a los problemas que se presentaron con la cadena de suministros (Merino & Tigrero, 2021), Merino y Tigrero comentaron la importancia de utilizar plataformas de uso libre para reforzar el trabajo comunitario y facilitar la capacitación de los usuarios en temas de cultivo y robótica.

La utilización de jardines o cultivos verticales permiten cultivar una mayor densidad de plantas en espacios reducidos (Tejada, 2022), permitiendo evaluar la alternativa de los cultivos verticales para el creciente aumento de la demanda de alimentos en las grandes urbes, dado su aumento poblacional, y también según Tejada, se pueden realizar tratamientos con fertilizantes específicos para garantizar un mejor crecimiento de las plantas.

Según Rani, Kumar y Bhushan, el uso de tecnologías del IoT y el protocolo http, permite tener un rápido tiempo de respuesta, logrando tener acceso al encendido y apagado de la bomba de agua a distancia según los datos recolectados por los sensores, además de tener capacidad de escalar para implementar en el futuro sensores de pH o de componentes orgánicos presentes en el suelo (Rani, et al., 2019).

López, indica la importancia de incorporar los conocimientos ancestrales del cultivo de hortalizas a la hora de hacer estudios académicos, permitiendo tener nuevas estrategias a la hora de decidir la técnica de cultivo (López, 2021), también indica la importancia de factores externos al cultivo a la hora de tener en cuenta el beneficio económico que pueda llegar a obtener el productor con su siembra.

En 2021 la secretaría de salud distrital de Bogotá presentó un informe con los resultados de la estrategia de entornos ambientalmente saludables, que busco incorporar conocimientos ancestrales al contexto de huertas agro-ecológicas, teniendo un total de 589.2Kg cosechados entre hortalizas, frutas, verduras, plantas medicinales y aromáticas (Secretaría Distrital de Salud, 2021), durante el año 2021 y esperando un aumento del 100% en los próximos dos años (2022 - 2023).

Taboada y Yanchapaxi en su trabajo "*Automatización de un sistema de cultivo aeropónico experimental con monitoreo remoto mediante sistemas embebidos para la empresa ASEMI*" concluyen que en la automatización de cultivos aeropónicos no se toman en cuenta la importancia de variables como la conductividad del agua para determinar los nutrientes que se encuentran en ella, y tampoco la luz necesaria para el desarrollo del cultivo, recomendando tomarlas en cuenta para trabajos futuros. (Taboada & Yanchapaxi, 2022). A partir de este trabajo se puede entender el avance de tecnologías como Raspberry en el campo de la agricultura de precisión en Latinoamérica.

En el documento "*Desarrollo de un sistema de riego residencial automatizado*" se mostró la importancia de los sensores de flujo en los cultivos residenciales automatizados, además de la importancia en la distribución del agua, también se hace uso de los sensores de humedad del suelo, y el estudio concluye con la velocidad de muestreo óptima es de 60 minutos, pues los cambios considerables en los valores de humedad del suelo suceden entre 50 y 70 minutos (Negrete et al., 2021).

La productividad de los cultivos agrícolas aumenta en importancia a medida que pasa el tiempo, ya que los suelos pierden fertilidad y se aumenta la demanda de alimentos (Barriga Pons, 2019), siendo la tecnología un factor decisivo a la hora de solucionar estas problemáticas, permitiendo predecir la producción y también optimizar los recursos, para evitar situaciones donde pueda existir la escasez de producción.

Zambrano y Cedeño en su revisión del estado del arte de sistemas IoT para optimizar el riego (Cedeño & Zambrano, 2022), exponen las diferentes metodologías y maneras que se están estudiando en la academia actualmente que buscan optimizar el recurso hídrico en el riego de cultivos. A partir de esta revisión sistemática de literatura concluyeron que la tecnología más accesible para optimizar el riego es la tecnología Zigbee, ya que permite ahorrar en recursos humanos y ahorrar en los recursos económicos.

6.2 MARCO TEÓRICO

Título	Importancia
Manual de Producción de Lechuga (Zolezzi et al., 2017)	<p>Es un texto que comprende muchos de los aspectos sobre el cultivo de la lechuga para que el proyecto cuente con todas las buenas prácticas a la hora de desarrollar el cultivo.</p> <p>El documento cuenta con datos específicos sobre las características de cultivo óptimas sobre distintos tipos de lechuga, en el caso del presente trabajo la lechuga tipo <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>acephala</i> Dill, o más conocida como lechuga crespita, la cual según el texto es muy apetecida para cultivar en hidroponía, pero también es posible cultivar en suelo.</p> <p>También aborda distintas técnicas de cultivo de la lechuga, con aspectos técnicos tenidos cuenta a la hora del desarrollo del proyecto.</p>
Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo remoto implementando internet de las cosas (Molina et al., 2020)	<p>Este proyecto implementa el microcontrolador que se ha implementado en el proyecto por lo que ofrece bastante información acerca del funcionamiento y uso de este.</p> <p>El documento también muestra las características generales de una arquitectura IoT, haciendo énfasis en la escalabilidad y la seguridad para mantener un correcto funcionamiento del sistema en cualquier situación.</p>

<p>Sistemas de riego automatizado construido de elementos electrónicos, dispositivo móvil y la construcción de aspersor. (González, 2017)</p>	<p>Este proyecto basa el funcionamiento del sistema de riego utilizando una electroválvula por lo que brinda información sobre el comportamiento de las electroválvulas en este tipo de sistemas y permitió evaluar la mejor opción para el proyecto.</p>
<p>Implementación de un Sistema de Riego Automatizado para Monitoreo Agrícola usando Comunicación IoT. (Rani et al., 2019)</p>	<p>Este documento presentó herramientas para el desarrollo del presente proyecto, debido a que utiliza tecnologías como IoT para el monitoreo de un riego agrícola. El estudio lleva a cabo una metodología para la implementación de un sistema usando IoT, permitiendo al usuario leer las variables del cultivo en tiempo real y tomar decisiones a partir de estas lecturas, de manera que el agricultor siempre tiene el control sobre su cultivo, pero no tiene que ir a tomar las muestras o medidas de los factores que influyen el cultivo de manera manual, mejorando el tiempo de acción y la eficiencia del cultivo.</p>
<p>Diseño e Implementación de Invernadero Agrícola Ambiental Sistema de Monitoreo Basado en Internet de las Cosas. (Li et al., 2012)</p>	<p>La importancia de este documento radica en el seguimiento de variables presentes dentro de un cultivo llevado a cabo dentro de un ambiente controlado. El estudio se realiza en China, donde la agricultura, aún en las condiciones actuales donde China es líder en desarrollos tecnológicos, se realiza de manera tradicional, por lo que el estudio se apoya en el uso del IoT para mejorar la eficiencia en la agricultura china. El estudio concluye con la importancia del rol de la automatización en la agricultura contemporánea y futura para la sociedad china, lo cual se puede extrapolar a la agricultura mundial, para aumentar la producción mundial de alimentos, debido al aumento constante</p>

	de la demanda alimenticia a nivel mundial.
Optimización del riego basado en sensores para la gestión de una granja vertical para el cultivo de microvegetales. (Tavan et al., 2021)	Este documento muestra cómo aumentar la eficiencia del uso del agua en la agricultura utilizando optimización de riego. El estudio muestra un estudio matemático sobre las variables que se controlan en el proyecto haciendo un análisis estadístico.
Prototipo de un sistema automatizado de riego para jardines. (Cañón & Cifuentes, 2018)	Este proyecto de grado es útil para entender cómo conectar arduino a una base de datos mediante MySQL y hacer estudio de los datos entregados por los sensores. El documento muestra una arquitectura clara para el desarrollo de la interfaz para la comunicación entre el arduino y el host, el host y la interfaz gráfica para la interacción con el usuario, y es un antecedente para la implementación de tecnologías de bases de datos con el dispositivo arduino.
Sistema de riego automatizado con arduino. (Guijarro-Rodríguez et al., 2018)	Este documento habla de la importancia de las tecnologías libres para el desarrollo de cultivos domésticos. También muestra un antecedente de uso de la plataforma Arduino en la automatización del riego de plantas, en este caso la planta dracena. El estudio muestra clara metodología a seguir para la implementación del circuito de control y automatización del riego de la planta utilizando la plataforma arduino, dejando claros los sensores y otros dispositivos periféricos utilizados para llevar a cabo el estudio.

	De esta manera el estudio funcionó como una guía preliminar para el presente proyecto.
Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. (Lugo et al., 2011)	Es un estudio muy completo sobre cómo automatizar un sistema de riego teniendo en cuenta variables de la naturaleza, nutrientes y propiedades del suelo. El documento muestra avances históricos en la automatización de riegos, a través de sistemas de control que tienen en cuenta variables meteorológicas para calcular la evapotranspiración de las plantas y también para calcular el momento óptimo de riego, en caso de cultivos en suelo al aire libre.
Arduino en la automatización de los sistemas de riego. (Cervantes, Williams; Santana, Luis; Molina, 2016)	El documento habla sobre la importancia de usar el Hardware Arduino en los sistemas de riego. El documento presenta un detallado proceso de la implementación de un algoritmo de control con el uso del hardware libre Arduino, incluyendo planos electrónicos de la PCB y un plano hidráulico de las tuberías y electroválvulas utilizadas para llevar a cabo el proyecto.
Guía metodológica para la implementación de sistemas de captación de aguas lluvias para la producción agrícola. (Peñaranda & Rodríguez, 2014)	El documento muestra la importancia de buscar nuevas maneras de captar aguas para la producción agrícola y optimizar el uso del agua. El estudio también brinda estándares técnicos sobre distintos tipos de riego utilizados en la agricultura moderna y hace una comparación sobre las distintas características de carácter hídrico y de calidad de las plantas que se siembran haciendo uso de los sistemas de riego.

<p>Una nueva metodología de análisis de decisiones multicriterio para la Selección de Nueva Infraestructura de Suministro de Agua. (Amorocho-Daza et al., 2019)</p>	<p>El autor habla sobre la importancia de optimizar el uso de agua potable y de encontrar nuevas formas confiables de acceso al agua. El estudio muestra un apartado sobre el análisis económico que se debería hacer a la hora de desarrollar nuevos proyectos de suministro de agua, siempre priorizando que sean más eficientes.</p>
<p>Sistemas automatizados para agricultura inteligente. (Chandavale et al., 2019)</p>	<p>El artículo habla de la importancia en aumentar la cantidad de comida disponible para el desarrollo de la humanidad. El estudio muestra la importancia que ha adquirido en la agricultura el uso del IoT acompañado del “<i>Cloud Computing</i>” para tomar todos los datos de los sensores presentes en los cultivos modernos y enviarlos a los centros de control para tomar las decisiones pertinentes al cultivo. El documento también hace una revisión de la literatura analizando los sistemas de monitorización a distancia existentes para la agricultura, dando sus características más importantes para su futura implementación en la agricultura mundial.</p>
<p>Marco integrado para aplicaciones agrícolas centradas en el agricultor que utilizan arquitectura IoT. (Sunil et al., 2019)</p>	<p>El autor señala la importancia de la arquitectura IoT en las nuevas tecnologías para el desarrollo agrícola. El documento hace uso de tecnologías IoT para la conexión entre los dispositivos instalados en campo y el agricultor, a través de bases de datos en tiempo real utilizando la plataforma Android y servicios de Google para su implementación.</p>

<p>Diseño, construcción e implementación del sistema de suministro de recurso hídrico para el laboratorio de experimentación agrotécnica y de energías renovables de la facultad de ingeniería. (Gutiérrez & Vargas, 2018)</p>	<p>Este estudio muestra la importancia de un diseño óptimo de suministros hídricos para el desarrollo de proyectos agrotécnicos.</p> <p>El documento muestra una serie de metodologías y estrategias utilizadas para el alistamiento de los materiales y terreno a utilizar en el desarrollo del proyecto.</p>
--	--

Tabla 2. Marco teórico (Autores, 2022).

6.3 MARCO CONCEPTUAL

6.3.1 Cultivos verticales

Los cultivos verticales son una idea de producción enfocada en la idea de incluir cultivos de alto rendimiento al interior de las edificaciones o casas de zonas urbanas donde generalmente es difícil llegar a ver cultivos de autoproducción.

Con el fin de mitigar el daño ambiental por el uso innecesario de recursos naturales se vuelve necesario el uso de fuentes renovables para el cuidado y mantenimiento de estos tipos de cultivos, al ser cultivos de tipo indoor se logra dar una auto producción que permite a los habitantes de las casas tener una fuente de alimentación básica.

Este tipo de cultivos permite la automatización de estos con el fin de garantizar las condiciones necesarias para el crecimiento correcto de las plantas que allí se encuentren

6.3.2 Requerimientos hídricos de la lechuga

Las condiciones idóneas para tener un cultivo de lechuga se deben determinar no solo por el requerimiento hídrico de la planta, adicional a esto debemos tener en cuenta las condiciones de temperatura y humedad relativa en la que estas se van a desarrollar, las condiciones de temperatura en las que las lechugas pueden

germinar son entre 15 y 18 °C, aunque la documentación nos muestra que las lechugas se pueden dar desde los 5 °C el óptimo desarrollo oscila entre los 16 y 20°C.

Para este proyecto, aunque se debe de tener en cuenta las condiciones de temperatura y humedad, el objetivo es garantizar la humedad del suelo por lo que entender el requerimiento hídrico de la planta se vuelve vital, las lechugas tienen una alta sensibilidad al déficit hídrico porque lo que estas no pueden estar en ambientes secos deben mantener una humedad oscilando entre -20KPa y -60KPa para tener un crecimiento óptimo.

6.3.3 Microcontrolador

El controlador de campo que se pretende implementar en el proyecto funciona gracias al uso del microcontrolador ATmega328/P presente dentro de la conocida tarjeta de desarrollo de código libre Arduino UNO, haciendo su uso muy atractivo para este proyecto, este tiene entradas análogas las cuales permite adquirir los diferentes valores de los sensores, por otra parte las salidas digitales permiten tener control sobre la apertura y cierre del actuador, este microcontrolador como se observa en la ilustración 2, viene con una distribución de pines la cual se encuentra en las especificaciones técnicas del proveedor así como la correcta configuración de funcionamiento y alimentación, para el correcto uso del mismo debemos realizar el montaje para que le microcontrolador funcione adecuadamente.

Pin-out

Figure 5-1. 28-pin PDIP

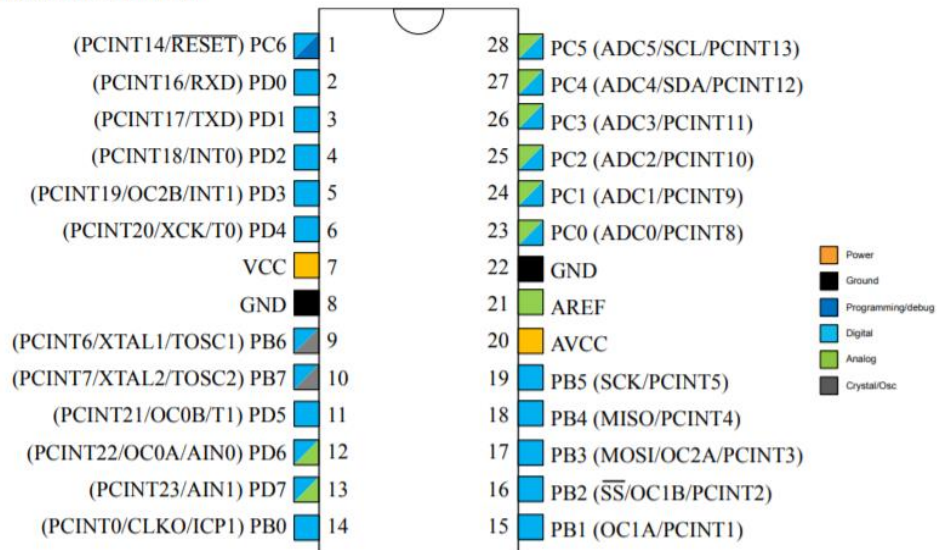


Ilustración 2. ATmega328/P hoja de especificaciones. (Atmel Corporation, 2016)

El circuito para el funcionamiento adecuado del microcontrolador consta de un circuito regulador de 5 voltios con el que se garantiza el voltaje de operación de este.

Para controlar la apertura de la electroválvula es necesario utilizar relevos de 5 voltios los cuales permitirán tener un control sobre la alimentación de los 12 voltios que la electroválvula requiere para su apertura, este se activará mediante una salida digital del microcontrolador aplicado a un transistor el cual al entrar en su zona de saturación permite el paso de corriente de colector a emisor de los 5 voltios y así permite el paso de corriente a la bobina del relevo y con esto cerrar el contacto normalmente abierto, para esto se utilizaron transistores NPN que permiten tener una protección del microcontrolador, además se debe implementar diodos de protección en las bobinas de los relevos con eso se evitara corrientes inversas que puedan causar cortos o daños a la tarjeta del controlador de campo y así garantizar la vida útil del microcontrolador.

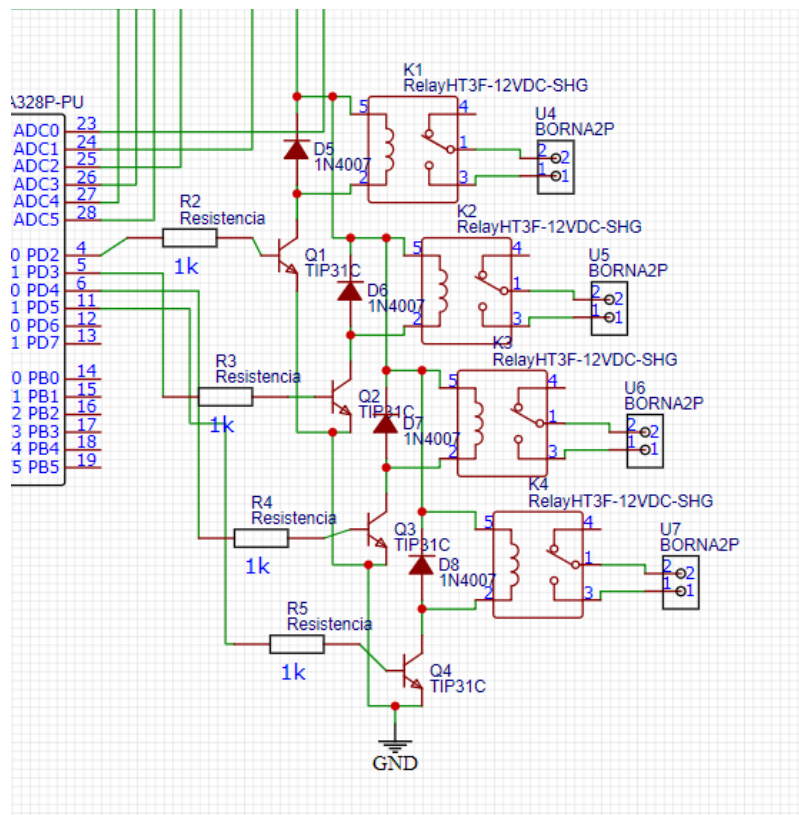


Ilustración 3. configuración de relevos para salidas digitales. (Autores, 2022).

6.3.4 Actuadores

La electroválvula es un sistema electromecánico que nos permite tener control sobre el flujo de agua en el sistema de riego, actualmente en el mercado se encuentran diferentes tipos de electroválvulas, de diferentes medidas y voltajes, la elección de esta depende de los requerimientos del sistema, para usar correctamente ese elemento es importante tener en cuenta el sentido de flujo de esta ya que es el flujo de funcionamiento de la electroválvula si por alguna razón el sentido de flujo es incorrecto esta no cumple su función de válvula y permite el paso de agua sin importar si está abierta o cerrada.

Según las especificaciones técnicas la electroválvula que se utilizara en el siguiente proyecto tiene las siguientes características

- Voltaje de operación de 12 voltios
- Rosca de 1/2" como se muestra en la *ilustración 4*.



Ilustración 4. Electroválvula (Electronilab, s.f.).

6.3.5 Sensores

Debido a que el presente proyecto busca reducir el consumo de agua al momento de regar las plantas se vuelve indispensable esta variable, por lo que la implementación de sensores que permitan tener un control sobre el consumo de agua se vuelve indispensable, para esto utilizar un sensor de flujo permite medir cada vez que el agua tiene flujo constante hacia la tubería de polipropileno de 16 mm, la cual utilizan los sistemas de riego en cultivos

verticales, con esto y con el uso de una memoria SD se busca almacenar los datos reportados por el sensor y medir el consumo mensual de agua en el sistema de riego.



Ilustración 5: Sensor de flujo YF-S201 (All Datasheets, s.f.)

Este según las especificaciones técnicas del proveedor se debe alimentar con una fuente de 5 voltios de voltaje directo, por lo que se puede utilizar la alimentación del regulador de voltaje con el que se alimentara el microcontrolador, internamente tiene una hélice y un imán que se mueve al entrar en contacto con agua y a su vez este sensor utiliza el principio de efecto hall para enviar pulsos al microcontrolador y mediante la caracterización de estos poder se logra conocer el caudal y consumo de agua del sistema. (WikiSeeed Studio, 2013)

Los sensores de humedad resistivos que se utilizaron en el proyecto poseen dos placas metálicas en cada una de sus puntas, estas placas conectadas entre sí generan una resistencia la cual varía dependiendo de la humedad del suelo a la que este se exponga, al haber humedad en el suelo la resistencia de este sensor aumenta haciendo que el voltaje que llega al microcontrolador sea menor y con la caracterización de este se puede establecer a que porcentaje de humedad se encuentra la tierra, esta es la variable que se midió y con la cual el microcontrolador va a trabajar en conjunto con la electro válvula según la lógica de funcionamiento, para regar las plantas, es decir si la humedad del suelo baja quiere decir que es momento de regar las plantas por lo que el microcontrolador energiza la electro válvula permitiendo así el flujo de agua al sistema de riego, una vez la humedad llegue al porcentaje deseado esta se debe cerrar, de ahí la importancia del uso de este sensor en el presente proyecto.



Ilustración 6: Sensor de Humedad YL-1000. (Llamas, 2016)

6.3.6 Sistema de riego

Este proyecto está considerado para sistemas de riego en casas en la ciudad de Bogotá como es de saber no todos tienen en la casa un patio donde se puede tener un cultivo, debido a esto implementamos el proyecto en jardines verticales ya que estos se pueden implementar en cualquier pared, para lograr garantizar la disposición de agua del cultivo se utilizará manguera o tubería PVC de 250 PSI de presión lo que nos permite trabajar con la presión de las casas en Bogotá la cual varía entre 65 y 70 PSI dependiendo del área de Bogotá donde estemos ubicados.

Para el sistema de riego actualmente en el mercado se manejan mangueras de polipropileno (PP) de 16 mm a la cual se le pueden acoplar codos y conexiones tipo TEE para crear el circuito del agua teniendo una terminación en goteros de flujo variables por lo que se logra tener un mayor control sobre la cantidad de agua que llega a las plantas.

6.4 MARCO LEGAL

Leyes	Descripción
Ley 101 de 1993	Asigna al ministerio de agricultura la función de desarrollar políticas y planes de protección y productividad agropecuaria y la responsabilidad de ejercer acciones para minimizar los riesgos alimentarios y ambientales que provengan del empleo de los insumos agropecuarios. (Congreso de la República, 1993)
Ley 09 de 1979	<p>Para la protección del Medio Ambiente, se establece por la presente ley, las normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias en lo que se relaciona a la salud humana y además los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan las condiciones sanitarias del ambiente. (Ley 09, 1979).</p> <p>Título II. SUMINISTRO DE AGUA</p> <p>Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones". (Decreto 3930, 2010).</p> <p>Capítulo II. Definiciones</p> <p>Capítulo III. Del ordenamiento del Recurso hídrico.</p> <p>Capítulo IV. De la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas y marinas.</p>

	Capítulo V. De los criterios de calidad para destinación del recurso.
Decreto 1076 de 2015	“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible” (Decreto 1076, 2015). ARTÍCULO 2.2.3.3.9.5. TRANSITORIO. Criterio de calidad para uso agrícola (Ver Anexo 1).
Resolución 6619 de 2011	“por la cual se establecen las características y condiciones para el diseño e implementación de jardines verticales en el Distrito Capital y se toman otras determinaciones”. (Nieto, 2011)

Tabla 3. Marco legal para la implementación del proyecto (Autores, 2022).

6.5 MARCO GEOGRÁFICO

Este proyecto se implementó en una casa ubicada en la ciudad de Bogotá D.C en el barrio colina norte, la casa se encuentra dentro de un conjunto residencial llamado Quintas de Santa María 3 cuyas coordenadas son $4^{\circ} 44' 41.5428''$ N y $74^{\circ} 4' 0.3828''$ W, la casa cuenta con 100 m^2 de área, el proyecto se ubicó en la primera planta de la casa en la zona del patio esta cuenta con 4 m^2 de área para la instalación del jardín vertical, adicionalmente cuenta con un punto de agua para la alimentación del sistema y buena iluminación para mejorar la vida de las plantas.



Ilustración 7: Ubicación del proyecto (Google maps, 2022).

6.6 MARCO HISTÓRICO

El inicio de la agricultura se puede definir en el paso del paleolítico al neolítico, donde el hombre deja de ser cazador recolector y pasa a formar asentamientos, domesticando a su paso animales y plantas, ¿Por qué se inicia la agricultura? la respuesta a esta pregunta es la religión organizada. Con los asentamientos aparecieron los “chamanes”, guías espirituales de las tribus nacientes que tenían respuestas a sus dudas, estos chamanes conocían las drogas. Conocían sus efectos curativos como sus efectivos alucinógenos, conectando a las tribus con el mundo irreal.

Según esta teoría la recolección de gramíneas silvestres no habría sido para la alimentación de la tribu sino para la producción de una bebida alcohólica, cerveza, mediante la fermentación de las levaduras que están presentes en casi todas las regiones y en caso de no encontrarse se salivaban los granos, con el ejemplo de las tribus amazónicas y andinas al producir la chicha. (Martínez, s.f.).

Los chamanes reunían a toda la tribu para realizar sus ceremonias espirituales y para estas reuniones necesitaban de suficiente droga para la tribu, y se cree que por esa razón es que se inicia la agricultura, pues los desechos de las plantas que se utilizaban para producir esa droga o esa bebida serían principalmente las semillas y éstas quedaban en una zona cerca del templo de manera que serían más accesibles para sus cosechas en cuanto germinaran.

La sociedad occidental moderna proviene del imperio Romano y la agricultura no es la excepción. Dentro de las clases sociales del imperio Romano, estaban los campesinos, la columna vertebral de la economía y el sustento del imperio.

La agricultura romana también se vería beneficiada por los avances tecnológicos en la infraestructura romana, el desarrollo de molinos y acueductos aumentaría sustancialmente la cantidad y la calidad de los productos cosechados por los agricultores romanos.

En la edad moderna con la liberación de la economía y la aparición de la propiedad privada permitió que el campesino fuera propietario de sus tierras, dándole la opción de invertir sus ganancias en la tecnificación de su cultivo en vez de dárselo al señor feudal al cual le rendía pleitesía.

Con respecto a la edad contemporánea con la aparición del tractor en el siglo XX llevó a que las tareas tan fuertes y arduas de labrar, trillar, sembrar y cosechar se hicieran mucho más eficientemente, de manera que la mecanización de la agricultura fue uno de los mayores logros de la ingeniería en el Siglo XX, y actualmente gracias a los agroquímicos y la constante innovación del campo ha permitido que la eficiencia de la agricultura siga en aumento.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

El presente proyecto se desarrolló siguiendo un enfoque de investigación correlacional, haciendo una comparación entre el uso efectivo del agua y el crecimiento del cultivo, siguiendo una metodología cuantitativa, realizando la adquisición de los datos arrojados por los sensores y analizando el comportamiento del cultivo a partir de los datos obtenidos, utilizando fuentes primarias y secundarias, para apoyar la investigación y para encontrar información pertinente con respecto a las variables necesarias para el buen funcionamiento del proyecto, como la humedad relativa del suelo necesaria para el tipo de cultivo.

El estudio pretende identificar la relación o el grado de asociación que puede existir entre las dos variables (Hernández Sampieri, 2000), como lo son el consumo de agua y la automatización del sistema.

Los datos se recolectaron mediante experimentos y mediante la observación del comportamiento del cultivo, se pretende tener dos cultivos verticales, uno automatizado y otro sin automatizar, de manera que se puedan comparar los datos arrojados por cada uno y determinar el grado de relación del consumo de agua con la automatización del sistema.

Las fases que componen el proyecto son:

- Fase 1: Recolección de datos sobre los requerimientos hídricos de la lechuga, como se ha especificado anteriormente en el documento la planta tiene un requerimiento hídrico del -20KPa a -60KPa.
- Fase 2: Definición del tipo de adquisición de datos a utilizar para medición de variables y seguimiento del proyecto, para medición de la humedad de la tierra se tiene contemplado el uso de sensores y para la adquisición de datos emplearemos el uso de microcontroladores con las características mencionadas anteriormente.
- Fase 3: Diseño de las tuberías y de la distribución de los bolsillos, utilizaremos tubería en PVC y polipropileno, el PVC soporta la presión hasta la electroválvula y para la llegada a los bolsillos se utilizó tubería de polipropileno ya que esta permite adaptar goteros para el riego de las plantas.
- Fase 4: Definición del método de automatización a utilizar según los requerimientos hídricos y la adquisición de datos, se utilizó un control por máquina de estados que permite la apertura y cierre de la electroválvula de acuerdo con la medición de la humedad relativa de la tierra.

- Fase 5: Construcción de los dos cultivos, el automatizado y el que no está automatizado, se utilizaron bolsillos de siembra distribuidos 8 para la siembra de automatización y 8 para siembra normal con el fin de poder comparar el consumo de agua y verificar que efectivamente el proyecto cumple con su función de reducir el consumo de agua.
- Fase 6: Siembra de las plantas, adquisición de datos de los cultivos y seguimiento al comportamiento de los cultivos.
- Fase 7: Análisis de los datos recolectados y conclusión del proyecto, por último, se analizaron los resultados del consumo de agua entregados por los sensores y la cantidad de agua que se utilizó para cada uno de los cultivos.

La muestra consiste en un total de 16 plantas, de manera que la mitad (8) de las plantas tienen el riego automatizado y la otra mitad no tiene el riego automatizado. Se comparan los datos arrojados por ambos cultivos, en términos de consumo de agua, al momento de la cosecha.

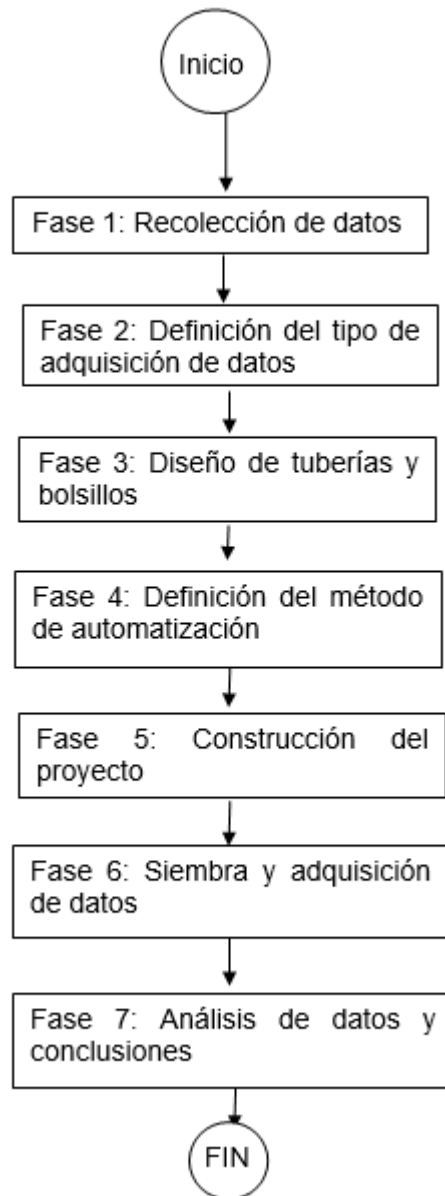


Ilustración 8: Diagrama de flujo del proyecto. (Autores, 2022).

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 REQUERIMIENTOS

Uno de los principales requerimientos para el desarrollo del proyecto fue mantener el nivel de porcentaje de humedad del suelo de las plantas sembradas, con el fin de garantizar esta, se implementó un sistema que permitiera transportar el agua al cultivo, fue necesario la implementación de una red de agua potable, debido a los accesorios instalados (sensores, electro-válvulas y válvulas de corte) necesarios para el manejo del flujo de agua y la presión que provenía de las bombas internas del conjunto (65-70 PSI) esta se instaló en tubería PVC, ya que esta soportaba altas presiones (200 PSI) y permitía conectar los elementos necesarios para esto, por otro lado para el sistema de goteo instalado en los bolsillos se instaló tubería de polietileno 16 mm después de las electroválvulas con esta se logró adaptar los goteros de flujo variable para humedecer la tierra de las plantas lentamente utilizando el método de riego por goteo y tener un riego de manera lenta y continua que permitiera tener mejor medida de los sensores de humedad porcentual instalados en los bolsillos.

Debido a que es un sistema de riego y durante el desarrollo del proyecto se tuvieron inconvenientes con la presión del agua y derrames de la misma, fue necesario aislar el circuito de control de la zona de cultivo, por motivos de seguridad y para garantizar el óptimo funcionamiento del microcontrolador y el circuito estos se instalaron en un área separada a no más de 10 m de distancia (con el fin de evitar la caída de tensión y obtener valores reales de los sensores sin pérdidas de señales), mediante cableado y canalización por canaleta se enviaron las entradas y salidas para el microcontrolador así mismo para la alimentación del circuito de relevos y módulos de los sensores.

Otro de los principales requerimientos encontrados fue la implementación de un sistema con acceso remoto, para monitorizar el óptimo funcionamiento de los sensores instalados para la humedad del suelo, con este se logró tener un control no solo de la información obtenida de los sensores, también permitía regar de manera manual el riego y medir el consumo de manera remota, se evidenció que el flujo de energía eléctrica en entornos de riego presenta riesgos. Este sistema permitía monitorizar que el funcionamiento de los sensores resistivos de humedad del suelo YL – 1000 fuera el esperado, debido a que presentan problemas en su funcionamiento a largo plazo debido al fenómeno de hidrolisis.

La recolección de datos se realizó en lapsos de tiempo definidos durante horarios del día (el dato se tomó a las mismas horas) para su posterior análisis, de esta manera garantizar que todas las medidas fueran en el mismo lapso de tiempo con

esto el sistema de riego se realizara de manera sistematizada, esto permitió que se cumpliera con las mismas condiciones al momento de regar las plantas, así mismo para el riego manual de las plantas se implementó dentro de la tubería una electro-válvula comandada por horarios para que el riego fuera en momentos específicos del día y poder tener un control de la cantidad de veces que se regaba así como consumo de la misma red, para el sistema manual fue necesario revisar de manera constante las plantas ya por la evo transpiración del agua en días cálidos estos podían tender a tener menos humedad en el la tierra controlada de manera visual.

La programación de la tarjeta de desarrollo Arduino UNO debía cumplir con la condición de entregar el fluido hídrico al cultivo de prueba automático, pero al mismo tiempo permitir que mediante el acceso remoto se pueda regar el cultivo de control manual, este riego del cultivo de control manual se debía hacer todos los días a la misma hora y con la electroválvula activa la misma cantidad de tiempo.

8.2 DISEÑOS

Se realizaron dos tipos de diseño durante el desarrollo del proyecto, diseño de tubería y diseño electrónico.

El diseño de tuberías para el transporte del recurso hídrico desde la red de acueducto del conjunto hacia el cultivo, teniendo en cuenta las necesidades de reducción de presión para garantizar la vida útil de las mangueras de polietileno y así mismo garantizar que los empalmes en codos y uniones no se reventaran ya que la manguera de polietileno no resiste mucha presión y al momento de que esta aumentara podría tender a reventar los codos causando derrames innecesarios de agua y arrojando valores de consumo incorrectos.

El diseño electrónico fue pensado para garantizar la transmisión de la señal de los sensores hacia la tarjeta de control Arduino UNO, separando la etapa de control de la etapa de potencia a través de transistores y relés, para garantizar que el circuito de control no presentara interferencias con respecto a los cambios de estado de las electroválvulas, con esto proteger de picos de corriente el microcontrolador ya que estas al estar alimentadas con 12 V 1A podían generar corrientes inversas que afectaran el funcionamiento del mismo.

8.2.1 Diseño de tuberías:

Para el diseño de la tubería, esta se conectó directamente a la tubería principal de la casa que llega desde el sistema de bombas alimentadas desde el acueducto de Bogotá, la presión con la que esta llega según el manómetro instalado es de 65 – 75 PSI, debido a esto se utiliza tubería en PVC (150 PSI) ya que la presión es muy alta para utilizar las mangueras de riego en polietileno de 16 mm conectadas directamente a la red de agua potable de la casa, debido a que esta manguera únicamente aguanta presiones entre los 20 – 30 PSI según el proveedor de la manguera.

El uso de la manguera de polietileno fue necesaria con el fin de poder adaptar los goteros de volumen variable y adaptarlo a lo que sería un sistema de riego por goteo convencional, cabe mencionar que estos sistemas de riego por goteo generalmente se implementan conectados directamente a la llave y es el usuario final el encargado de abrir y cerrar la misma para realizar el riego o se utilizan timer's que permiten el paso de agua de la red principal a la manguera de polietileno, el proyecto desarrollado requería más instrumentación ya que el objetivo era poder implementar sensores que permitieran conocer el consumo de agua adicional que permitiera tener un control sobre en qué momentos se debían regar acorde a los sensores de humedad instalados en cada uno de los bolsillos por lo que implementar solo manguera de polietileno no fue una opción viable.

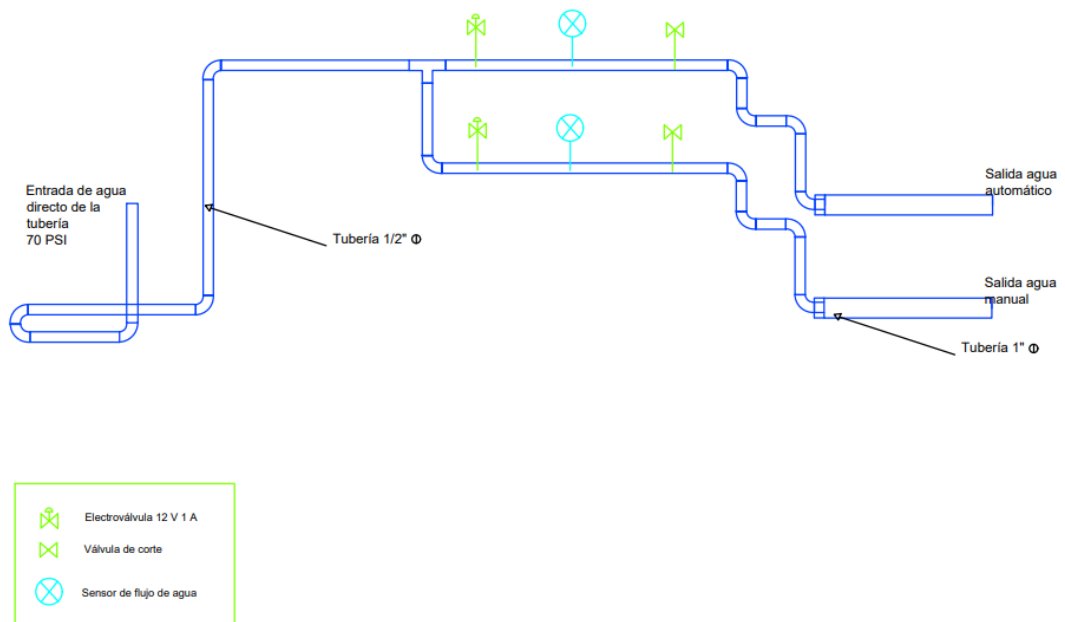


Ilustración 9: Diseño de tuberías (Autores, 2023).

Como se evidencia en la *ilustración 9* se utilizaron dos electroválvulas, dos sensores de flujo y dos válvulas de corte, con el fin de poder controlar el consumo de agua, tanto en el riego manual como en el riego automatizado, se derivó la tubería en 2 secciones controladas cada una por las electroválvulas permitiendo así tener una derivación de tuberías una dedicada para el riego automatizado y la otra dedicada para el riego manual, con esto se tuvo control del riego desde el controlador de campo, adicional a esto se instalaron sensores de flujo de agua en cada una de las salidas de las electro válvulas gracias a esto pudimos obtener los datos del consumo de cada uno de los sistemas de riego tanto el automatizado como el manual

Debido a las altas presiones que llegan del acueducto, las mangueras de polietileno no resistieron estas presiones y comenzaron a tener fugas en los empalmes (codos, tees y obturadores) por lo que fue necesario implementar una válvula de corte en cada una de las salidas y una reducción de ½" a 1", con esto se redujo el caudal, el utilizar válvulas de corte con una apertura del 10 - 30% permitió tener un mayor control sobre la salida final de la tubería, al reducir el caudal antes de la reducción nombrada anteriormente esta funciona como tanque permitiendo así tener más tiempo antes que la presión en la tubería aumentara lo suficiente para causar daños en la tubería de polietileno evitando así que las mangueras reventaran por el exceso de presión y permitiendo que la humedad en la tierra fuera la necesaria para que el comando del controlador apagara las electroválvulas, para el riego manual se estableció un tiempo de riego, este tiempo permitía la apertura y cierre de la electro válvula antes de que la presión subiera lo necesario para causar daños sobre las mangueras de polietileno, el tiempo mencionado anteriormente se tomó haciendo pruebas de riego manual y evidenciando de manera visual la humedad de la tierra ya que el riego manual no contaba con sensores de humedad de tierra como el riego automatizado, por lo que el único factor que podía abrir y cerrar esta electroválvula era la persona encargada de realizar el riego.

8.2.1.1 Cálculos:

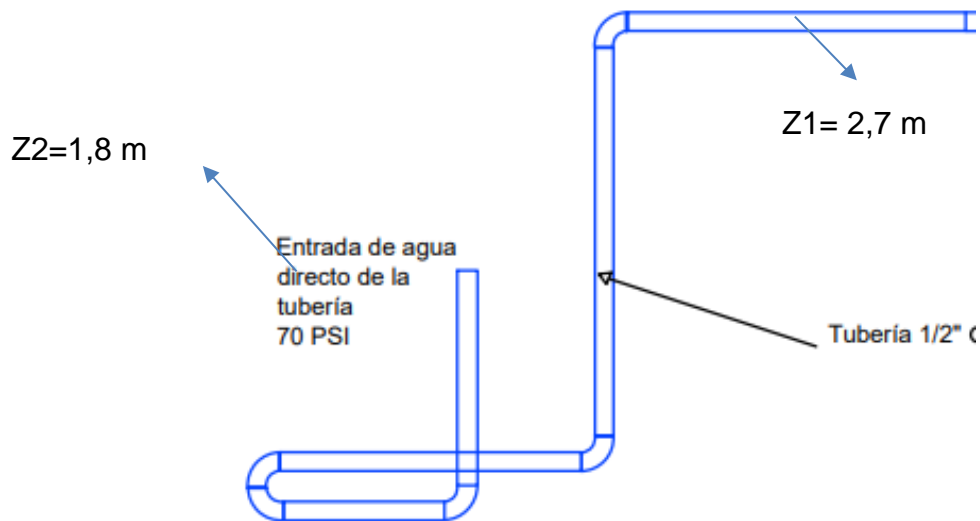


Ilustración 10: Diseño de tuberías primera sección (Autores, 2023).

Se inicio diseñando la tubería calculando la sección de la ilustración el caudal de esta para esto se utilizó la siguiente formula:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V \quad (Eq 7.1)$$

Se debe calcular la velocidad para poder conocer el caudal dentro de la tubería para esto aplicando la ecuación de Bernoulli.

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\varphi} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\varphi} + h_{1-2} \quad (Eq 7.2)$$

Para este ejercicio se toma la presión en el punto 1 igual a la presión en el punto 2 ya que la presión en la tubería es la misma en ambos puntos.

La velocidad en la sección inicial de tubería no cambia por lo que se toma la V_1 como 0 y se procede con el despeje de la ecuación obteniendo la siguiente ecuación:

$$h_1 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (Eq 7.3)$$

De esta ecuación hace falta conocer la velocidad variable que se está calculando y las pérdidas por fricción dentro de la tubería de punto 1 a punto 2 (h_{1-2}), para este último se aplica la ecuación de Darcy Weisbach.

$$h_{1-2} = F \left(\frac{L_t V_2^2}{D 2g} \right) \quad (Eq 7.4)$$

Se reemplaza en la ecuación de Bernoulli obteniendo la siguiente ecuación:

$$h_1 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + F \left(\frac{L_t V_2^2}{D 2g} \right) \quad (Eq 7.5)$$

$$h_1 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \left(1 + F \frac{L_t}{D} \right) \quad (Eq 7.6)$$

Despejando esta ecuación se obtiene la ecuación para la velocidad en la tubería.

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 + \frac{F L_t}{D}}} \quad (Eq 7.7)$$

Para encontrar el valor de F de Coolebrook se utilizó la siguiente ecuación:

$$F = \frac{1,325}{\left(-\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2} \quad (Eq 7.8)$$

Con el fin de lograr resolver la ecuación se debe conocer el número de Reynolds

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (Eq 7.9)$$

Según la tabla en el anexo 6 la rugosidad absoluta del PVC (ε) es 0,0015, como es evidente para obtener estos valores es necesario los valores de F y V por lo que de seguir reemplazando no se obtendría a una respuesta final por lo que se realizaron iteraciones mediante un programa realizado en Excel, se asume un valor de F para (Eq 7.6) con esto se halló una velocidad luego de esto se reemplazó esta velocidad en (Eq 7.8) y finalmente se halló el valor de F en (Eq 7.7) este proceso se debe realizar hasta que el valor asumido de F sea igual al valor calculado de F en (Eq 7.7).

Realizando las iteraciones dando como resultado un valor F de 0,02375 con este valor se calcula las ecuaciones anteriores para esto se tomarán los siguientes datos:

- Longitud de tubería: 3 m
- Longitud equivalente a los accesorios: 17,4 cm – 0,17 m
- Longitud total de tubería: 3,17 m
- Densidad del fluido (agua): $998 \frac{Kg}{m^3}$
- Viscosidad del fluido: 0,001005 pa*s
- Rugosidad del PVC: 0,0015 mm
- h1= 2,7m
- h2=1,8m
- diámetro interno de la tubería: 16,6 mm - 0,0166

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(9,8)(2,7 - 1,8)}{1 + \frac{0,02375 * 3,17}{0,166}}} = 1,785 \frac{m}{s} \quad (Eq 7.10)$$

$$Q = \frac{\pi 0,0166^2}{4} 1,785 = 0,386 \frac{L}{s} \quad (Eq 7.11)$$

Una vez obtenidos estos datos se procede a calcular la siguiente sección hasta la válvula de corte se contempla que la electroválvula está abierta para este diseño

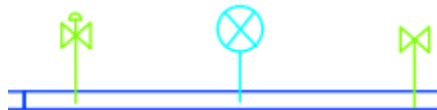


Ilustración 11: Diseño de tuberías segunda sección (Autores, 2023).

Como se puede observar el tramo de tubería en esta sección está a la misma altura y el diámetro de tubería no cambia por lo que se contempla el mismo caudal y la misma velocidad durante este recorrido

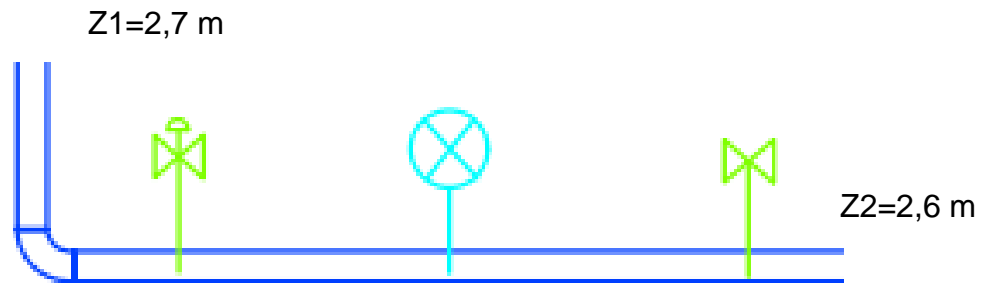


Ilustración 12: Diseño de tuberías tercera sección (Autores, 2023).

Se utilizó la siguiente ecuación:

$$2,7 + \frac{1,785}{2(9,8)} = 2,6 + \frac{V_2^2}{2(9,8)} + 0,1 \quad (\text{Eq 7.12})$$

$$V_2 = 1,785 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (\text{Eq 7.13})$$

Se obtuvo como resultado la misma velocidad por lo que al analizar se observa que tendrá el mismo caudal.

En las válvulas de corte se dejaron abiertas un 20 % con el fin de reducir el caudal para controlar el caudal a la salida de la tubería teniendo que el caudal obtenido fue de $0,386 \frac{\text{L}}{\text{s}}$ el caudal luego de electroválvula será de $0,0772 \frac{\text{L}}{\text{s}}$ con este nuevo caudal se realizó el cálculo del último segmento de tubería.

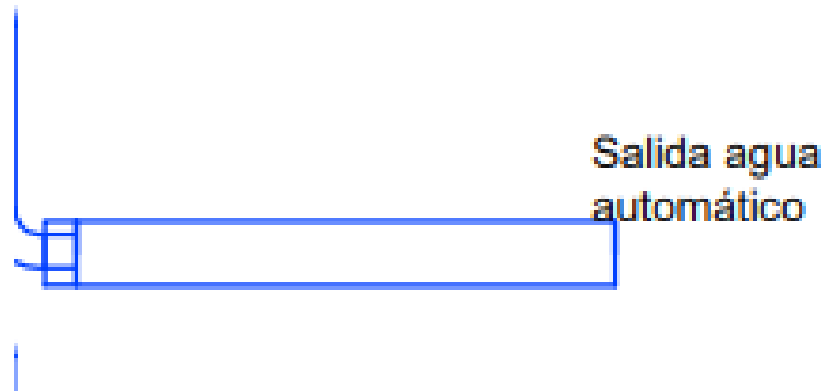


Ilustración 13: Diseño de tuberías cuarta sección (Autores, 2023).

En esta sección se ubica una reducción de tubería de ½” a 1” primero se calcula la velocidad despejando la fórmula con el nuevo caudal obtenido.

$$0,0772 = \frac{\pi 16,6mm^2}{4000} V \quad (Eq 7.14)$$

$$V = 0,35 \frac{L}{s} \quad (Eq 7.15)$$

Se va a calcular la reducción teniendo los datos de velocidad y teniendo en cuenta que el diámetro interno del tubo de 1” es de 24,48mm equivalente a 0,024m las alturas también son iguales por lo que se pueden cancelar en las fórmulas.

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2 \quad (Eq 7.16)$$

$$V_2 = \frac{V_1 * A_1}{A_2} \quad (Eq 7.17)$$

$$V_2 = \frac{0,35 * 0,21}{0,47} = 0,156 \frac{L}{s} \quad (Eq 7.18)$$

Requerimientos hidráulicos

Para el diseño hidráulico se requirieron los siguientes materiales:

- Tubería PVC ½” x 30 m
- Unión ½” x 1

- Buje de ½" a ¾" x 7
- Tee ½" x 1
- Unión roscada ½" x 3
- Codos ½" x 10
- Adaptadores hembra 1/2" x 2
- Soldadura para PVC 2 tarros grandes
- Limpiador para PVC 2 tarros grandes
- Tubo 1" x 3m

A partir de los diseños realizados de la tubería, se realizó un render (Ilustración 14) de la distribución de la tubería dentro del espacio donde el cultivo se ubicó.



Ilustración 14: Render de la distribución del cultivo. (Autores, 2023).

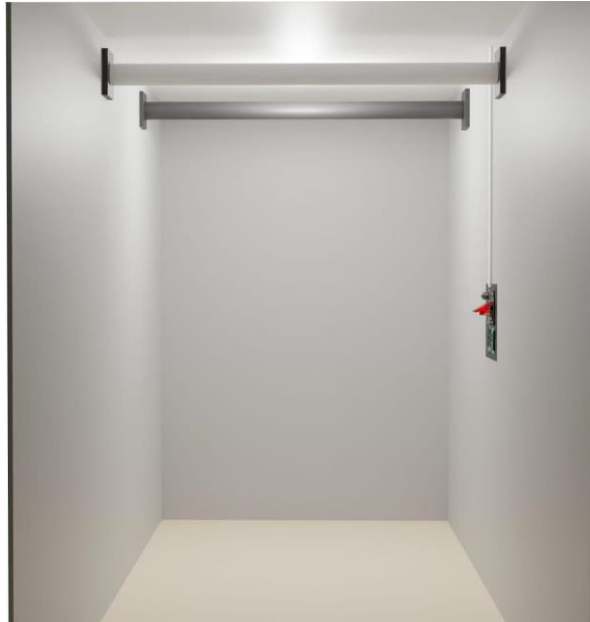


Ilustración 15: Ubicación del sistema electrónico. (Autores, 2023).

En la ilustración 15 se observa la ubicación del circuito de control, de manera que se puede garantizar que el circuito de control no tuviese contacto con el fluido hídrico del cultivo y así evitar el posible daño a los elementos electrónicos.

8.2.2 Diseño esquemático electrónico del circuito de control:

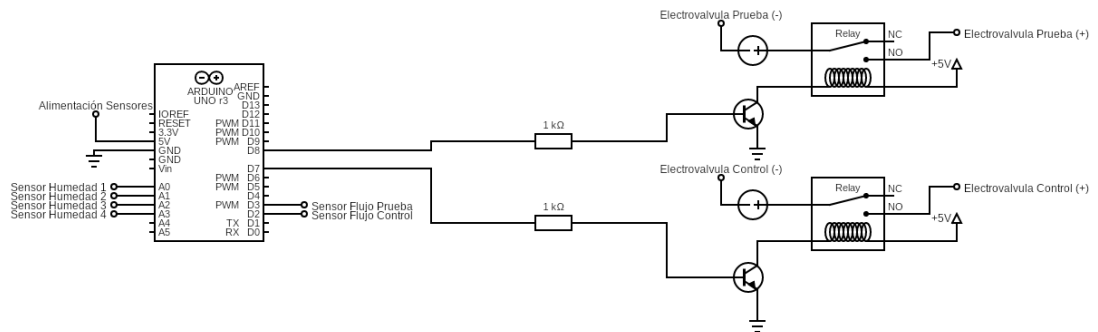


Ilustración 16: Esquemático electrónico. (Autores, 2023).

En la ilustración 16 se puede observar la disposición de los pines de la tarjeta Arduino UNO:

- cuatro entradas analógicas dedicadas a los sensores resistivos de humedad del suelo

- dos entradas digitales de los sensores de flujo de agua YSF-201
- dos salidas digitales encargadas de activar los relés para la apertura y cierre de las electroválvulas, tanto del cultivo de control como de prueba.

Los sensores resistivos fueron conectados a los pines analógicos de la tarjeta Arduino UNO, e instalados en los bolsillos del cultivo de prueba, de manera que durante la duración del proyecto se monitorizó la humedad de los bolsillos intercambiando la posición de los sensores por columna de bolsillos, pero siempre manteniendo un sensor por fila.

Como se puede observar en la *ilustración 16* a las salidas digitales del microcontrolador se implementó un circuito que permitiera la energización de los relés que comandan cada uno de las electroválvulas, este circuito constaba de una resistencia de 1K ohm conectada a la base de un transistor NPN (2N2222) el emisor conectado a las tierras comunes y la base conectada a la bobina del relé.

Para la alimentación de este circuito fue necesario implementar una fuente externa de 5V (conectando GND comunes entre la fuente y el microcontrolador) con el fin de no cargar el microcontrolador, ya que al alimentar las bobinas del relé este tendía a tener caídas de tensión que podrían interferir en la toma de datos de los sensores la otra parte de la bobina se alimentó directamente a los 5V de la fuente externa.

Este circuito permitió que cuando el Arduino enviara la señal de apertura de la electroválvula el transistor funcionara como interruptor permitiendo el paso de corriente entre el emisor y el colector cerrando así el circuito de la bobina con los 5 voltios conectados a la otra parte de la bobina permitiendo así la energización de la misma, con esto se logró que el relé hiciera un contacto seco alimentando así los 12 V entre el común y el contacto normalmente abierto, permitiendo energizar el solenoide de la electro válvula que permitía el flujo de agua en la tubería.

Con el fin de cumplir con el requerimiento que el sistema tenga un sistema de acceso remoto, se utilizó una Raspberry Pi 3 conectada mediante RJ45 y cable UTP cat 5 directamente al modem de internet de la casa, como es de saber esta tarjeta funciona como un computador tiene un sistema operativo que permite instalar el software necesario para la programación de la tarjeta de desarrollo Arduino UNO permitiendo así acceder a través de escritorio remoto mediante la aplicación VNC viewer. La tarjeta de desarrollo Arduino UNO fue programada mediante la Raspberry Pi 3, cabe mencionar que aunque la Raspberry Pi 3 tiene integrado un módulo de wifi esta se conectó directamente por puerto ethernet con el fin de garantizar la conexión a internet y no tener problemas por caídas de señal de wifi.

El uso de la Raspberry Pi 3 se limitó a la programación de la tarjeta Arduino UNO y al monitoreo de la respuesta de los sensores a través del puerto serial, todo a través del acceso a través de escritorio remoto, lo que permitió el acceso al monitoreo del cultivo en tiempo real a distancia, esto debido a que la idea de la implementación de un sistema automatizado es tener el control sobre el sistema desde cualquier punto donde se encuentre el usuario final.

Para la recolección de datos, se utilizó un módulo llamado “*Shield Datalogger*”, que incluye un módulo RTC y un módulo lector de memorias SD integrados conjuntamente, lo cual permite implementar un algoritmo de recolección de datos en tiempo real simplificando las conexiones que podrían ser necesarias en caso de utilizar el módulo RTC y el módulo lector de memorias SD de manera independiente.

8.2.3 Diseño de control:

La estrategia de control utilizada fue un sistema de retroalimentación que utiliza un rango de referencia de humedad con el fin de definir a la salida del sistema la apertura o cierre de la electroválvula, para esto tomamos según la literatura mencionada anteriormente un rango con un valor de referencia mínimo de 60% y un valor de referencia máximo de 80% (Zolezzi et al., 2017), con esto al tener retroalimentación de los sensores de humedad, el microcontrolador se encargaba de hacer la apertura o cierre durante el tiempo necesario hasta que los sensores de humedad garantizaran que la tierra se encontraba dentro de los rangos establecidos, de esta manera se garantizó el requerimiento hídrico de las plantas.

Aunque la variable de control en el proyecto fue la humedad de la tierra, implementamos un sensor adicional que permitiera medir el consumo del sistema, este no afectaba sobre el diseño de control, pero permitió garantizar que el consumo de agua fuera menor.

El controlador utilizado fue de tipo ON – OFF o también conocido como todo o nada, es un controlador que se caracteriza en tener únicamente dos posiciones estables, encendido y apagado. Su funcionamiento compara el set-point con respecto a la realimentación y así tomó las acciones necesarias.

Para evitar que la electroválvula se encendiera y apagara constantemente al mínimo cambio en la humedad de la tierra se aplicó un rango de humedad para el set-point, llamado histéresis en este tipo de controlador, esto con el fin de evitar el desgaste prematuro del relé que activa la electroválvula, y un posible daño en la electroválvula. La histéresis correspondió a un valor de humedad del suelo de entre 70 y 80% (ilustración 9).

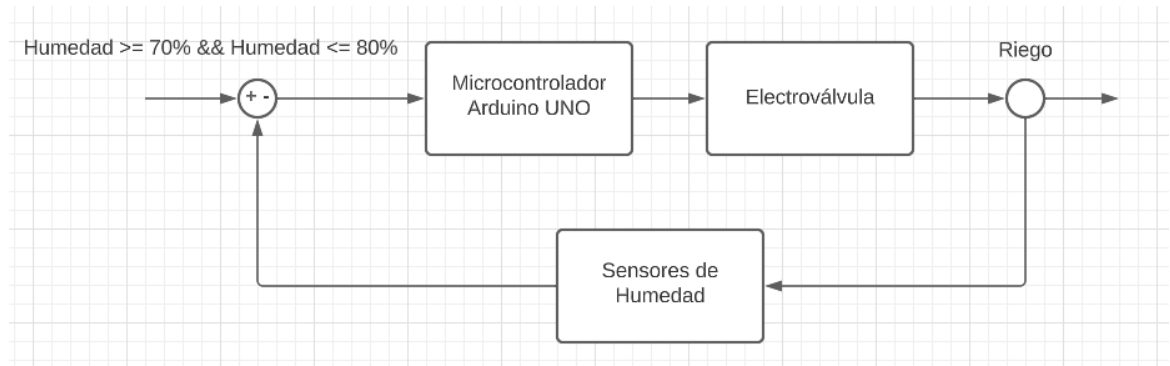


Ilustración 17: Diagrama de bloques de control (Autores, 2023).

El modelamiento matemático del cultivo se hizo a partir del balance de agua.

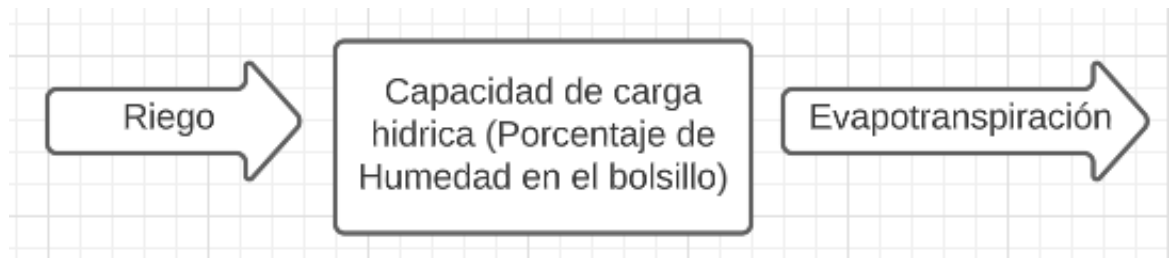


Ilustración 18: Diagrama de bloques de balance de agua (Autores, 2023).

A partir de la ilustración 18, se puede definir una ecuación que modela la capacidad de carga hídrica del cultivo.

$$R = Et + \Delta S \quad (\text{Eq 7.19})$$

Donde:

R = Riego.

Et = Evapotranspiración

ΔS = Cambio en la humedad del suelo

La ecuación de la evapotranspiración corresponde a:

$$Et = Eto * Ktc \quad (Eq \ 7.20)$$

Donde:

Eto = Evapotranspiración de referencia

Ktc = Constante de cultivo

La evapotranspiración de referencia en Bogotá tiene un valor de 2.77 mm/día (Jaramillo, 2005), y la constante de cultivo para las lechugas "*Lactuca Sativa*" es igual a 1.0 en todas sus etapas (Cun et al. 2015).

El valor de evapotranspiración del cultivo corresponde a:

$$Et = \frac{2.77mm}{día} \quad (Eq \ 7.21)$$

Despejando (Eq 7.19):

$$\Delta S = R - \frac{2.77mm}{día} \quad (Eq \ 7.22)$$

A partir de (Eq 7.22) se puede definir que la disminución en el valor de la humedad del suelo es ocasionada por la evapotranspiración a una tasa de 2.77mm por día. A su vez, el aumento de la humedad del suelo corresponde a la entrada del sistema, en este caso el riego.

A partir de los diseños realizados se puede obtener la lista de los materiales utilizados:

- 2 Relé 5VDC
- 2 Transistores NPN 2N2222
- 2 Resistores 1K ohm
- 4 Sensores resistivos de humedad del suelo YL-1000
- 2 Sensores de flujo de agua YF-S201
- 1 Arduino UNO
- 1 Raspberry Pi 3
- 2 Fuente de alimentación 5V

- 2 Fuente de alimentación 12V
- 2 Electroválvulas de 12V

8.3 IMPLEMENTACIÓN

El cultivo de las plantas se inició en su etapa de plántulas, para eliminar la posibilidad de encontrar semillas defectuosas y también empezar a observar cambios en el tamaño de la planta desde el principio de su siembra. La siembra de las plántulas se realizó de manera que la raíz quedó completamente cubierta por la tierra de los bolsillos.

Todos los bolsillos fueron regados una primera vez de manera manual luego de la siembra para garantizar que el sistema fuera iniciado con las mismas condiciones en el cultivo de prueba y en el cultivo de control.

Las plantas fueron etiquetadas con respecto al cultivo al que pertenecieron. La población total de las plantas fue de 16 plantas de lechuga, el cultivo de prueba correspondió físicamente a los 8 bolsillos dispuestos al costado derecho y el cultivo de control correspondió a los 8 bolsillos restantes ubicados al costado izquierdo.

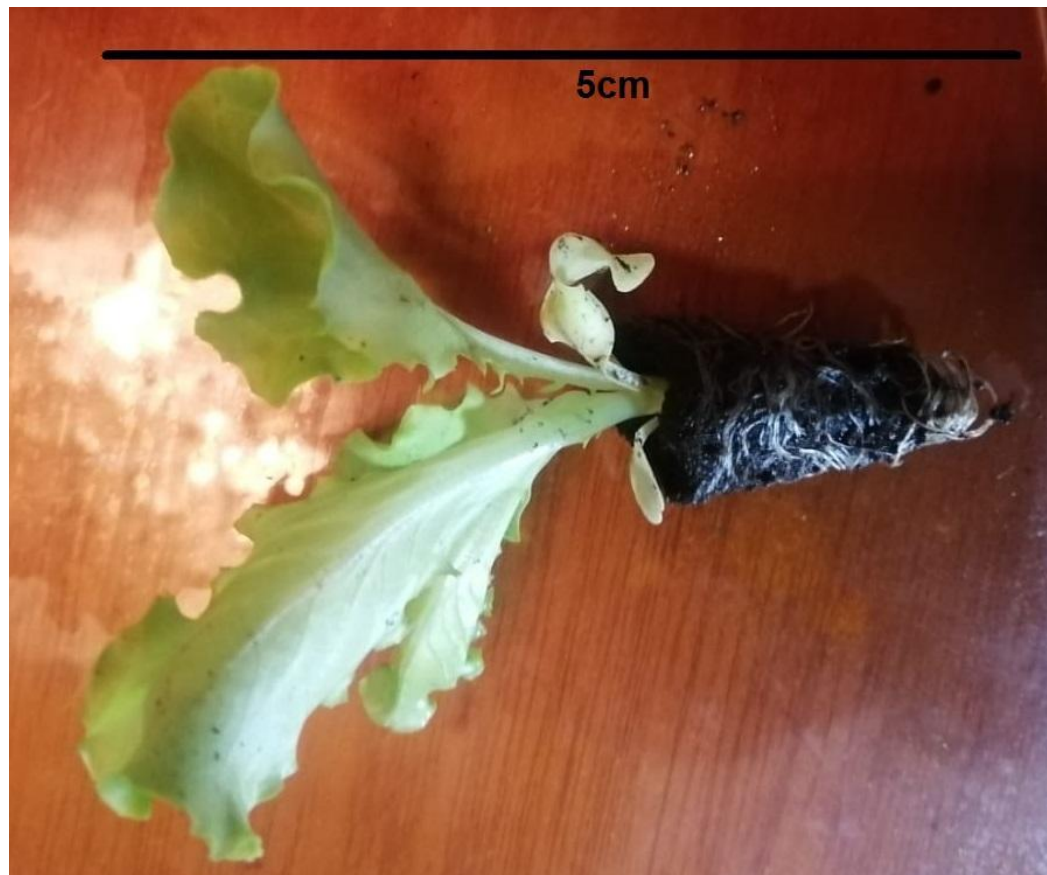


Ilustración 19: Plántula de lechuga. (Autores, 2023).

Durante el transcurso de la primera semana de implementado el proyecto ya se puede observar el crecimiento de aproximadamente 3cm por cada plántula (8cm). En la ilustración 11 se puede evidenciar el etiquetado de las plantas. La planta 1p corresponde a la primera planta del cultivo de prueba y la planta 1c corresponde a la primera planta del cultivo de control manual, siguiendo el resto del etiquetado el mismo patrón.



Ilustración 20: Primera semana de cultivo. (Autores, 2023).

La segunda semana de cultivo las plantas crecieron, aproximadamente 5cm (13cm). También se pudo observar que la planta 8c fue afectada por el paso de personas en la zona de cultivo.



Ilustración 21: Segunda semana de cultivo. (Autores, 2023).

El último día de toma de datos del cultivo, se observó un crecimiento de 5cm (18cm) por planta, y se puede evidenciar que la planta 8c “murió” debido a la afectación recibida en la semana anterior.



Ilustración 22: Último día de cultivo. (Autores, 2023).

8.4 DATOS

Los sensores de humedad del suelo estaban instalados en las plantas 1p, 3p, 5p y 7p durante la primera semana y en las plantas 2p, 4p, 6p y 8p la segunda semana, dando resultados similares entre ambos grupos de plantas del grupo de prueba. Los sensores de humedad estaban monitoreando constantemente la humedad del suelo, pero se tomaron muestras cada 5 horas aproximadamente para guardar en la SD (Anexo 2 y Anexo 3).

El cultivo de control manual fue regado todos los días a la misma hora aproximadamente, manteniendo su electroválvula activa durante el mismo tiempo todos los días. A continuación, se presenta una tabla de los datos del cultivo de prueba, filtrados por el momento del día en el que se realizó un riego al cultivo.

Fecha	Hora	Promedio Humedad (%)	Consumo de Agua en litros (L)
3/02/2023	4:31:16 a. m.	81,5	1,09
3/02/2023	7:32:52 p. m.	79,25	1,1
4/02/2023	3:12:31 p. m.	79,75	1
5/02/2023	9:57:01 a. m.	80,25	1,15
6/02/2023	4:31:29 a. m.	80	0,98
6/02/2023	7:33:03 p. m.	79,5	1,2
7/02/2023	7:33:05 p. m.	80	1,09
8/02/2023	3:12:38 p. m.	80,25	1,2
9/02/2023	9:56:58 a. m.	79,75	1,12
10/02/2023	4:31:20 a. m.	81	1,28
11/02/2023	4:31:29 a. m.	79,5	1,27
12/02/2023	4:31:24 a. m.	81,5	1,36
12/02/2023	12:58:11 a. m.	80,5	1,06
13/02/2023	12:58:06 a. m.	79,25	1,12

14/02/2023	12:57:59 a. m.	80,75	1,26
15/02/2023	7:32:52 p. m.	81,25	1,06
16/02/2023	7:32:47 p. m.	79,75	1,09
17/02/2023	12:57:56 a. m.	78,75	1,13
18/02/2023	12:57:52 a. m.	80	1,24
19/02/2023	12:57:39 a. m.	80,75	1,15

Tabla 4. Datos tomados del cultivo de prueba. (Autores, 2023).

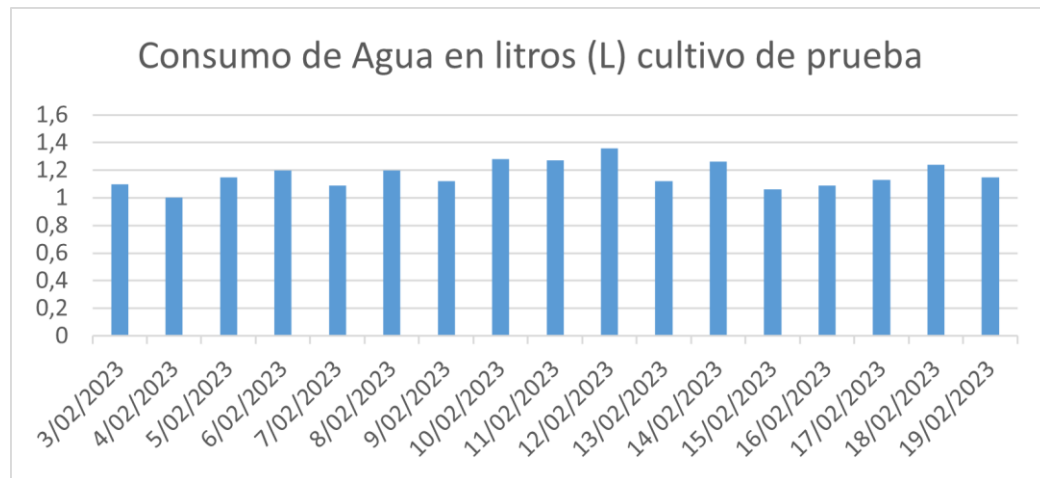


Ilustración 23: Consumo de Agua cultivo de prueba. (Autores, 2023).

De los datos presentados en la tabla 2, se obtuvo los datos estadísticos más relevantes para determinar la eficiencia del cultivo de prueba.

$$\text{Media de Consumo de Agua}(L) = \sum \frac{\text{Consumo de Agua (L)}}{N} \quad (\text{Eq 7.24})$$

$$\text{Media de Consumo de Agua (L)} = 1.16L \quad (\text{Eq 7.25})$$

$$\text{Desviación estandar} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - X)^2}{N}} \quad (\text{Eq 7.26})$$

$$\text{Desviación estandar} = 0.09 \quad (\text{Eq 7.27})$$

$$\text{Consumo total de Agua} = 22.85L \quad (\text{Eq 7.28})$$

Los datos obtenidos corresponden a un rango aceptable de desviación con respecto a la media de consumo, de manera que los datos obtenidos son aptos para sacar conclusiones.

A continuación, se presenta la tabla correspondiente al consumo de agua del cultivo de control.

Fecha	Hora	Consumo de Agua en litros (L)
3/02/2023	7:32:52 p. m.	1,39
4/02/2023	7:32:54 p. m.	1,38
5/02/2023	7:32:59 p. m.	1,43
6/02/2023	7:33:03 p. m.	1,41
7/02/2023	7:33:05 p. m.	1,37
8/02/2023	7:33:00 p. m.	1,42
9/02/2023	7:32:57 p. m.	1,42
10/02/2023	7:32:59 p. m.	1,41
11/02/2023	7:33:02 p. m.	1,38
12/02/2023	7:33:09 p. m.	1,41
13/02/2023	7:32:58 p. m.	1,37
14/02/2023	7:32:50 p. m.	1,43
15/02/2023	7:32:52 p. m.	1,41
16/02/2023	7:32:47 p. m.	1,38
17/02/2023	7:32:52 p. m.	1,39
18/02/2023	7:32:59 p. m.	1,42
19/02/2023	7:33:01 p. m.	1,41

Tabla 5. Datos tomados del cultivo de control manual. (Autores, 2023).

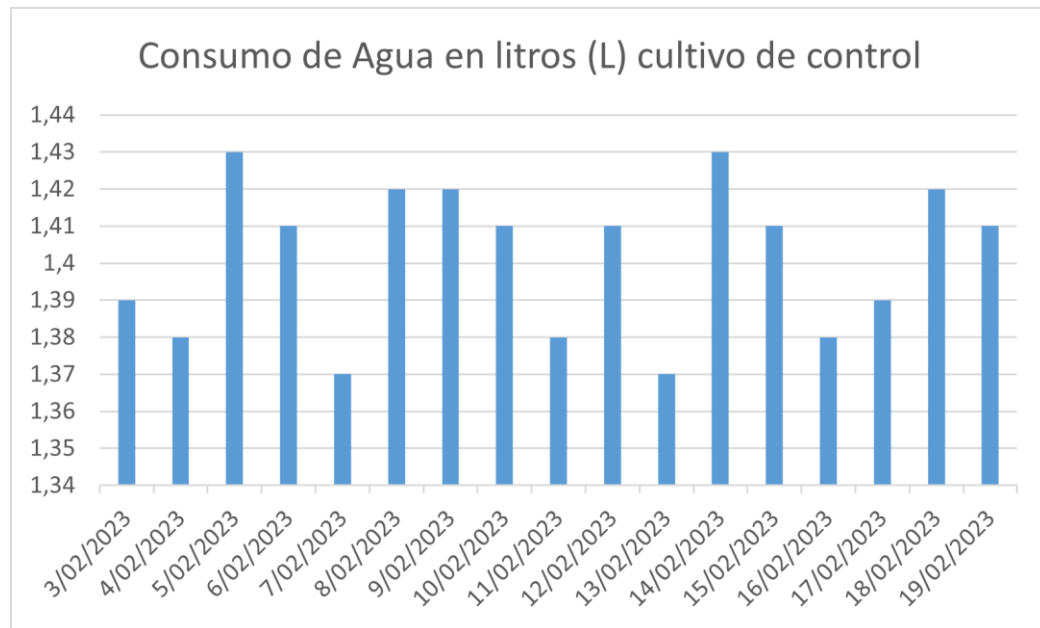


Ilustración 24: Consumo de Agua cultivo de control manual. (Autores, 2023).

$$\text{Media de Consumo de Agua (L)} = \sum \frac{\text{Consumo de Agua (L)}}{N} \quad (\text{Eq 7.29})$$

$$\text{Media de Consumo de Agua (L)} = 1.4L \quad (\text{Eq 7.30})$$

$$\text{Desviación estandar} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - X)^2}{N}} \quad (\text{Eq 7.31})$$

$$\text{Desviación estandar} = 0.02 \quad (\text{Eq 7.32})$$

$$\text{Consumo total de Agua} = 23.83L \quad (\text{Eq 7.33})$$

En este caso los datos tienen una desviación estándar muy cercana a cero, esto corresponde a que dentro de los requerimientos se tomó la decisión de regar el cultivo de control manual todos los días a la misma hora y durante el mismo tiempo.

A la hora de comparar el total de consumo de los dos cultivos se puede observar una diferencia de consumo de 0.88L, siendo el cultivo de control manual el que obtuvo un mayor consumo de agua.

Se realizó un análisis de varianza entre los dos grupos de muestras tomados, con respecto al consumo de agua de las dos técnicas de cultivo, y no se encontró una

diferencia altamente significativa entre las dos (ver Anexo 12.4), por lo que a nivel estadístico no hay una disminución sustancial del consumo de agua.

A continuación, se presenta la tabla de medidas de tomadas por los autores con respecto al tamaño de las plantas.

Fecha	Automático (cm)	Manual (cm)
3/02/2023	4,9	5
3/02/2023	4,9	5
3/02/2023	5	4,9
3/02/2023	5,1	4,9
3/02/2023	5	4,8
3/02/2023	5	5,1
3/02/2023	4,8	5
8/02/2023	7,9	8
8/02/2023	7,8	8,2
8/02/2023	8	8
8/02/2023	8,1	7,9
8/02/2023	8,2	7,8
8/02/2023	8	8
8/02/2023	7,7	8
16/02/2023	13	12,9
16/02/2023	12,8	12,9
16/02/2023	12,9	13
16/02/2023	13	13,1
16/02/2023	13,1	13

16/02/2023	12,8	13,1
16/02/2023	13	12,7
20/02/2023	17,8	17,8
20/02/2023	18	18
20/02/2023	18,2	18
20/02/2023	18	17,9
20/02/2023	18,1	17,9
20/02/2023	17,9	17,9
20/02/2023	18	18
20/02/2023	18	18

Tabla 6. Datos tomados del tamaño de las plantas. (Autores, 2023).

En la tabla se observa que se tomaron datos de siete plantas, esto es debido a la afectación que tuvo la planta 8c, y se tomó la decisión de descartar las medidas de las plantas 8c y 8p para evitar sesgos a la hora de realizar el análisis.

Se realizó el análisis de varianza de las muestras de ambos cultivos con respecto a las medidas de las plantas, y no se encontró una diferencia altamente significativa (ver Anexo 12.5), de manera que no se puede demostrar que haya una diferencia en el crecimiento de las plantas con respecto a la técnica de cultivo.

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de varianza, se decidió hacer un análisis presupuestal para identificar los posibles beneficios de realizar la automatización de un cultivo vertical.

Los costos relacionados con la instalación hidráulica se relacionan en la siguiente tabla:

Cantidad	Rubro	Detalle	Unidad	Valor	Valor Total
1	Fuente de voltaje 5V	compra	und	\$ 10.000	\$ 10.000
1	Fuente de voltaje 12V	compra	und	\$ 10.000	\$ 10.000
1	toma	compra	und	\$ 4.500	\$ 4.500
30	Tubería PVC	compra	cm	\$ 4.000,00	\$ 120.000
1	Tapón	compra	und	\$ 6.100,00	\$ 6.100
1	Unión	compra	und	\$ 3.400,00	\$ 3.400
1	Buje	compra	und	\$ 4.400,00	\$ 4.400
1	Buje	compra	und	\$ 1.000,00	\$ 1.000
30	Tubería PVC	compra	cm	\$ 2.500,00	\$ 75.000
1	Tee	compra	und	\$ 1.100,00	\$ 1.100
7	Buje	compra	und	\$ 500,00	\$ 3.500
3	Unión roscada hembra	compra	und	\$ 700,00	\$ 2.100

10	Codos	compra	und	\$ 500,00	\$ 5.000
1	Tee	compra	und	\$ 700,00	\$ 700
1	Adaptador hembra manómetro	compra	und	\$ 2.200,00	\$ 2.200
1	adaptador macho roscado	compra	und	\$ 700,00	\$ 700
4	Tubería PVC	compra	und	\$ 3.650,00	\$ 14.600
2	Soldadura	compra	und	\$ 16.900,00	\$ 33.800
2	Limpiador	compra	und	\$ 11.900,00	\$ 23.800
1	Manómetro glicerina	compra	und	45000	\$ 45.000
10	Manguera	compra	m	\$ 800,00	\$ 8.000
16	Gotos	compra	L/h	\$ 650,00	\$ 10.400
1	Adaptador roscado hembra	compra	und	\$ 8.000,00	\$ 8.000
5	Codos	compra	und	\$ 450,00	\$ 2.250
2	Tee	compra	und	\$ 650,00	\$ 1.300
4	Obturador	compra	und	\$ 1.200,00	\$ 4.800

16	lechuga	compra	und	\$ 1.000	\$ 16.000
2	Soldadura	compra	und	\$ 16.900,00	\$ 33.800

Tabla 7: Costos tubería. (Autores, 2023).

El total luego de hacer la sumatoria con respecto a los materiales utilizados para la instalación hidráulica es de un total de: \$417.650 Cop.

Los costos relacionados con la instalación electrónica se relacionan en la siguiente tabla:

Cantidad	Rubro	Detalle	Unidad	Valor	Valor Total
2	Personal	instalador	Hora	\$ 150.000	\$ 300.000
1	Software	uso	und	\$ -	\$ -
4	Relé	compra	und	\$ 2.300	\$ 9.200
4	diodos	compra	und	\$ 300	\$ 1.200
4	TIP	compra	und	\$ 1.200	\$ 4.800
1	Arduino	compra	und	\$ 18.000	\$ 18.000
5	Bornas	compra	und	\$ 2.000	\$ 10.000
4	Resistencias	compra	omios	\$ 200	\$ 800
2	Sensores de humedad	compra	und	\$ 8.000	\$ 16.000

16	Cable 2X20	compra	m	\$ 1.000	\$ 16.000
8	Cable 2X18	compra	m	\$ 800	\$ 6.400
5	canaleta 3/4"	compra	m	\$ 2.500	\$ 12.500
2	Canaleta 1/2"	compra	m	\$ 2.000	\$ 4.000
1	Electroválvula	compra	und	\$ 30.000	\$ 30.000
2	Sensor de caudal	compra	und	\$ 32.000	\$ 64.000
1	Raspberry	compra	und	\$ 400.000,00	\$ 400.000,00

Tabla 8: Costos Electronica. (Autores, 2023).

El total de los costos relacionados con la instalación electrónica corresponde a: \$829.900 Cop.

El costo total de la implementación del proyecto corresponde a la sumatoria del costo hidráulico más el costo electrónico que es igual a: \$1'310.550 Cop.

El costo relacionado con la instalación de un cultivo vertical sin automatización corresponde al valor de la instalación hidráulica únicamente, pero se debe tener en cuenta el valor del salario del trabajador, en el 2023 según la normativa laboral vigente corresponde a aproximadamente \$1'800.000 Cop, siendo este un costo recurrente aumenta el costo mensual de mantenimiento del cultivo, presentándose así una mejor opción el cultivo automatizado, pues se hace una inversión única y desembolsos puntuales en mantenimiento de los sensores de humedad.

9. CONCLUSIONES

Analizando el requerimiento hídrico de las lechugas en las condiciones ambientales de Bogotá, se obtuvo un rango entre el 65% de humedad del suelo y el 85%. Un valor por debajo de este rango evidenciaría una falta de desarrollo en la planta por falta de agua o incluso la pérdida de la planta por resequedad. Por otro lado, un valor por encima de este rango de manera constante puede podrir las raíces de la planta llevando a la pérdida de la planta, de manera que en el presente proyecto se permite concluir que un rango apropiado para el crecimiento de la planta y para el uso eficiente del agua es entre el 70% y el 80% de la humedad de suelo, durante el desarrollo del proyecto se evidenció en el crecimiento óptimo de las plantas que al garantizar esta humedad estas se desarrollaron de manera adecuada.

Se diseñó un sistema de tubería óptima para asegurar el requerimiento hídrico de las plantas, debido que el crecimiento de las plantas fue satisfactorio y se logró obtener los datos de consumo y control sobre la apertura y cierre de las electroválvulas podemos concluir que el diseño de la tubería tanto en PVC como en polietileno fue adecuado para la implementación en sistemas de riegos verticales tipo indoor, adicional a esto mediante la implementación del mismo se logró evitar los fallos correspondientes a la velocidad del agua demasiado alta para las mangueras de polietileno disminuyendo la velocidad con la que el agua entraba a las mangueras de polietileno logrando así evitar que estas tuvieran afectaciones.

En el presente proyecto de grado se evaluó la automatización implementada de un cultivo vertical de lechugas en la ciudad de Bogotá mediante el uso de sensores resistivos de humedad del suelo y un controlador ON – OFF, y se evidenció que las plantas que pertenecieron al cultivo de prueba tuvieron un crecimiento óptimo demostrando que se cumple con los requerimientos hídricos de la planta.

Se implementó satisfactoriamente el sistema de riego automático para el cultivo vertical, garantizando el transporte y acceso al recurso hídrico de todas las plantas sembradas en el cultivo de prueba, a través de un diseño de tuberías acorde a la infraestructura del sitio de cultivo y un sistema electrónico diseñado para el proyecto. A la hora de realizar los análisis de varianza con respecto al consumo de agua entre el cultivo de prueba y el cultivo de control manual no se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas, esto puede deberse, en parte, a los sensores resistivos de humedad, ya que la corrosión provocada por la hidrólisis puede afectar a los datos de humedad tomados en tiempo real, alterando los valores iniciales de calibración a través del tiempo. Pero a la hora de realizar el cálculo total del consumo de Agua se evidencia una reducción del consumo total de 0.88L, durante los 18 días de cultivo.

A partir del análisis presupuestal realizado, se puede concluir que el cultivo automatizado presenta una mejor opción financiera a largo plazo, pues el costo que asume la persona se realiza una única vez, mientras se ahorra en costos de recursos humanos.

10.RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del proyecto se encontró un desafío con los sensores de humedad de tierra YL – 1000, debido a que al ser dos placas de cobre energizadas en constante contacto con tierra humedad, se produce un proceso químico llamado hidrolisis. Este fenómeno separa las moléculas de agua, liberando el átomo de oxígeno de los dos átomos de hidrogeno, estos dos átomos de hidrogeno son altamente reactivos de manera que reaccionan con el cobre energizado. El hidrogeno es un elemento químico muy corrosivo, así que, al reaccionar con el cobre, el material se degrada. La manera que se solucionó este problema fue cambiar los sensores de humedad cada 2 días y recalibrar la programación para garantizar el óptimo funcionamiento del sistema.

De manera que una recomendación realizada para un futuro desarrollo de la automatización de un cultivo vertical es cambiar los sensores de humedad resistivos por sensores de otro tipo de fabricación, como por ejemplo los sensores capacitivos de humedad del suelo, para solucionar el problema generado por la hidrolisis.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Acueducto de Bogotá. (2020). *Recomendaciones para hacer uso racional del agua*.
- Agricultura, el sector que más agua demanda en el país. (s.f.).
- AllDatasheet, YF – S201 datasheet. (s.f.).
<https://www.alldatasheet.es/view.jsp?Searchword=YF-S201&sField=4>.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006) *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*.
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021367/Evapotranspiraciondelcultivo.pdf>
- Amorocho-Daza, H., Cabrales, S., Santos, R., & Saldarriaga, J. (2019). *A new multi-Criteria decision analysis methodology for the selection of new water supply infrastructure*. *Water*, 11(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w11040805>
- Atmel Corporation. (2016). *ATmega328 / P Datasheet*. 24.
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/241077/ATMEL/ATMEGA328P.html>
- Avellaneda, Y., Franco, B., & Gómez, B. (2022). *Diseño, monitoreo y automatización de cultivos verticales aplicando IoT*.
<https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/9472/PI-683%20AVELLANEDA%2c%20FRANCO%2c%20GOMEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ávila, M. (2019, Febrero). *El estrés del agua en las grandes ciudades - El Independiente*.
<https://www.elindependiente.com/desarrollo-sostenible/2019/02/07/el-estres-del-agua-en-las-grandes-ciudades/>
- Barriga Pons, J. (2019). *Solución IoT Para Análisis Inteligente En La Producción De Uva*.
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/57091/1/JorgeSánchezBarrigaPons.pdf>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *Manual Lechuga, Programa de apoyo agrícola y agroindustrial vicepresidencia de fortalecimiento empresarial cámara de comercio de Bogotá*.
- Cañón, D., & Cifuentes E. (2018). *Prototipo de un sistema automatizado de riego para jardines*.
<https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/1533/cañondiana2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Castañón, G. (2004) *Automatización Del Riego. Universidad Politécnica de Madrid, 205-205.*
- Cedeño, G., & Zambrano, D. (2022). *Revisión del estado del arte de sistemas IoT para optimizar el riego.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8590718>
- Cervantes, W., Santana, L., & Molina, B. (2016). *Arduino en la automatización de los sistemas de riego.* <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/8859>
- Chandavale, A., Dixit, A., Khedkar, A., & Kolekar, R. (2019). *Automated Systems for Smart Agriculture. 2019 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)* 11–16. <https://doi.org/10.1109/PuneCon46936.2019.9105686>
- Chinchilla, L. (2020) *Manual de producción vertical como modalidad de huerto familiar para autoabastecimiento de un hogar.* <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/0b827f07-0f79-4d36-8f3e-d6a3c52cff3b/content>
- Congreso de la República. (1993). Ley 101 de 1993. *Congreso de La República, 1993(41), 31t.*
- Cun, R., Duarte, C., Montero, L. (2015). *Evapotranspiración y coeficiente de cultivo de la lechuga (BSS-13) en condiciones de organopónico Evapotranspiration and crop coefficient for lettuce (BSS-13) under organoponics conditions.* 5(2), 10–15.
- Díaz, I., González, C., Sención, E., & González, G. (2016) *Granjas Verticales: Una Respuesta Sostenible Al Crecimiento Urbano. Prisma Tecnológico.* 7(1), 3 – 6. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/1255/html>
- Electronilab (s.f.) *Electroválvula – Válvula Solenoide Agua 12 VDC – 1" NC* <https://electronilab.co/tienda/electrovalvula-valvula-solenoide-agua-12-vdc-1-nc/>
- García, F., Bedoya, J., & López, G (2013). *Modelo A Escala De Un Sistema De Riego Automatizado, Alimentado Con Energía Solar Fotovoltaica: Nueva Perspectiva Para El Desarrollo Agroindustrial Colombiano. Tecnura.* 2, 33 – 47. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/7221>
- González, A. (2017). *Sistema De Riego Automatizado Constituido De Elementos Electrónicos, Dispositivo Móvil Y La Construcción De Aspensor Iberoamerican Journal of Project Management,* 8(2), 51–70.
- Guijarro-Rodríguez, A., Cevallos, L., Preciado-Maila, D., Zambrano, B. (2018).

- Sistema de riego automatizado con arduino. Espacios*, 39, 27. <http://www.revistaespacios.com/a18v39n37/a18v39n37p27.pdf>
- Gutiérrez, D., Muñoz, P., Suarez, A., & Palomares, R. (s.f.). *Automatización de un sistema de riego agrícola por técnica de goteo y aspersión*. <https://www.urp.edu.pe/pdf/id/1929/n/automatizacion-de-un-sistema-de-riego-agricola-por-tecnica-de-goteo-y-aspersion>.
- Gutiérrez, K., & Vargas, J. (2018). *Diseño, Construcción E Implementación Del Sistema De Suministro De Recurso Hídrico Para El Laboratorio De Experimentación Agrotécnica Y De Energías Renovables De La Facultad De Ingeniería*.
- Hernández Sampieri, R. (2000). *Metodología de la Investigación* (6 Edición).
- Idárraga, E. (2014). *El consumo de agua en Bogotá: Una revisión comparativa con otras ciudades principales de América Latina*. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11037/Ernesto%20Idarra.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=El%20consumo%20de%20agua%20per,y%20la%20recolección%20de%20aguas>.
- Jaramillo, A. (2005). La evaporación y la evapotranspiración. En *Clima andino y café en Colombia* (pp. 80–87). <http://hdl.handle.net/10778/859>
- Li, S., Han, Y., Li, G., Zhang, M., Zhang, L., & Ma, Q. (2012). *Design and implementation of agricultural greenhouse environmental monitoring system based on Internet of Things. Applied Mechanics and Materials*, 121–126, 2624–2629. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.2624>
- Llamas, L. (2016, Enero). *Medir La Humedad Del Suelo Con Arduino E Higrómetro FC – 28*. <https://www.luisllamas.es/arduino-humedad-suelo-fc-28/>
- López, D. (2021) *Estrategias de extensionismo para familias agricultoras de las veredas Sabanalarga y Bellavista municipio de Cisneros para mejorar las prácticas que implementan en el cultivo de hortalizas*. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/42387/dalopezbu.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Lugo, O., Quevedo, A., Bauer, J., Hebert, D., Palacios, E., & Águila, M. (2011). *Prototipo Para Automatizar Un Sistema De Riego Multicultivo Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 659–672. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263121118003>
- Mapeo de abastecimiento agroalimentario en Colombia - RENAAC. (s.f.).
- Martínez, Á. (s.f.). *Así comienza la Agricultura desde sus inicios hasta la edad del*

bronce Sumeria y Egiptia.

Merino, X., & Tigrero, R. (2021). *Prototipo de sistema de control de cultivos autónomos verticales.*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8590483>

Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano. (2013). *Tecnura*, 17(2), 33–47.
<https://doi.org/10.14483/22487638.7221>

Negrete, A., Aquino R., Mayoral, M., Álvarez, O., & Macedo, R. (2021). *Desarrollo de un sistema de riego residencial automatizado.*
https://www.researchgate.net/publication/358271695_Desarrollo_de_un_sistema_de_riego_residencial_automatizado

Nieto, J. A. (2011). *Resolución 6619 del 2011.* 2011(Diciembre 20).

Peñaranda, L., & Rodríguez, M. (2014). *Guía Metodológica Para La Implementación De Sistemas De Captación De Aguas Lluvias Para La Captación De Aguas Lluvias Para La Producción Agrícola. Caso De Estudio: Finca La Unión, Guasca.*
<http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/845/00001800.pdf?sequence=1>

Pinilla, K., Hoinle, B., Mahecha-Groot, A., & Cepeda, J. (2018). *Mapping the agrodiversity in bogotá - The platform mapeo agroecobogotá.* *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 13(4), 407–414.
<https://doi.org/10.2495/DNE-V13-N4-407-414>

Rani, D., Kumar, N., & Bhushan, B. (2019). *Implementation of an Automated Irrigation System for Agriculture Monitoring using IoT Communication.* *Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control*, 2019-Octob, 138–143.
<https://doi.org/10.1109/ISPC48220.2019.8988390>

Rikolto (2018). *Producción de Lechuga con Buenas Prácticas Agrícolas.*

Secreraria Distrital de Salud. (2021). *Avances de la secretaría distrital de salud en la implementación de huertas agroecológicas en zonas urbanas y periurbanas de Bogotá, una estrategia que integra la salud ambiental y la seguridad alimentaria y nutrición al.*
<https://revistas.saludcapital.gov.co/index.php/bed/article/view/430/408>

Sunil, J., Charitha, R., Kalpana, P., & Vara, R. (2019). *Integrated Framework for Farmer Centric Agriculture Applications Using IoT Architectures.* *International*

Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems, ANTS, 2019-Decem, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ANTS47819.2019.9118117>

Tavan, M., Wee, B., Brodie, G., Fuentes, S., Pang, A., & Gupta, D. (2021). *Optimizing Sensor-Based Irrigation Management in a Soilless Vertical Farm for Growing Microgreens*. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(January), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.622720>

Tejada, K. (2022). *PRODUCCIÓN DE LECHUGA (Lactuca sativa L.) Y ACELGA (Beta vulgaris L. var. cicla) BAJO UN SISTEMA DE JARDINES VERTICALES* <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5508/tejada-abad-kevin-jhon.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Taboada, B. & Yanchapaxi, V. (2022). *Automatización de un sistema de cultivo aeropónico experimental con monitoreo remoto mediante sistemas embebidos para la empresa ASEMI*. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22273>

Ventajas de los Sistemas de Riego automatizados | Ignasi Conillas. (s.f.).

Ventajas del riego automático | Casas que innovan. (s.f.).

Villegas, J., & Torres, B. (1977). Evapotranspiración. *Serie Didáctica, Facultad de Agronomía y Zootécnica, Universidad Nacional de Tucumán*, 45.

WikiSeed Studio. (2013). *YF-S201 Water Flow Sensor Datasheet*. 1.

Zolezzi, M., Saavedra, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., Sepúlveda, P., & Esquivel, C. (2017). *Manual de producción de lechuga*. 1–153. http://bosques.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/29500/INIA_Libro_0051.pdf?sequence=1&isAllowed=y

12. ANEXOS

12.1 ANEXO 1

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.1
Berilio	Be	0.1
Cadmio	Cd	0.01
Cinc	Zn	2.0
Cobalto	Co	0.05
Cobre	Cu	0.2
Cromo	Cr+	0.1
Flúor	F	1.0
Hierro	Fe	5.0
Litio	Li	2.5
Manganeso	Mn	0.2
Molibdeno	Mo	0.01
Níquel	Ni	0.2
pH	Unidades	4.5-9.0
Plomo	Pb	5.0
Selenio	Se	0.02
Vanadio	V	0.1

12.2 ANEXO 2

```
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"

RTC_DS1307 RTC;

String ano;
String dia;
String mes;
String horas;
String minutos;
String segundos;
String Fecha;
String Hora;
String Nombrearchivo;
String Imprimir;

const int chipSelect = 10;

int electroMan = 7;
int electroAut = 8;
int sensorMan = 2;
int sensorAut = 3;

volatile int pulsosAut = 0;
volatile int pulsosMan = 0;

float litrosMan = 0;
float litrosAut = 0;

int sensor1;
int sensor2;
int sensor3;
int sensor4;

float promedioHumedad;

void flujoAut () {
  pulsosAut++;
}

void flujoMan () {
  pulsosMan++;
}

unsigned int tiempoAnterior = 0;
```

```

unsigned int tiempoActual = 0;

char Man;

void setup() {
  pinMode(electroMan, OUTPUT);
  pinMode(electroAut, OUTPUT);
  pinMode(sensorMan, INPUT);
  pinMode(sensorAut, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), flujoAut, RISING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), flujoMan, RISING);
  interrupts();
  Serial.begin(9600);

  RTC.begin();

  if (!RTC.isrunning())
  {
    Serial.println("RTC no está activado!");
    //Ajustar la fecha y hora en la que se compiló este código.
    //RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
  }

  Serial.print("Inicializando tarjeta SD...");

  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("No se pudo inicializar la SD, o no está conectada");
    //while (1);
  }
  else {
    Serial.println("SD inicializada!");
  }
}

void loop() {
  tiempoAnterior = millis();
  digitalWrite(electroMan, LOW);
  digitalWrite(electroAut, LOW);
  sensor1 = map(analogRead(A0), 272, 1023, 100, 0);
  sensor2 = map(analogRead(A1), 213, 1023, 100, 0);
  sensor3 = map(analogRead(A2), 329, 1023, 100, 0);
  sensor4 = map(analogRead(A3), 256, 1023, 100, 0);
  promedioHumedad = ((sensor1 + sensor2 + sensor3 + sensor4) * 1.0) / 4;

  DateTime now = RTC.now();
  ano = now.year();
}

```

```

mes = now.month();
dia = now.day();
horas = now.hour();
minutos = now.minute();
segundos = now.second();
Fecha = ano + "/" + mes + "/" + dia;
Hora = horas + ":" + minutos + ":" + segundos;

Nombearchivo = ano + mes + dia + ".txt";

if (promedioHumedad < 70)
{
  while (promedioHumedad < 80){
    digitalWrite(electroAut, HIGH); // Encender el Relay
    sensor1 = map(analogRead(A0), 272, 1023, 100, 0);
    sensor2 = map(analogRead(A1), 213, 1023, 100, 0);
    sensor3 = map(analogRead(A2), 329, 1023, 100, 0);
    sensor4 = map(analogRead(A3), 256, 1023, 100, 0);
    promedioHumedad = ((sensor1 + sensor2 + sensor3 + sensor4) * 1.0) / 4;
  }
}
else
{
  digitalWrite(electroAut, LOW);
}

if (tiempoAnterior - tiempoActual > 18000000)
{
  tiempoActual = tiempoAnterior;
  litrosAut = (pulsosAut * 1.0) / 450;
  pulsosAut = 0;
  litrosMan = (pulsosMan * 1.0) / 450;
  pulsosMan = 0;
  Imprimir = Fecha + " " + Hora + " " + "Promedio de Humedad: " + promedioHumedad + " " + "Consumo de Agua Automatico: " + litrosAut + "Consumo de Agua Manual: " + litrosMan;

  File dataFile = SD.open(Nombearchivo, FILE_WRITE);

  // Si el archivo está disponible, escribir en el:
  if (dataFile) {
    dataFile.println(Imprimir);
    dataFile.close();
    Serial.println(Imprimir);
  }

  // Si el archivo no se puede abrir, mensaje de error:
  else {
    Serial.println("Error al intentar escribir en el archivo!");
  }
}

if (Serial.available() > 0)
{
  Man = Serial.read();
  if (Man == 'A')
  {
    digitalWrite(electroMan, HIGH);
    delay (90000);
  }
  else
  {
    digitalWrite(electroMan, LOW);
  }
}
}

```

12.3 ANEXO 3

Fecha	Hora	Promedio de humedad	%	Consumo Agua Automatico	L (Aut)	Consumo Agua Manual	L (Man)
3/02/2023	4:31:16 a. m.	Promedio de humedad:	81,5	Consumo Agua Automatico:	1,09	Consumo Agua Manual:	0
3/02/2023	9:56:58 a. m.	Promedio de humedad:	76,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
3/02/2023	3:12:26 p. m.	Promedio de humedad:	71,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
3/02/2023	7:32:52 p. m.	Promedio de humedad:	79,25	Consumo Agua Automatico:	1,1	Consumo Agua Manual:	1,39
3/02/2023	12:57:48 a. m.	Promedio de humedad:	77,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
4/02/2023	4:31:21 a. m.	Promedio de humedad:	74,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
4/02/2023	9:57:03 a. m.	Promedio de humedad:	71,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
4/02/2023	3:12:31 p. m.	Promedio de humedad:	79,75	Consumo Agua Automatico:	1	Consumo Agua Manual:	0
4/02/2023	7:32:54 p. m.	Promedio de humedad:	77,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,38
4/02/2023	12:57:55 a. m.	Promedio de humedad:	75,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
5/02/2023	4:31:24 a. m.	Promedio de humedad:	71,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
5/02/2023	9:57:01 a. m.	Promedio de humedad:	80,25	Consumo Agua Automatico:	1,15	Consumo Agua Manual:	0
5/02/2023	3:12:32 p. m.	Promedio de humedad:	78,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
5/02/2023	7:32:59 p. m.	Promedio de humedad:	74,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,43
5/02/2023	12:58:01 a. m.	Promedio de humedad:	70,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
6/02/2023	4:31:29 a. m.	Promedio de humedad:	80	Consumo Agua Automatico:	0,98	Consumo Agua Manual:	0
6/02/2023	9:57:07 a. m.	Promedio de humedad:	76,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
6/02/2023	3:12:35 p. m.	Promedio de humedad:	71,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
6/02/2023	7:33:03 p. m.	Promedio de humedad:	79,5	Consumo Agua Automatico:	1,2	Consumo Agua Manual:	1,41
6/02/2023	12:58:06 a. m.	Promedio de humedad:	77,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
7/02/2023	4:31:27 a. m.	Promedio de humedad:	75,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
7/02/2023	9:56:59 a. m.	Promedio de humedad:	72	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
7/02/2023	3:12:36 p. m.	Promedio de humedad:	70,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
7/02/2023	7:33:05 p. m.	Promedio de humedad:	80	Consumo Agua Automatico:	1,09	Consumo Agua Manual:	1,37
7/02/2023	12:58:07 a. m.	Promedio de humedad:	78,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
8/02/2023	4:31:32 a. m.	Promedio de humedad:	76,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
8/02/2023	9:57:05 a. m.	Promedio de humedad:	72,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
8/02/2023	3:12:38 p. m.	Promedio de humedad:	80,25	Consumo Agua Automatico:	1,2	Consumo Agua Manual:	0
8/02/2023	7:33:00 p. m.	Promedio de humedad:	78,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,42
8/02/2023	12:58:10 a. m.	Promedio de humedad:	75,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
9/02/2023	4:31:25 a. m.	Promedio de humedad:	72,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
9/02/2023	9:56:58 a. m.	Promedio de humedad:	79,75	Consumo Agua Automatico:	1,12	Consumo Agua Manual:	0
9/02/2023	3:12:40 p. m.	Promedio de humedad:	77	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0

9/02/2023	7:32:57 p. m.	Promedio de humedad:	74,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,42
9/02/2023	12:58:05 a. m.	Promedio de humedad:	71,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
10/02/2023	4:31:20 a. m.	Promedio de humedad:	81	Consumo Agua Automatico:	1,28	Consumo Agua Manual:	0
10/02/2023	9:56:49 a. m.	Promedio de humedad:	78,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
10/02/2023	3:12:42 p. m.	Promedio de humedad:	76	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
10/02/2023	7:32:59 p. m.	Promedio de humedad:	73,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,41
10/02/2023	12:57:58 a. m.	Promedio de humedad:	70,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
11/02/2023	4:31:29 a. m.	Promedio de humedad:	79,5	Consumo Agua Automatico:	1,27	Consumo Agua Manual:	0
11/02/2023	9:56:55 a. m.	Promedio de humedad:	77,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
11/02/2023	3:12:37 p. m.	Promedio de humedad:	74,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
11/02/2023	7:33:02 p. m.	Promedio de humedad:	72	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,38
11/02/2023	12:58:01 a. m.	Promedio de humedad:	70,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
12/02/2023	4:31:24 a. m.	Promedio de humedad:	81,5	Consumo Agua Automatico:	1,36	Consumo Agua Manual:	0
12/02/2023	9:56:51 a. m.	Promedio de humedad:	78	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
12/02/2023	3:12:39 p. m.	Promedio de humedad:	75,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
12/02/2023	7:33:09 p. m.	Promedio de humedad:	72,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,41
12/02/2023	12:58:11 a. m.	Promedio de humedad:	80,5	Consumo Agua Automatico:	1,06	Consumo Agua Manual:	0
13/02/2023	4:31:20 a. m.	Promedio de humedad:	78,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
13/02/2023	9:56:47 a. m.	Promedio de humedad:	76	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
13/02/2023	3:12:34 p. m.	Promedio de humedad:	73,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
13/02/2023	7:32:58 p. m.	Promedio de humedad:	71	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,37
13/02/2023	12:58:06 a. m.	Promedio de humedad:	79,25	Consumo Agua Automatico:	1,12	Consumo Agua Manual:	0
14/02/2023	4:31:22 a. m.	Promedio de humedad:	77	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
14/02/2023	9:56:47 a. m.	Promedio de humedad:	75,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
14/02/2023	3:12:40 p. m.	Promedio de humedad:	73,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
14/02/2023	7:32:50 p. m.	Promedio de humedad:	70,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,43
14/02/2023	12:57:59 a. m.	Promedio de humedad:	80,75	Consumo Agua Automatico:	1,26	Consumo Agua Manual:	0
15/02/2023	4:31:25 a. m.	Promedio de humedad:	78,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
15/02/2023	9:56:53 a. m.	Promedio de humedad:	76,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
15/02/2023	3:12:42 p. m.	Promedio de humedad:	73,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
15/02/2023	7:32:52 p. m.	Promedio de humedad:	81,25	Consumo Agua Automatico:	1,06	Consumo Agua Manual:	1,41
15/02/2023	12:57:54 a. m.	Promedio de humedad:	79,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
16/02/2023	4:31:20 a. m.	Promedio de humedad:	76,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
16/02/2023	9:56:48 a. m.	Promedio de humedad:	74	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
16/02/2023	3:12:38 p. m.	Promedio de humedad:	71,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0

16/02/2023	7:32:47 p. m.	Promedio de humedad:	79,75	Consumo Agua Automatico:	1,09	Consumo Agua Manual:	1,38
16/02/2023	12:57:53 a. m.	Promedio de humedad:	78,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
17/02/2023	4:31:22 a. m.	Promedio de humedad:	76	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
17/02/2023	9:56:56 a. m.	Promedio de humedad:	74,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
17/02/2023	3:12:30 p. m.	Promedio de humedad:	72,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
17/02/2023	7:32:52 p. m.	Promedio de humedad:	69,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,39
17/02/2023	12:57:56 a. m.	Promedio de humedad:	78,75	Consumo Agua Automatico:	1,13	Consumo Agua Manual:	0
18/02/2023	4:31:25 a. m.	Promedio de humedad:	77	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
18/02/2023	9:57:03 a. m.	Promedio de humedad:	75,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
18/02/2023	3:12:14 p. m.	Promedio de humedad:	73,5	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
18/02/2023	7:32:59 p. m.	Promedio de humedad:	71,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,42
18/02/2023	12:57:52 a. m.	Promedio de humedad:	80	Consumo Agua Automatico:	1,24	Consumo Agua Manual:	0
19/02/2023	4:31:21 a. m.	Promedio de humedad:	78,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
19/02/2023	9:57:05 a. m.	Promedio de humedad:	76,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
19/02/2023	3:12:26 p. m.	Promedio de humedad:	74	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
19/02/2023	7:33:01 p. m.	Promedio de humedad:	71,75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	1,41
19/02/2023	12:57:39 a. m.	Promedio de humedad:	80,75	Consumo Agua Automatico:	1,15	Consumo Agua Manual:	0
20/02/2023	4:31:16 a. m.	Promedio de humedad:	77,25	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0
20/02/2023	9:57:03 a. m.	Promedio de humedad:	75	Consumo Agua Automatico:	0	Consumo Agua Manual:	0

12.4 ANEXO 4

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Automatico	87	22,95	0,263793103	0,237961026		
Manual	87	23,83	0,273908046	0,312598503		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,004450575	1	0,004450575	0,01616746	0,898969154	3,896092387
Dentro de los grupos	47,34811954	172	0,275279765			
Total	47,35257011	173				

12.5 ANEXO 5

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Automatico	29	325	11,20689655	26,35780788		
Manual	29	324,8	11,2	26,07857143		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,000689655	1	0,000689655	2,63045E-05	0,995926065	4,012973378
Dentro de los grupos	1468,218621	56	26,21818966			
Total	1468,21931	57				

12.6 ANEXO 6

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ϵ o k (mm)	Material	ϵ o k (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0