

**Desarrollo de camas de cultivo elevadas con sistema de riego automatizado y monitoreo de pH y humedad, para el cultivo de rábano *Raphanus sativus* y lechuga *Lactuca sativa* en el LEATYER, campus de Chía, Universidad El Bosque.**

Natalia Andrea Ballesteros Calvete

Luisa Fernanda Bermúdez Barón

Universidad El Bosque

Bioingeniería, Facultad de Ingeniería

Tutor: Pedro Alfonso Lizarazo Peña

27 de noviembre de 2023

## **Agradecimientos**

La culminación de este proyecto no solo es fruto de nuestro esfuerzo sino también de la ayuda que nos brindaron diferentes personas con sus ideas, su trabajo, su conocimiento y su apoyo. Agradezco por cada persona que estuvo en mi camino durante este recorrido guiándome y alentándome. Estoy especialmente agradecida con mi familia por su apoyo incondicional y por ser quienes me han motivado a seguir adelante a pesar de las adversidades, con mis amigos que me ayudaron y fueron mi compañía durante el desarrollo de este proyecto y con nuestro tutor por compartir con nosotras su tiempo y conocimientos.

-Natalia Ballesteros

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia y a mi novio por ser mi constante fuente de motivación y mi apoyo incondicional durante la elaboración de este trabajo. Estoy agradecida por toda la paciencia y comprensión que demostraron en cada paso del camino. Quisiera agradecer a nuestro tutor por compartir su valioso conocimiento, brindarnos consejos y dedicar tiempo para guiarnos hacia el éxito en esta travesía académica. Su orientación fue fundamental para culminar de manera exitosa este proyecto. Asimismo, quiero expresar mi reconocimiento a mi compañera de tesis, Natalia, quien siempre estuvo dispuesta a colaborar, escucharme y hacer de esta experiencia la mejor posible. No hay otra persona con la que habría preferido alcanzar este nuevo logro. Todo el esfuerzo y dedicación que invertimos se refleja en el resultado final.

-Luisa Bermúdez

## Tabla de contenido

Resumen .....	10
Abstract.....	12
1    Introducción .....	14
2    Planteamiento del problema.....	17
3    Justificación .....	20
4    Objetivos.....	22
4.1    Objetivos generales .....	22
4.2    Objetivos específicos .....	22
5    Marco de referencia .....	23
5.1    Marco teórico-conceptual.....	23
5.1.1    Agricultura .....	23
5.1.2    Agricultura urbana .....	23
5.1.3    Mecánica de materiales en la agricultura .....	24
5.1.4    Camas de cultivo convencionales .....	25
5.1.5    Camas de cultivo elevadas .....	25
5.1.6    Hortalizas de clima frio.....	27
5.1.7    Suelo .....	29
5.1.8    Textura del suelo .....	29
5.1.9    pH en el suelo.....	30
5.1.10    Nutrientes en el suelo .....	31
5.1.11    Humedad del suelo.....	31
5.1.12    Agua para agricultura.....	32
5.1.13    pH del agua para agricultura.....	32
5.1.14    Sistemas de riego .....	32
5.1.15    Riego automatizado.....	33
5.1.16    Monitoreo de agua.....	34
5.1.17    Tecnificación de cultivos .....	35
5.1.18    Sensores y actuadores .....	35
5.1.19    Tarjeta de desarrollo .....	38
5.1.20    Tecnologías de comunicación.....	38
5.1.21    Internet de las cosas (IoT) .....	39
5.1.22    Interfaz de usuario .....	39
5.1.23    Implementación de la automatización de riego y monitoreo de pH.....	40

5.2	Marco geográfico .....	40
5.2.1	Universidad El Bosque campus Chía: .....	40
5.2.2	Laboratorio de experimentación en agrotécnia y energías renovables (LEATYER) 41	
5.3	Marco normativo .....	42
6	Estado del arte.....	44
7	Metodología .....	47
7.1	Metodología general .....	47
7.2	Conceptualización del lugar de trabajo .....	47
7.3	Levantamiento de requerimientos .....	48
7.4	Diseño de prototipo de estructura de camas elevadas.....	49
7.4.1	Diseño conceptual .....	49
7.4.2	Diseño preliminar.....	49
7.4.3	Diseño detallado .....	53
7.5	Diseño de sistemas de riego y monitoreo .....	59
7.5.1	Diseño conceptual .....	59
7.5.2	Diseño preliminar.....	60
7.5.3	Diseño detallado .....	63
7.6	Implementación de camas de cultivo junto con sistema de riego automatizado y monitoreo de pH.....	64
7.6.1	Adquisición y verificación de componentes.....	64
7.6.2	Calibración de sensores, desarrollo de códigos de programación e interfaz de usuario 65	
7.6.3	Protocolo de pruebas.....	67
7.6.4	Preparación de camas de cultivo convencionales.....	67
7.6.5	Instalación de camas elevadas .....	67
7.6.6	Instalación de sistema de riego automatizado.....	68
7.6.7	Implementación del sistema de riego automatizado en las camas elevadas.....	69
7.6.8	Implementación del sistema de monitoreo de pH en el agua para riego .....	69
7.7	Evaluación del sistema .....	69
7.7.1	Evaluación del desarrollo de las plantas .....	70
7.7.2	Evaluación de riego .....	71
8	Resultados y discusión .....	73
8.1	Conceptualización del lugar de trabajo .....	73
8.2	Requerimientos.....	75

8.2.1	Funcionales .....	76
8.2.2	De calidad.....	77
8.2.3	De restricción.....	78
8.3	Diseño de prototipo de estructura de camas elevadas.....	78
8.3.1	Diseño conceptual .....	78
8.3.2	Diseño preliminar.....	79
8.3.3	Diseño detallado .....	93
8.4	Diseño del sistema de riego y monitoreo .....	105
8.4.1	Diseño conceptual .....	105
8.4.2	Sistema de riego automatizado.....	105
8.4.3	Diseño preliminar.....	111
8.4.4	Diseño detallado .....	131
8.5	Implementación de camas de cultivo junto con sistema de riego automatizado y monitoreo de pH.....	137
8.5.1	Adquisición y verificación de componentes.....	137
8.5.2	Calibración de sensores, desarrollo de códigos de programación e interfaz de usuario	138
8.5.3	Protocolo de pruebas en laboratorio .....	147
8.5.4	Preparación de camas de cultivo convencionales.....	147
8.5.5	Instalación de camas elevadas .....	148
8.5.6	Instalación de sistema de riego automatizado.....	150
8.5.7	Implementación del sistema de riego automatizado en las camas elevadas.....	154
8.5.8	Implementación del sistema de monitoreo de pH en el agua para riego .....	159
8.6	Evaluación del sistema .....	160
8.6.1	Evaluación en plantas.....	161
8.6.2	Evaluación de riego .....	172
9	Conclusiones .....	175
10	Recomendaciones.....	178
11	Bibliografía .....	179

## Lista de figuras

Figura 1. Árbol del problema.....	19
Figura 2. Triangulo de texturas.....	30
Figura 3. Ubicación campus Universidad El Bosque.....	41
Figura 4. LEATYER campus Chía.....	42
Figura 5. Actividades principales desarrolladas en el proyecto.....	47
Figura 6. Ubicación de camas elevadas y componentes en el LEATYER.....	74
Figura 7 Diseño conceptual de las camas elevadas.....	79
Figura 8. Diseño conceptual de las camas elevadas vista 3D.....	79
Figura 9. Distancias para distribución de cargas.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 10. Unión entre guaduas.....	87
Figura 11. Estructuras en guadua para las camas elevadas.....	87
Figura 12. Carga por cada punto de apoyo en software libre Ftool.....	87
Figura 13. Reacciones por cada pata de la estructura. vista frontal de cada soporte.....	88
Figura 14. Modelo CAD de la base en acero.....	89
Figura 15. Simulación de tensión estática.....	90
Figura 16. Estructuras en madera de pino para las camas elevadas.....	91
Figura 17. Ubicación de orificios para el sistema de drenaje.....	92
Figura 18. Diseño preliminar de las camas elevadas.....	93
Figura 19. Modelo CAD del diseño preliminar de las camas elevadas.....	93
Figura 20. Ubicación de camas elevadas en el LEATYER.....	95
Figura 21. Distribución de lechugas en camas de cultivo elevadas.....	96
Figura 22. Distribución de rábanos en camas de cultivo elevadas.....	96
Figura 23. Distribución de lechuga en cama convencional.....	97
Figura 24. Distribución de rábano en cama convencional.....	97
Figura 25. Diseño de electroválvulas anterior en el LEATYER.....	106
Figura 26. Modelo CAD del diseño conceptual de las electroválvulas.....	107
Figura 27. Planos del diseño conceptual de las electroválvulas.....	107
Figura 28. Planos de la caja de electroválvulas.....	108
Figura 29. Diseño CAD de la caja de electroválvulas.....	108
Figura 30. Diseño conceptual del sistema de riego.....	109
Figura 31. Diseño CAD del flotador para el sensor de pH.....	110
Figura 32. Planos diseño del flotador para sensor de pH.....	110
Figura 33. Diseño conceptual del sistema de monitoreo de pH.....	111
Figura 34. Modelo CAD del diseño preliminar de la tubería PVC para el sistema de electroválvulas.....	112
Figura 35. Modelo CAD del diseño preliminar del sistema de electroválvulas con el acople de madera.....	112
Figura 36. Planos del diseño preliminar del sistema de electroválvulas con el acople de madera.....	113
Figura 37. Modelo CAD del diseño preliminar de los orificios para el cableado e ingreso de mangueras.....	114
Figura 38. Planos del diseño preliminar de los orificios para el cableado e ingreso de mangueras.....	114
Figura 39. Distribución de agua en la textura de suelo más fina y en la textura de suelo más gruesa.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 40. Ubicación de mangueras dentro de la cama de cultivo.....	117
Figura 41. Simulación de la distribución de agua.....	118
Figura 42. Simulación de la distribución de agua con solo dos electroválvulas abiertas.....	119
Figura 43. Diagrama de circuito para control de riego.....	124
Figura 44. Planos del diseño del flotador para sensor de pH.....	128
Figura 45. Modelo CAD del diseño del flotador para sensor de pH.....	129
Figura 46. Diagrama del circuito para el sistema de monitoreo.....	131
Figura 47. Diseño detallado del circuito para sistema de riego automatizado.....	134
Figura 48. Diagrama de flujo para el funcionamiento del código sistema de riego.....	135

Figura 49. Diseño detallado del flotador para sensor de pH. ....	136
Figura 50. Diagrama de flujo para el funcionamiento del código sistema de monitoreo. ....	137
Figura 51. Curva de calibración sensor de humedad 1. ....	139
Figura 52. Curva de calibración sensor de humedad 2. ....	139
Figura 53. Curva de calibración sensor de humedad 3. ....	139
Figura 54. Curva de calibración sensor de humedad 4. ....	140
Figuración 55. Curva de calibración sensor de pH. ....	141
Figura 56. Visualización de monitoreo de pH y riego automatizado en aplicación Blynk. ....	142
Figura 57. Visualización de indicador de pH en aplicación Blynk. ....	143
Figura 58. Visualización de indicadores de humedad de los dos cultivos. ....	144
Figura 59. Funciones que permiten cambiar los parámetros del riego en aplicación Blynk. ....	145
Figura 60. (a) Ingreso a la función de encendido para la válvula 1 (b) pestaña para modificación del parámetro por parte del usuario. ....	146
Figura 61. Camas convencionales para evaluación del proyecto. ....	148
Figura 62. Construcción bases (a) y cajones (b) de camas elevadas junto con sistema de drenaje (c). ....	148
Figura 63. Camas de cultivo elevadas llenas de suelo. ....	149
Figura 64. Caja electroválvulas. ....	150
Figura 65. Sistema de electroválvulas completo. ....	151
Figura 66. Ubicación de las electroválvulas dentro de la caja. ....	151
Figura 67. Conexión de subcomponentes electroválvula. ....	152
Figura 68. (a) Código de color para entradas del sensor (b) Código de color para unión entre cables del sensor y cables 3x18 AWG. ....	152
Figura 69. Sistema de tubería para el cableado eléctrico. ....	153
Figura 70. Conexión de controlador en baqueta. ....	153
Figura 71. Instalación de componentes electrónicos dentro de la caja de paso. ....	154
Figura 72. Tubería desde la caja de las electroválvulas hasta las camas elevadas. ....	155
Figura 73. Ubicación de las mangueras microporosas. ....	155
Figura 74. Plántulas de rábano y lechuga dentro de las camas elevadas. ....	156
Figura 75. Plántulas de rábano y lechuga en cama convencional. ....	156
Figura 76. Ubicación de mangueras micro porosas en los cultivos. ....	157
Figura 77. Fuentes de alimentación para sistema de riego automatizado. ....	158
Figura 78. Flotador para sensor de pH construido. ....	159
Figura 79. Instalación de sensor dentro del tanque de agua. ....	160
Figura 80. Evaluación diámetro de lechugas. ....	162
Figura 81. Evaluación número de hojas lechuga. ....	163
Figura 82. Evaluación altura rábanos. ....	164
Figura 83. Evaluación número de hojas rábano. ....	165
Figura 84. Evaluación peso de lechuga y rábano. ....	167
Figura 85. Comparación de tamaño máximo y mínimo de lechuga en cama convencional (a). Comparación de tamaño máximo y mínimo de lechuga en cama elevada (b). ....	168
Figura 86. Comparación de tamaño máximo y mínimo de rábano en cama convencional (a). Comparación de tamaño máximo y mínimo de rábano en cama elevada (b). ....	169

## Lista de tablas

Tabla 1. Diseños de camas elevadas en el mercado .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 2. Marco normativo .....	43
Tabla 3. Estado de arte .....	44
Tabla 4. Análisis de suelo .....	75
Tabla 5. Propiedades físico- mecánicas de materiales considerados .....	81
Tabla 6. Matriz de decisión para el material de las camas .....	82
Tabla 7. Proveedores de maderas de pino .....	83
Tabla 8. Plan de fertilización Nitrogeno .....	102
Tabla 9. Plan de fertilización Fosforo .....	102
Tabla 10. Plan de fertilización Potasio .....	103
Tabla 11. Aplicación de fertilizantes camas elevadas .....	103
Tabla 12. Aplicación de fertilizantes camas convencionales .....	103
Tabla 13. Aporte nutricional cultivo de lechuga .....	104
Tabla 14. Aporte nutricional cultivo de rábano .....	104
Tabla 15. Aporte nutricional cama convencional .....	104
Tabla 16. Matriz de decisión para instrumento de riego .....	116
Tabla 17. Matriz de decisión para controlador .....	122
Tabla 18. Consumo de corriente del sistema .....	123
Tabla 19. Matriz de decisión para programación e interfaz .....	127
Tabla 20. Consumo de energía del controlador y sensor de pH .....	130
Tabla 21. Valores tomados del sensor de humedad .....	138
Tabla 22. Valores tomados del sensor de pH .....	140
Tabla 23. Evaluación del diametro de lechugas .....	161
Tabla 24. Evaluación del número de hojas en lechugas .....	163
Tabla 25. Evaluación de altura en rábanos .....	164
Tabla 26. Evaluación del número de hojas en rábanos .....	165
Tabla 27. Evaluación del peso en rábanos y lechugas .....	166
Tabla 28. Rendimiento del rábano y la lechuga .....	171
Tabla 29. Datos obtenidos del consumo de agua en las camas .....	173
Tabla 30. Comparación datos de consumo hídrico vs requerimiento .....	173



## Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Capacidad de carga máxima.....	48
Ecuación 2. Fuerza ejercida en cada punto de apoyo.....	48
Ecuación 3. Inercia del material.....	49
Ecuación 4. Esfuerzo a flexión del material.....	49
Ecuación 5. Espacio entre filas en camas elevadas.....	51
Ecuación 6. No. de plantas por filas pares en camas elevadas.....	51
Ecuación 7. No. de plantas por filas impares en camas elevadas.....	51
Ecuación 8. No. de filas por cultivo en camas elevadas.....	51
Ecuación 9. No. de filas pares en camas convencionales.....	51
Ecuación 10. No. de filas impares en camas convencionales.....	52
Ecuación 11. No. total de plantas por cultivo en camas elevadas.....	52
Ecuación 12. No. de plantas por fila en cama convencional.....	53
Ecuación 13. No. de plantas por columna en cama convencional.....	53
Ecuación 14. No. total de plantas en cama convencional.....	53
Ecuación 15. Conversión de requerimiento nutricional por planta.....	54
Ecuación 16. Conversión de kg a g.....	54
Ecuación 17. Requerimiento nutricional por cultivo.....	55
Ecuación 18. Cantidad de elemento faltante.....	55
Ecuación 19. Cantidad de fertilizante a aplicar.....	55
Ecuación 20. Conversión de voltaje ADC.....	61
Ecuación 21. Rendimiento de cultivo.....	66
Ecuación 22. Caudal.....	67
Ecuación 23. Volumen del agua.....	68

## **Resumen**

El suelo para cultivos del laboratorio de experimentación de agrotecnia y energías renovables (LEATYER) de la Universidad El Bosque ubicado en la sede de Chía, cuenta con la presencia de escombros y desechos sólidos producto de construcciones, por lo que dificulta la realización de cultivos en este medio. Por esto se buscó generar un producto de agricultura urbana implementando el desarrollo de un prototipo de camas de cultivo elevadas y un sistema de automatización de riego y monitoreo para cultivos de lechuga y rábano, tomando como enfoque la tecnificación de camas de cultivo, el control de humedad en suelo, mediante sensores capacitivos y electroválvulas AC y finalmente el monitoreo de pH. El propósito de este trabajo es ilustrar los efectos y la importancia de contar con las condiciones adecuadas en términos de suelo y riego para obtener un cultivo de hortalizas de clima frío exitoso.

En la automatización del riego y monitoreo de pH se incorporó la interfaz de usuario que permite la representación gráfica de los valores dados por los sensores y la capacidad de ajustar los criterios de humedad del suelo dependiendo del cultivo que se vaya a establecer. Además de poseer un mecanismo de notificaciones que envía un mensaje por correo electrónico al usuario en situaciones donde dichos valores se encuentren fuera del rango predeterminado.

La planificación del proyecto se fundamentó en el enfoque CDIO de ingeniería, donde cada etapa se alineó con los objetivos específicos. Se llevó a cabo un protocolo adecuado que incluyó la conceptualización del LEATYER, el diseño conceptual preliminar y detallado, la implementación y, finalmente, la elaboración del manual de usuario para la operación integral del sistema.

El rendimiento de todo el sistema se evaluó mediante la comparación del tamaño, peso y número de hojas en ambas especies, durante 28 días para la lechuga y 20 días para el rábano. El resultado principal se basa en las variaciones obtenidas de los datos registrados en las dos modalidades de camas, elevadas y convencional, en donde se evidenció que en las camas

elevadas se presentó mayor homogeneidad en los cultivos, mientras que en la cama convencional hubo presencia de algunas especies mucho más grandes que otras. Esto se debe a que al ser especies de ciclo corto, deben contar con un riego uniforme y controlado de acuerdo con la humedad que necesite el cultivo, ya que esto interfiere en el crecimiento y desarrollo de las raíces. Así mismo se pudo observar que los cultivos en camas convencionales contaron con la presencia de plagas como la chisa, lo que también afectó su desarrollo y por consiguiente su rendimiento, mientras que en las camas elevadas no.

Se demostró la optimización del recurso hídrico en los cultivos, ya que en el riego automatizado la cantidad de agua utilizada fue cercana al requerimiento de cada cultivo, mientras que en el riego manual no, lo cual se evidenció en la evaluación en donde las camas elevadas tuvieron mayor homogeneidad, rendimiento y desarrollo de las plantas a diferencia de los cultivos de las camas convencionales que mostraron heterogeneidad.

Palabras clave: suelo, sistema de riego, monitoreo, automatización, control, lechuga, rábano, camas elevadas, agricultura urbana.

## **Abstract**

The soil for crops at the agrotechnics and renewable energy experimentation laboratory (LEATYER) of the El Bosque University located at the Chía headquarters, has the presence of rubble and solid waste from construction, which makes it difficult to grow crops in this medium. For this reason, we sought to generate an urban agriculture product by implementing the development of a prototype of raised crop beds and an irrigation and monitoring automation system for lettuce and radish crops, taking as a focus the modernization of crop beds, the control of soil moisture, through capacitive sensors and AC solenoid valves and finally pH monitoring. The purpose of this work is to illustrate the effects and importance of having the right conditions in terms of soil and irrigation to obtain a successful cold climate vegetable crop.

In the automation of irrigation and pH monitoring, the user interface was incorporated that allows the graphic representation of the values given by the sensors and the ability to adjust the soil moisture criteria depending on the crop to be established. In addition to having a notification mechanism that sends an email message to the user in situations where said values are outside the predetermined range.

Project planning was based on the CDIO engineering approach, where each stage was aligned with specific objectives. An appropriate protocol was carried out that included the conceptualization of LEATYER, the preliminary and detailed conceptual design, the implementation and, finally, the preparation of the user manual for the comprehensive operation of the system.

The performance of the entire system was evaluated by comparing the size, weight and number of leaves in both species, for 28 days for lettuce and 20 days for radish. The main result is based on the variations obtained from the data recorded in the two types of beds, elevated and conventional. Where it was evident that in the raised beds there was greater homogeneity in the crops, while in the conventional bed there was the presence of some species much larger than

others. This is because, as they are short-coated species, they must have uniform and controlled irrigation according to the humidity that the crop needs, since this interferes with the growth and development of the roots. Likewise, it was observed that crops in conventional beds had the presence of pests such as chisa, which also affected their development and therefore their yield, while in raised beds it did not.

The requirement for each species was the basis for the optimization of the water resource; Although water consumption in conventional beds was lower, during the evaluation the lack of this in the development and production of crops was demonstrated, which demonstrated the impact of applying this type of technologies in agriculture.

Keywords: soil, irrigation system, monitoring, automation, control, lettuce, radish, raised beds, urban agriculture.

## **1 Introducción**

La agricultura es de gran importancia para la sociedad ya que de esta se obtienen la mayor parte de los alimentos que se consumen, junto con otros insumos como textiles o maderas (FAO, 2020). Para tener éxito en la agricultura es fundamental que el suelo destinado a la siembra cuente con características físicas, químicas y orgánicas que los cultivos necesitan, ya que esta es la fuente de nutrientes que las especies vegetales utilizan para su crecimiento, desarrollo y producción. Sin embargo, a nivel global la cantidad de estos ha disminuido, debido a diferentes tipos de degradación, como la urbanización, la industrialización y las diferentes prácticas agropecuarias entre otros. (Molina et al., 2019) Como fin a esta problemática alrededor del mundo se ha implementado como una alternativa la práctica de la agricultura urbana, en la cual se busca la producción de distintas especies vegetales en lugares donde el suelo no es viable para realizar esta tarea, con el fin de crear conciencia ambiental y sostenibilidad en pro de la seguridad alimentaria (Langemeyer et al., 2021) como es el caso del LEATYER (Laboratorio de Experimentación Agro-Técnica y de Energías Renovables) de la Universidad El Bosque que busca implementar diferentes estrategias de cultivo en una zona urbana.

Una de las principales técnicas empleada en el LEATYER ha sido las camas de cultivo convencionales, sin embargo, el suelo se encuentra ubicado en un predio urbano, lo que ha ocasionado un impedimento para el desarrollo correcto de las especies vegetales debido a la escasez de nutrientes y la cantidad de escombros presentes en este. Los escombros y desechos sólidos producto de construcciones urbanas cuentan con la presencia de metales tóxicos y pesados que dañan la calidad y fertilidad del suelo (Olayiwola, 2023).

De igual manera, el tipo de riego utilizado actualmente para estos cultivos no garantiza que las plantas reciban la cantidad de agua apropiada según sus requerimientos, originando el desaprovechamiento de este recurso hídrico y contribuyendo a la generación de una producción poco eficiente de las especies vegetales que se han sembrado (M. Rodríguez, comunicación

personal, 2021). Lo anterior limita las actividades que tanto docentes como estudiantes pueden realizar en el laboratorio para sus procesos de aprendizaje y desarrollo profesional. (P. Lizarazo, comunicación personal, 2021).

Partiendo de lo anterior se planteó un prototipo de camas de cultivo elevadas con sistema de riego automatizado y monitoreo de pH con el fin de tener mayor control sobre las propiedades del suelo, brindando los nutrientes necesarios para el desarrollo de las especies vegetales escogidas para la evaluación de este proyecto (Lechuga y rábano) y la oportunidad de siembra para futuras especies de clima frío. Así mismo, brinda a las especies vegetales las cantidades de agua adecuadas según sus requerimientos disminuyendo el desperdicio de este recurso.

Se implementó la metodología CDIO (Conceptualización, Diseño, Implementación y Operación) de ingeniería para llevar a cabo el proyecto. Inicialmente se realizó un reconocimiento en campo del LEATYER, específicamente del área destinada para las camas de cultivo convencionales con el fin de realizar la conceptualización inicial del proyecto. Una vez realizada esta fase se elaboraron los diseños conceptuales, preliminares y detallados de las camas elevadas evaluando la estructura y los materiales a partir del espacio destinado para las camas, el peso total sobre las camas y las condiciones ambientales a las que todo el sistema se iba a exponer. Para el diseño conceptual, preliminar y detallado del sistema de riego y monitoreo se evaluaron parámetros como voltaje de alimentación, rangos de medición basados en los requerimientos del cultivo, tiempo de respuesta y facilidad de manejo por el usuario entre otros. Mediante herramientas como Fusion 360, Blynk y Arduino fue posible realizar los modelamientos de las estructuras necesarias, la automatización del riego y el monitoreo de pH en agua. Finalmente se realizó la implementación de todo el sistema teniendo en cuenta los diseños, pasos de ensamblaje establecidos, equipos y herramientas necesarias para el trabajo.

A lo largo del documento se encontrará el contexto de la problemática hallada, la justificación, los objetivos que enmarcan la realización de este proyecto, el marco de referencia

en donde se encuentra el marco teórico, geográfico y normativo necesarios para el desarrollo del trabajo, la metodología empleada que se encuentra organizada de acuerdo a cada uno de los objetivos, los resultados obtenidos de acuerdo a la metodología, las conclusiones identificadas conforme a los resultados y finalmente la bibliografía que sustenta el trabajo.



## **2 Planteamiento del problema**

Uno de los componentes más importantes para tener éxito en la agricultura es el suelo, ya que es la fuente de nutrientes que las especies vegetales utilizan para su crecimiento, desarrollo y producción. (R, 2020) Para que el suelo pueda ser de uso agrícola debe cumplir con características como permitir el paso de agua y aire hacia las raíces de las plantas, tener diferentes tipos de microorganismos activos, contener materia orgánica en gran porcentaje y sobre todo contar con disponibilidad de nutrientes. Aunque existen suelos que logran cumplir estas condiciones, a nivel global la cantidad de estos ha disminuido debido a la degradación ocasionada por erosión, salinización y derrames químicos entre otros (Rodrigo et al., 2022).

Un claro ejemplo de la degradación del suelo es el suelo urbano. Este se da como resultado de la actividad humana como se mencionó anteriormente y se caracteriza por ser compacto, contaminado, con poca materia orgánica y poca disponibilidad de nutrientes (Magdoff y Van Es, 2021). Globalmente se espera que en 30 años la población crezca en 2,5 mil millones de personas (Kapil, 2019) y que 7 de cada 10 de estas vivan en zonas urbanas ("Desarrollo urbano", 2020), se estima que el suelo para cultivos disminuirá entre 1,6 y 3,3 millones de hectáreas mientras que a su vez aumentan las hectáreas de suelo urbano (Kapil, 2019). Específicamente en Colombia, tan solo el 0,3% del territorio corresponde a áreas urbanas (IGAC, 2015) y el 81,42% de la población se encuentra en estas zonas y se espera que este porcentaje siga aumentando en los próximos años (Banco Mundial, 2020). Teniendo en cuenta que gran parte de la población se encuentra en grandes ciudades como Bogotá, y que estas áreas no cuentan con un suelo que permita que prosperen cultivos tradicionales, organizaciones como el jardín botánico José Celestino Mutis han fomentado el desarrollo de la agricultura urbana con el fin "reducir la vulnerabilidad alimentaria y nutricional de la población en Bogotá, especialmente de los más pobres" con programas como "Bogotá sin hambre" ("La agricultura urbana en Colombia", 2020).

Este tipo de agricultura se ha implementado en la Universidad El Bosque en el LEATYER (laboratorio de experimentación agro-técnica y de energías renovables) con el fin de resolver distintas problemáticas como la escasa disponibilidad de suelo para uso agrícola en el laboratorio, ya que, en parte, el suelo de este lugar se compone de escombros lo cual no permite que se desarrollen cultivos convencionales en suelo allí. Pese a que el laboratorio cuenta con 400m<sup>2</sup> de suelo para realizar cultivos, debido a su composición tan solo se usan 203m<sup>2</sup> (Gutiérrez & Vargas, 2018) y aunque se ha intentado desarrollar camas de cultivo convencionales realizando la preparación del suelo y aplicando diferentes fertilizantes y soluciones nutritivas con el fin de garantizar las condiciones apropiadas para el crecimiento, desarrollo y producción de especies vegetales, estas no han sido la mejor solución para este problema ya que se derrumban, se compactan o las raíces de las especies que necesitan más profundidad llegan al suelo del campus y en algunos casos son obstaculizadas por la presencia de escombros y otros desechos sólidos productos de demolición de estructuras urbanas que se encontraban presentes hace algunos años allí (Lizarazo, 2021).

Además de esto, teniendo en cuenta que el riego en los cultivos de suelo de este laboratorio se realiza manualmente debido a daños en los sistemas de riego que han sido contruidos anteriormente, no se tiene control sobre la cantidad de agua utilizada lo cual puede ocasionar el desperdicio del recurso además del desarrollo inadecuado de las plantas por no recibir las cantidades apropiadas de esta de acuerdo con sus requerimientos (M. Rodríguez, comunicación personal, 2021). Así mismo no se cuenta con la medición de variables importantes como el pH en el agua destinada al riego, que al estar por fuera de los rangos para uso agrícola puede ocasionar afectaciones en el intercambio iónico del cultivo, importante para la absorción de nutrientes (Rivera et al., 2018). Por estas razones se considera que actualmente no existen las condiciones apropiadas y completas para la realización de cultivos de suelo en el LEATYER.

Lo anterior ocasiona que no se realicen avances en el cumplimiento de la proyección de la creación del laboratorio que se basa en el desarrollo de actividades académicas de transferencia tecnológica como: interacción planta- suelo- ambiente, fundamentos de riego agrícola y producción agroecológica en el programa de bioingeniería de la universidad.

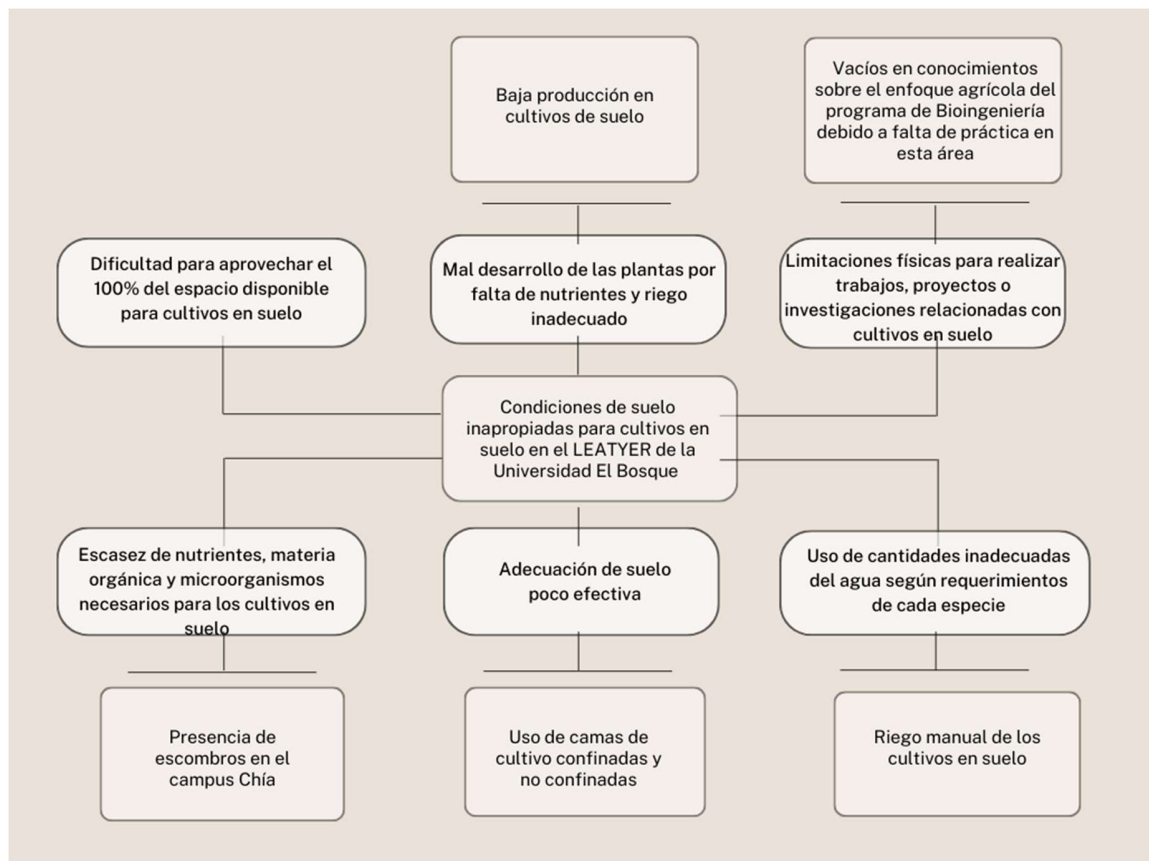


Figura 1. Árbol del problema

### **3 Justificación**

Según el informe de la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), en el 2007 la población urbana superó a la población rural, lo que ha ocasionado la implementación de la agricultura urbana y periurbana con el fin de cultivar en las ciudades y de esta manera poder favorecer las tres dimensiones de la agricultura; ambiental, social y económica (Abello, 2020). En Colombia este tipo de movimientos ha provocado, por un lado, el abandono de las actividades agrícolas y por otro lado un crecimiento del desempleo en la ciudad. Es por esta razón, que en Bogotá y otras ciudades se han desarrollado capacitaciones y cursos que incentivan a las comunidades a interesarse en temas de agricultura urbana (Abello, 2020).

El LEATYER ubicado en campus Chía de la Universidad El Bosque es un laboratorio enfocado en el desarrollo y transferencia tecnológica en el sector agrícola, en el cual se encuentra la agricultura urbana. Este laboratorio busca generar un espacio para los estudiantes del programa de bioingeniería con el fin de apoyar investigaciones y actividades prácticas orientadas en esta área. Así mismo se busca poder beneficiar a futuro a los campesinos de la sabana, brindando capacitaciones, cursos e incluso seminarios que les permitan replicar dicho conocimiento (Lizarazo, 2021). Mencionado lo anterior, es indispensable que en el laboratorio se realicen trabajos de grado que aporten al desarrollo y cumplimiento de estos objetivos. En consecuencia, desde este proyecto se busca mitigar los problemas presentes en el cultivo de suelo implementando un prototipo de cultivo en camas elevadas con la integración de un sistema de riego automatizado que brinde el agua que necesita cada una de las especies vegetales dependiendo de la humedad del suelo. Además de esto se contará con monitoreo del pH en el agua para vigilar que este no sea alterado e identificar si necesita de alguna intervención por parte de docentes o estudiantes para garantizar que su cambio no genere daños en la salud de los cultivos.

Este sistema permitirá mejorar las condiciones para el crecimiento, desarrollo y producción de las hortalizas debido a que el sustrato para el cultivo estará apartado del suelo del LEATYER, y de igual manera posibilitará un mayor control del agua que se usa en este tipo de procedimientos, ya que el 70% del agua del mundo es utilizada en el sector agrícola y muchas especies presentan problemas en su producción como estrés hídrico por el exceso o la falta de agua. Por esto se busca que desde la agricultura urbana se implementen proyectos en los cuales se brinde un espacio adecuado para hacer cultivos de suelo en el LEATYER, teniendo en cuenta el impacto que se tendría no solo en el laboratorio sino a nivel nacional ya que con el tiempo habrá más hectáreas de suelo urbano en diferentes partes del país y más personas se movilizarán a áreas urbanas, por lo que se hará necesario el desarrollo de técnicas de cultivo que se ajusten a las condiciones de estas zonas de tal forma que garantice el abastecimiento suficiente de alimentos y la seguridad alimentaria para la población.

La implementación de este trabajo permite aplicar los conocimientos y quehaceres del bioingeniero, integrando la aplicación de ingeniería en un sistema biológico como lo es la producción de especies vegetales y fomentando la tecnificación de la agricultura urbana. Esto abre nuevas puertas para los avances en el desarrollo del uso de tecnologías emergentes en el sector agrícola, promoviendo e incentivando a las personas a tener sus cultivos en casa de forma sana y segura. Una vez más desde la bioingeniería con este tipo de prácticas se muestra que el uso de tecnologías asistidas a los entes biológicos son una muy buena alternativa para su salud y bienestar.

## **4 Objetivos**

### **4.1 Objetivos generales**

Desarrollar camas de cultivo elevadas con sistema de riego automatizado y monitoreo de pH para el cultivo de Rábano *Raphanus sativus* y lechuga *Lactuca sativa* en el LEATYER en el campus de Chía de la Universidad El Bosque.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Diseñar un prototipo de estructura de camas elevadas para la producción de hortalizas de clima frío.
- Diseñar un sistema de riego automatizado con monitoreo de pH, ajustado al prototipo de camas elevadas para la producción de hortalizas de clima frío.
- Implementar el prototipo de camas elevadas y el sistema de riego automatizado con monitoreo de pH en las instalaciones del LEATYER.
- Evaluar el prototipo de camas elevadas con riego automatizado y monitoreo de pH para la producción de Rábano (*Raphanus sativus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) como especies de prueba, respecto a un cultivo de camas convencionales con riego manual.

## **5 Marco de referencia**

### **5.1 Marco teórico-conceptual**

A continuación, se describen todos los conceptos teóricos necesarios para la construcción del trabajo de grado

#### **5.1.1 Agricultura**

La agrícola es una industria vital para la sociedad, ya que permite al hombre producir alimentos necesarios para su existencia mediante el uso de diversas herramientas de manejo para controlar sus sembríos. En algunos países, el 42% de la población depende directamente de la agricultura, según estadísticas de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura).

#### **5.1.2 Agricultura urbana**

La agricultura urbana ha surgido con el fin de contribuir a las cuatro dimensiones de la seguridad alimentaria: disponibilidad, acceso, utilización y estabilidad. Ya que este tipo de agricultura permite el suministro de alimentos en áreas urbanas al cultivarlos localmente aumentando la disponibilidad de estos para las personas que residen allí, y teniendo en cuenta que diferentes tipos de cultivos urbanos pueden ubicarse en sitios con inseguridad alimentaria, se aumenta el acceso a productos saludables y más frescos ya que también se reduce el tiempo de transporte al evitar la cadena de suministro. Además, se ha demostrado que el consumo de alimentos producidos bajo técnicas de agricultura urbana mejora la nutrición personal. A nivel social la agricultura urbana también brinda espacios interactivos que permiten que las personas tengan un mejor entendimiento del sistema alimentario y su entorno, y a su vez participen en actividades con su comunidad las cuales pueden brindar sentimientos de relajación y bienestar (Kennard & Bamford, 2019).

Este tipo de agricultura no solo trae beneficios a las personas sino también al medio ambiente al evitar la ejecución de prácticas agrícolas industriales que perjudican el recurso del suelo y aumentan las emisiones de gas invernadero. Aunque mediante la agricultura urbana no se pueden satisfacer todas las necesidades alimentarias de los residentes de zonas urbanas, la producción de alimentos dentro de las ciudades ciertamente trae beneficios sociales, ambientales y económicos y a la vez reduce la presión de los suelos debido su uso actual para prácticas agrícolas (Kennard & Bamford, 2019).

### **5.1.3 Mecánica de materiales en la agricultura**

La mecánica de los materiales permite identificar el tipo de comportamiento que estos tendrán dependiendo de las cargas a las que sean sometidos (Colegio Mexicano de Ingenieros Civiles A.C., 2018). Dos variables importantes a la hora de evaluar el comportamiento mecánico de un material son el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura. El módulo de elasticidad mide la resistencia que tiene un material frente a la deformación elástica. Entre más bajo sea el módulo de elasticidad, más se deforma un elemento frente a una menor cantidad de fuerza, lo cual permite identificar cual material podría soportar mayor cantidad de peso sin que se deforme la estructura (Jones & Ashby, 2019). Por otra parte, el módulo de ruptura indica la capacidad de carga máxima que tienen un material justo antes de que este se fracture. Entre mayor sea este valor, más fuerza se necesitará para que el material se rompa, con lo cual se puede identificar que material puede soportar una mayor cantidad de peso sin que la estructura se dañe definitivamente (Ather, 2019).

En la construcción de camas de cultivo se emplea por lo general el uso de materiales vegetales como la madera tratada y la guadua, ya que cuentan con la capacidad de adquirir mayor energía y por consiguiente desarrollan propiedades mecánicas adecuadas para soportar grandes cantidades de carga máxima. (Ostos & Vanegas, 2008)



#### **5.1.4 Camas de cultivo convencionales**

Uno de los mayores desafíos en la agricultura urbana son la contaminación y la compactación del suelo. Debido a esto los agricultores suelen usar camas de cultivo para mejorar las condiciones para el crecimiento de las plantas además de reducir su exposición a contaminantes. Existen dos tipos de camas de cultivo: permanentes o temporales. Las camas temporales no tienen estructuras para contener el suelo lo cual disminuye su costo, pero esto hace que sean susceptibles a erosión con el tiempo. Las camas permanentes se hacen sobre la superficie utilizando un marco que contenga el suelo, sustrato, o la combinación de ambos. La ventaja de las camas de cultivo es que permiten un mejor control del suelo que se utilizará, el cual puede complementarse con sustratos o materia orgánica para mejorar la retención de agua, aireación, entre otros, y su uso también reduce la aparición de hierbas, especialmente si hay compost presente (Miernicki et al., 2018).

#### **5.1.5 Camas de cultivo elevadas**

Las camas elevadas, son aquellas en las cuales se usa una estructura como base o soporte para que los cajones de la cama de cultivo queden alejados de la superficie del suelo aproximadamente a la altura de la cintura. Los cajones son aquellos que van sobre la estructura de base y corresponden al contenedor en donde se dispone el suelo y posteriormente el cultivo (USA Garden Company, 2021). Esto permite que las personas trabajen en el cultivo estando de pie y también es más accesible para personas con discapacidades que no podrían trabajar en las camas convencionales. Las camas elevadas también traen como beneficio, a comparación de las camas convencionales, mejor drenaje, mayor posibilidad de ajustar el suelo a los requerimientos, mayor rendimiento de los cultivos, menos probabilidad de que haya malezas o plagas en el suelo, entre otros (Miernicki et al., 2018)

Entre los tres tipos de camas elevadas que más se encuentran en el mercado están las que se presentan a continuación en la tabla 1.

*Tabla 1*

*Diseños de camas elevadas en el mercado*

<b>Estructura</b>	<b>Descripción</b>
VegTrug® Wallhugger	Mayor profundidad hacia la parte de atrás para plantas más grandes y menor profundidad hacia el frente para plantas como hierbas. Hecho de madera sólida. Incluye recubrimiento de tela para el fondo de la cama (VegTrug, 2022).
VegTrug® Patio Garden	Forma en V para la profundidad adecuada para plantas grandes en el medio y menor profundidad en los bordes para sembrar plantas más pequeñas. Hecho de madera sólida. Incluye recubrimiento de tela para el fondo de la cama (GSC, 2022).
GSC Elevated Planter Box	Forma rectangular. Hecho con madera resistente a la pudrición de cedro o ciprés y soportes de aluminio inoxidable. No puede sostener suelo de jardín regular, tierra vegetal, arena, arcilla o rocas, sino que se debe usar una mezcla ligera de sustrato. Incluye recubrimiento de tela para el fondo de la cama (GSC, 2022).

*Nota:* Todas las referencias corresponden a los lugares comerciantes en donde se encontraron las camas elevadas.

### **5.1.6 Hortalizas de clima frío**

Las hortalizas se definen como cualquier planta herbácea hortícola que pueda ser consumida ya sea cruda o cocinada (Araneda, 2022). Las hortalizas de clima frío son aquellas que producen cosechas buenas en este tipo de clima, ya que cuentan con los requerimientos necesarios para su desarrollo y crecimiento. Requieren de un suelo con la capacidad de retener nutrientes o ser abundante en minerales, que posea un buen sistema de drenaje y sea manejable. Según la ingeniera agrónoma Andrea Pellegrini en su trabajo sobre textura y color de suelo, estas características de suelo corresponden a un suelo de tipo franco.

Su altitud se encuentra entre los 1800 y 2800 m.s.n.m y alcanzan temperaturas máximas de 30°C (Hidalgo, 2019). En su guía de producción ecológica certificada de hortalizas de clima fría, Maria Romero Pinto y sus colaboradores explican que, en general, se considera que la profundidad de suelo adecuada para este tipo de hortalizas se atribuye a las especies que necesitan mayor profundidad, como el caso de los tubérculos, que necesitan una profundidad mínima de 40 cm para evitar deformidades.

En esta clasificación se encuentran:

- Lechuga
- Espinaca
- Puerro
- Perejil
- Rábano
- Acelga
- Coliflor
- Brócoli
- Cilantro

- Zanahoria

(Espinosa, 2021)

#### **5.1.6.1 Rábano**

*Raphanus sativus* es una hortaliza familia de las crucíferas. La parte que se consume suele ser su raíz, aunque en algunos lugares también se consumen otras partes de la planta. Existen diferentes variedades que se clasifican según la forma y tamaño de su raíz en variedades de raíz pequeña, globular o grande. Sus raíces no llegan a extenderse demasiado por lo que se considera que se pueden producir en una profundidad mínima de 20 a 30 cm. Además, el color de su piel también puede ser diferente dependiendo de la variedad. Su ciclo de cultivo puede durar entre 20 a 70 días dependiendo de las condiciones climáticas de donde se encuentre, en general, su desarrollo se puede dar entre los 6 y los 30°C (Tipantiza, 2022)

Se adapta a gran variedad de suelos, aunque se prefiere que sea con tendencia arenosa, con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica. La profundidad del suelo debe ser mayor a 20 cm y su pH debe estar entre 5,5 y 6,8 (Tipantiza, 2022).

Se recomienda regar regularmente para que cada planta tenga aproximadamente 450 ml de agua al día, cada 3 días. El suelo debe tener una humedad entre 60 y 65% durante el desarrollo vegetativo. La falta de agua hará que las raíces se endurezcan y puede ocasionar la floración temprana en la planta (Tipantiza, 2022).

#### **5.1.6.2 Lechuga**

*Lectuca sativa* es una hortaliza de hoja de la cual se encuentran diferentes variedades como las lechugas Batavia, Lisa, Mantequilla, Cos, Romana, Baby Leaf, y las lechugas foliares lisas y crespas. Su raíz principal puede llegar a penetrar hasta 30 cm de profundidad, con pequeñas ramificaciones. Su tallo es pequeño, corto y de forma cilíndrica. Sus hojas por su forma son lanceoladas, oblongas o redondas y su color puede ser verde amarillento, rojizo, o morado

dependiendo de la variedad. La temperatura óptima para su desarrollo durante la etapa vegetativa es de 16 a 21 °C. La planta se puede cosechar cuando se ha formado la roseta de hojas, el tiempo necesario para que esto ocurra depende de la variedad y las condiciones climáticas durante el crecimiento (Chiroque & Castaño, 2019).

La lechuga tiene la capacidad de adaptarse a diferentes tipos de suelo, sin embargo, su mejor desarrollo se da en suelos francos, francos arenosos y francos arcillosos, profundos con alto contenido de materia orgánica, buen drenaje, y retención de humedad con topografía plana o con pendientes inferiores a 30%. Es una especie medianamente tolerante a la salinidad (entre 4 y 10 mmho) y el pH óptimo está entre 6,5 y 7,5 (Chiroque & Castaño, 2019).

El sistema radicular de la lechuga es pequeño por lo cual es muy sensible a la falta de humedad y no soporta periodos de sequía. La humedad del suelo conveniente para la lechuga es de entre 60 y 80%. Después de la germinación se recomienda mantener un riego frecuente diario durante los primeros 20 días y espaciado unos 2 a 4 días según el tipo de suelo hasta la cosecha (Chiroque & Castaño, 2019).

#### **5.1.7 Suelo**

Es la capa más superficial de la corteza terrestre creada gracias a la erosión de rocas, y la acumulación de materia orgánica y minerales a través del tiempo ("El suelo: un universo invisible", 2020). El suelo brinda soporte estructural y también es fuente de agua y nutrientes para las plantas. La variedad de propiedades físicas y químicas que este puede tener hace que existan diferentes tipos de suelo, y cada uno de estos tiene ventajas y desventajas para su uso en la agricultura (Victoria State Government, 2021).

#### **5.1.8 Textura del suelo**

La textura del suelo es la suma de proporciones de arena, limo y arcilla. Es una característica que influye en las propiedades biofísicas del suelo, su fertilidad y calidad a largo

plazo. Esta se asocia con la porosidad del suelo, que a su vez regula la capacidad de retención y movimiento de agua además de la difusión gaseosa que se da en este (Upadhyay y Raghubanshi, 2020).

Uno de los sistemas de clasificación para la textura del suelo es el triángulo de clasificación textural USDA que se muestra en la Figura 2. Aquí se identifica el tipo de suelo según el porcentaje de arena, limo y arcilla que este contenga (Moreno-Maroto & Alonso-Azcárate, 2022).

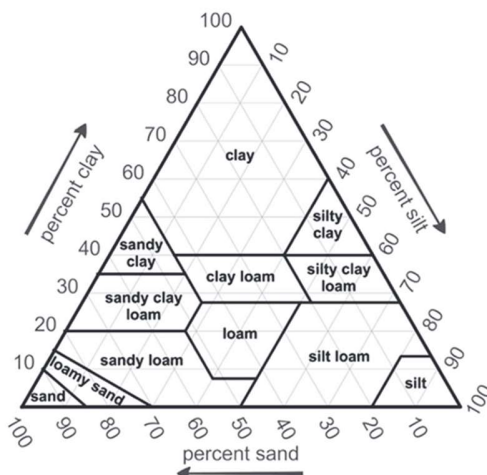


Figura 2. Triángulo de texturas. Clasificaciones de suelos; adaptado de "Evaluation of the USDA soil texture triangle through Atterberg limits and an alternative classification system", por Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate, 2022, Trabajo de investigación publicado.

### 5.1.9 pH en el suelo

El pH es una propiedad química del suelo que mide la actividad de los iones de hidrógeno. Afecta el crecimiento de la vegetación, la actividad microbiana, las tasas de descomposición y la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Cuando el suelo es ácido puede ser tóxico para la vegetación y los microorganismos que se encuentren en el suelo, lo que afecta directamente los aportes de materia orgánica al suelo y afecta la descomposición. El pH del suelo depende de la concentración de cationes que forman ácidos y no ácidos y es influenciado por los componentes

del suelo, las reacciones de oxidación-reducción y la fuente de agua que más se utilice para su riego (Mobilian & Craft, 2022).

#### **5.1.10 Nutrientes en el suelo**

Los nutrientes pueden encontrarse ya sea disueltos en el agua del suelo o de forma no disuelta a partir de fertilizantes aplicados o por medio de sustancias ligadas a las partículas del suelo. Los nutrientes granulares o no disueltos no son inmediatamente útiles para las plantas ya que estos deben disolverse para poder ser absorbidos (Gatiboni, 2022).

En total hay 16 elementos que se encuentran en el suelo para ser usados por las plantas y se clasifican en primarios, secundarios y micronutrientes. Los primarios son aquellos que las plantas necesitan en mayor cantidad para poder crecer, los secundarios son aquellos que las plantas necesitan en menor cantidad a comparación de los elementos primarios, y los micronutrientes son los que se necesitan en menor cantidad a comparación de los elementos primarios y secundarios (Alabama Cooperative Extension System, 2018).

- Primarios: Carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, potasio, fósforo.
  - Secundarios: Calcio, magnesio, azufre.
  - Micronutrientes: Hierro, cloro, manganeso, boro, zinc, cobre, molibdeno
- (Gatiboni, 2022).

#### **5.1.11 Humedad del suelo**

Indica la cantidad de agua presente en el suelo y es fundamental para el correcto desarrollo y crecimiento de las plantas. Regula la temperatura del suelo, la salinidad, la disponibilidad de nutrientes y la presencia de sustancias tóxicas. Además, contribuye a la estructura del suelo y mientras esté presente ayuda a evitar su erosión. Ya que este es un indicador importante de la condición del suelo, con esta variable se puede determinar si el uso

de este es apto o no para la agricultura en un determinado momento (European Environmental agency, 2021).

#### **5.1.12 Agua para agricultura**

La calidad del agua que se utiliza para la agricultura es un factor que influye en el éxito de la producción de los cultivos. Altas cantidades de sales, metales u otros elementos ocasionan la disminución de su rendimiento además de que afectan la calidad del producto que luego será consumido (USU, 2019). Es por esto que existen decretos como el 1076 de 2015 que establecen los parámetros que debe tener el agua para que esta sea segura para las plantas. En este se establecen los valores permitidos de diferentes elementos en el agua destinada a la agricultura. A su vez, se indican las cantidades aceptadas de coliformes dependiendo del cultivo y se señala que deben medirse variables como conductividad, RAS, PSP, salinidad, carbonato de sodio y radionucleidos (Decreto 1076, 2015).

#### **5.1.13 pH del agua para agricultura**

El rango de pH normal para el riego de cultivos está entre 6,5 a 8. En caso de que el valor de pH se encuentre en rangos anormales, es decir, por debajo o por encima del rango normal es necesario tomar medidas para una evaluación final, ya que se puede ocasionar un desequilibrio nutricional o proporcionar un ion toxico. (FAO,2022)

#### **5.1.14 Sistemas de riego**

Los sistemas de riego son utilizados en la agricultura para poder suministrar la cantidad de agua necesaria para los cultivos cuando el agua de lluvia no es suficiente para cumplir con los requerimientos hídricos de las especies cultivadas. (Perez y Castro,2014) Entre los tipos de sistemas de riego según Water Science School (2018) se encuentran:

- Pivote central: Es un tipo de riego en el que la barra o tubería del sistema de aspersion gira de forma automática a partir de un punto central del espacio a irrigar.



Este sistema es propulsado por energía hidráulica, neumática o eléctrica sobre un sistema de ruedas sobre las cuales el sistema gira a una velocidad constante.

- Goteo o micro irrigación: Es un sistema en el que se busca aplicar el agua directamente a las raíces de las plantas a través de diferentes aplicadores como orificios, emisores, tubería porosa, tubería perforada, etc. Estos sistemas operan con una presión de agua baja y pueden ser instalados ya sea debajo del suelo o sobre éste.
- Inundación o surcos: En este método se inunda el espacio que hay entre las filas de cultivos ya sea bombeando el agua desde fuentes hídricas o llevándola directamente con herramientas como baldes. Este método suele ser el más económico y es el más utilizado en lugares menos desarrollados.
- Rociado o aspersión: El riego se realiza a través de tuberías o boquilla perforadas con el agua a la presión suficiente para tener un patrón de aspersión.

#### **5.1.15 Riego automatizado**

Según Stauffer & Spuhler (2020) un sistema de riego automatizado hace referencia a un sistema que suministra agua a los cultivos y funciona con mínima intervención por parte de un operador. Estos sistemas se usan en áreas de cultivo divididas en bloques de irrigación y funcionan para cualquier tipo de riego (por goteo, aspersores, con movimiento, etc.). Entre las ventajas que tiene el usar un sistema de riego automatizado están la posibilidad de utilizar diferentes fuentes de agua y mejorar la eficiencia del riego, hacer riego en las noches para minimizar la evaporación de agua, e iniciar y detener el riego justo cuando se requiera optimizando el uso del agua y de energía. Entre los de sistemas automatizados se encuentran:

- Sistema basado en tiempo: En este sistema el temporizador es una herramienta esencial ya que de acuerdo con este se suministra la cantidad de agua adecuada en el momento adecuado. Para hacer un sistema como estos se debe calcular

el tiempo de irrigación en horas por día teniendo en cuenta el volumen de agua que se requiere para el cultivo y el caudal de agua del sistema. En este caso el temporizador es el que indica cuándo inicia y cuando se detiene el riego.

- Sistema basado en volumen: Se preestablece la cantidad de agua que se riega en cada segmento del cultivo y se controla usando válvulas dosificadoras automáticas que sean controladas por volumen.

- Sistemas de lazo abierto: En este sistema el operador es quien decide qué cantidad regar y en qué momento hacerlo. Luego de tomar esta decisión el controlador del sistema se programa de acuerdo con esto para que el riego se efectúe en el horario y en cantidades deseadas. Usualmente se implementan relojes para saber cuándo iniciar el riego. La finalización del riego puede depender del tiempo escogido por el operador o por el volumen que ha pasado por un medidor de caudal de agua.

- Sistemas de lazo cerrado: Para este sistema el operador selecciona una estrategia para el control del riego y luego el sistema es el que decide cuándo regar y en qué cantidades. Para que esto funcione el sistema necesita realimentación continua de datos obtenidos mediante uno o más sensores, y también requiere de parámetros establecidos en el sistema como presión, caudal, etc.

- Sistema de realimentación en tiempo real: En este sistema, el riego se da según los requerimientos de la misma planta a través del área alrededor de sus raíces. Esto se logra usando sensores que controlan el horario de riego ya que realimentan el controlador de la operación de irrigación.

- Sistemas basados en computador: Son una combinación de software y hardware que actúan como supervisores para controlar la irrigación ya sea de forma interactiva con el usuario o completamente automatizada.

#### **5.1.16 Monitoreo de agua**

El monitoreo puede definirse como la evaluación repetida de la condición de una cantidad dentro de un área y período de tiempo específicos. Para esto es importante definir la variable y los parámetros que se van a supervisar partiendo de la razón o motivo de realizar el monitoreo. (Bejar et al., 2022)

La importancia de monitorear el agua nace de las problemáticas ambientales y de salud que se han generado a lo largo de los años. Al no contar con una calidad de agua adecuada para el uso agrícola se desencadenan efectos negativos tanto en los cultivos como a gran escala en la salud de las personas que consumen la cosecha. (Huanca et al., 2022)

Es por ello que se han establecido parámetros referentes al pH y la conductividad eléctrica que debe tener el agua destinada al riego y se han elaboradas tecnologías y equipos que permiten tener un mayor control y seguimiento de la calidad del agua que se usa. (Huanca et al., 2022)

#### **5.1.17 *Tecnificación de cultivos***

Con el fin de mejorar la competitividad de los cultivos y enfrentar los retos que se presentan actualmente en cuanto a seguridad alimentaria, las empresas agrícolas han buscado el uso de tecnologías que permitan tener un mayor control sobre los cultivos y además ayuden a realizar las labores relacionadas con la agricultura. Parte de esta tecnificación incluye el uso de maquinaria que apoye a la producción de diferentes especies vegetales sin importar la época del año, además de que mediante los sistemas de riego se pueden suministrar pesticidas o fertilizantes sin desperdiciar el producto. Las adquisiciones de estas tecnologías aumentan la producción en una menor cantidad de tiempo lo cual permite el avance en las prácticas agrícolas (MATRA, 2021).

#### **5.1.18 *Sensores y actuadores***

##### **5.1.18.1 *Sensor***

El sensor es un componente electrónico capaz de detectar estímulos externos como propiedades físicas o químicas y transformarlas en variables o señales eléctricas (Angeles, 2019).

#### **5.1.18.2 Señal eléctrica**

Es un tipo de señal generada a través de un fenómeno electromagnético. Estas señales pueden ser digitales si varían de forma discreta en el tiempo o analógicas si varían de forma continua en el tiempo. Las señales digitales se representan con valores como 0 y 1 (Cruz, 2021).

#### **5.1.18.3 Actuador**

un actuador es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso de automatización con el propósito de crear algún efecto. Esta unidad recibe el comando del regulador o controlador y en base a eso, genera un comando para activar el elemento de control final, como una válvula. Son elementos que inciden directamente en la señal de salida del automatismo, ajustando su intensidad según las instrucciones que reciben del controlador (Vera, 2020).

#### **5.1.18.4 Terminales de distribución eléctrica.**

Hace referencia a un conector que se utiliza como punto final para unir circuitos externos. Por medio de estos terminales se transfiere corriente eléctrica, puede ser por medio de tornillos, clavijas o ranuras o se puede conectar directamente a la fuente de alimentación (Esquivel & Miranda, 2022).

#### **5.1.18.5 Sensores de humedad**

Los sensores utilizados para medir la cantidad de humedad en el suelo pueden dividirse en dos categorías: sensores que miden el contenido volumétrico de agua y sensores que miden la tensión del suelo. Los dos tipos de sensores estiman la cantidad de agua que hay en el suelo

y pueden ser portátiles o fijos (Sharma, 2019). Con el fin de programar el sistema de irrigación se debe identificar el momento en el que la humedad se encuentra fuera de los rangos del requerimiento de la especie del cultivo con el objetivo de evitar que las plantas presenten estrés hídrico. Para poder hacer estas mediciones existen diferentes tipos de sensores de contenido volumétrico, entre estos, los sensores electromagnéticos, sensores TDR y la sonda de neutrones (Sharma, 2019).

Es importante resaltar que la precisión de los sensores que se elijan tiene un efecto directo en la eficiencia del sistema de riego cuando va a ser controlado de acuerdo con los valores obtenidos con el sensor. Estudios demuestran que un rango de error entre 2,5 y 6,4% afectan limitadamente el sistema, mientras que errores más altos, entre 10,2 y 18,7% tienen un efecto crítico sobre la eficiencia del sistema de riego. Por esto es importante seleccionar sensores que puedan ser calibrados de acuerdo con el suelo en el que se usarán para que su porcentaje de error sea menor y no afecte al resto del sistema (Soulis et al., 2015).

#### **5.1.18.6 Sensor de pH en agua**

Un sensor de pH es un dispositivo de conversión que mide la acidez de una solución por medio de señales eléctricas, Estos sensores se utilizan ampliamente en la industria para monitorear y mantener el control del pH de productos como bebidas, alimentos, agua empleada para procesos agrícolas, derivados del petróleo, Es un sensor cuando el pH marca superior a 7 significa que la solución es básica y cuando es menor que 7 entonces la solución es ácida. (Castro & Olarte, 2022)

#### **5.1.18.7 Electroválvulas**

Son dispositivos electromecánicos que permiten controlar el paso de fluidos o gases. Estas convierten energía eléctrica en energía mecánica para poder cumplir su función. Están compuestas principalmente por un solenoide, formado por alambre de cobre, el cuerpo de la

válvula, émbolo, resorte, orificios y puertos de entrada y salida. Para su funcionamiento, la bobina electromagnética se magnetiza gracias al paso de corriente eléctrica, y ya que hay un resorte unido al núcleo de la válvula, la magnetización hace que el núcleo se levante o tire contra la acción del resorte, así se abre el orificio por donde pasará el fluido. Al desenergizar el núcleo la válvula volverá a su estado original deteniendo el paso de fluido (Angadi & Jackson, 2022).

Las electroválvulas se clasifican en directas o indirectas, y el tipo de operación es el que determina si las válvulas serán normalmente abiertas o normalmente cerradas. Al estar desenergizadas, las electroválvulas normalmente abiertas tendrán la válvula abierta, y las normalmente cerradas tendrán la válvula cerrada. Las electroválvulas de funcionamiento indirecto necesitan un diferencial de presión de fluido para poder funcionar, mientras que las directas no. También se pueden clasificar según el número de puertos de tubería, según esto pueden ser de dos, tres, o cuatro vías (Angadi & Jackson, 2022).

#### **5.1.19 Tarjeta de desarrollo**

Son placas cuyo propósito es permitir que desarrolladores utilicen diferentes funciones de microcontroladores, sensores, circuitos integrados, etc. para el desarrollo de proyectos que incorporan el uso de equipos de hardware para recibir o enviar información. La gestión de las placas se hace a través de un ambiente de desarrollo integrado (IDE), donde se programan según sea necesario (Mouser Electronics, 2022). Existe una gran variedad de tarjetas en el mercado las cuales cuentan con características diferentes en cuanto a capacidad de cómputo, entradas y salidas, variedad de procesadores, costo, lenguaje de programación, etc. Esto permite seleccionar la tarjeta ideal según la aplicación que se desee desarrollar (Kececi, 2019).

#### **5.1.20 Tecnologías de comunicación**

Según Mateos Matilla, Lozano Murciego, Jiménez-Bravo, Sales Mendes, & Leithardt (2022) para transmitir los datos obtenidos por sensores y mostrar el estado de los sistemas

automatizados es necesario el uso de diferentes tecnologías de comunicación. Entre las tecnologías de tipo inalámbrico se encuentran:

- Wi-Fi: al tener un enrutador o router es posible establecer una conexión a internet mediante la cual se transmitan los datos. Este tipo de conexión es útil si el área del cultivo se encuentra cerca al router y si el sistema es de tipo eléctrico.
- GPRS/3G/LTE: Suele usarse en sistemas comerciales. Es de alto costo y puede ser utilizado siempre y cuando se tenga conectividad eléctrica, la cobertura de la red y las tarjetas de red o módulos GPRS.
- Redes LPWAN: son redes de comunicación de largo alcance y de bajo consumo energético. Son útiles cuando no hay red eléctrica cerca de los cultivos. Su desventaja es que necesitan un rango de red específico para funcionar.

#### **5.1.21 Internet de las cosas (IoT)**

De acuerdo con Kumar et al., (2019) Es un modelo que permite establecer la comunicación entre elementos electrónicos de forma inalámbrica a través del internet. Esto hace posible recibir, enviar e intercambiar información de manera remota. Los datos recopilados pueden ser analizados con el fin de ser utilizados posteriormente para llevar a cabo gran variedad de tareas o tan solo para ser visualizados por un usuario, lo que le da un gran potencial para ser usado en áreas como agricultura, salud, casas inteligentes, seguridad etc. Esto se da gracias a los avances tecnológicos que permiten que diferentes objetos puedan establecer este tipo de conexiones a través de una combinación entre software y hardware (Patel y Patel, 2016).

#### **5.1.22 Interfaz de usuario**

Es el diseño mediante el cual los usuarios de un sistema pueden interactuar con el mismo mediante diferentes tipos de lenguaje dependiendo de la interfaz creada. Las interfaces de lenguaje natural permiten la navegación por el sistema utilizando un lenguaje cotidiano, las de

preguntas y respuestas muestran al usuario preguntas con respuestas predeterminadas para que se seleccione la opción y dependiendo de esto el sistema ejecuta una acción. Por último, las interfaces gráficas de usuario usan imágenes, íconos y menús para mostrar la información o las opciones disponibles para que el usuario maneje el programa (Silvestre, 2021).

### **5.1.23 Implementación de la automatización de riego y monitoreo de pH**

En el proceso de implementar un sistema de riego se debe realizar una caracterización del terreno, ya que es crucial considerar factores como la profundidad y ubicación del acuífero, fuentes de alimentación eléctrica, las características físico-químicas del agua como el pH, su caudal y presión y la conducción del agua hasta el punto de riego para determinar las adecuaciones que se deben realizar. Así mismo, es esencial conocer las características del suelo, como su permeabilidad y retención del agua para establecer el tipo de riego. Una vez realizada esta caracterización se deben plantear los requerimientos físicos y electrónicos necesarios para su implementación con el fin de proponer el diseño más adecuado. (Moreno y Benavides, 2015)

Para la implementación del sistema de monitoreo se deben analizar los diferentes enfoques teóricos, los métodos técnicos como la medición de los niveles de pH e identificar el valor ideal para el riego. Finalmente se deben plantear las técnicas y la instrumentación necesaria como calibración de los sensores, tipo de circuito, softwares e interfaz de usuario. (Casa y Mañay, 2023)

## **5.2 Marco geográfico**

### **5.2.1 Universidad El Bosque campus Chía:**

Chía es un municipio de Cundinamarca, Colombia ubicado en la Sabana de Bogotá sobre el altiplano cundiboyacense. Se encuentra a 2562 msnm, su temperatura suele estar entre los 7



y los 19°C y en cuanto a la precipitación hay época de lluvia entre marzo y diciembre y época más seca entre enero y febrero. El porcentaje de humedad varía entre 82% y 85% a lo largo del año ("Previsión meteorológica y clima mensual Chía, Colombia", s.f.).

El campus Chía es una sede de la Universidad El Bosque, ubicada en la autopista Norte Km 20 costado occidental vía Chía-Bogotá a 3km de Chía. Cuenta con más de 25 aulas y una capacidad para 1.400 personas, tiene WiFi disponible en todas sus instalaciones y parqueadero para 200 vehículos (Universidad El Bosque, 2018).

Como se observa en la Figura 3, el campus Chía se encuentra ubicado entre Chía y Bogotá.

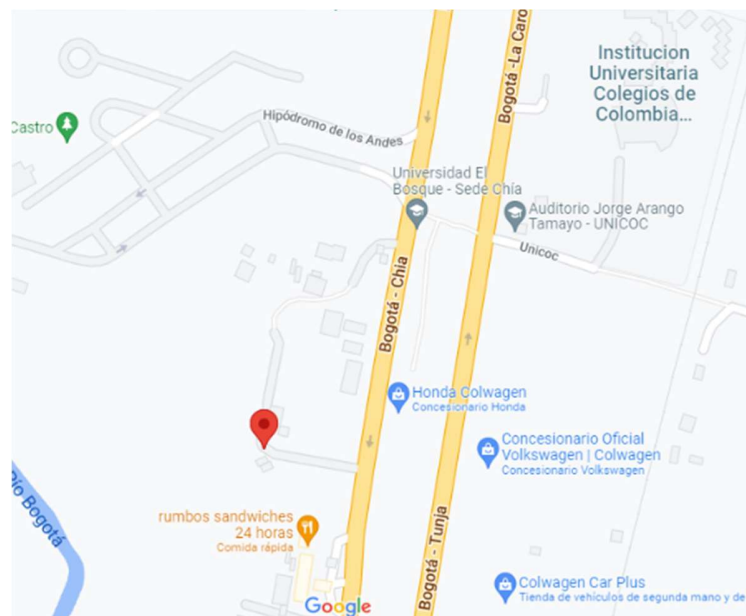


Figura 3. Ubicación campus Universidad El Bosque, Coordenadas: 4.844110, -74.032372, "Chía, Cundinamarca ". Adaptado de Google (2022 -b)

### **5.2.2 Laboratorio de experimentación en agrotécnia y energías renovables (LEATYER)**

Es un centro de desarrollo y transmisión tecnológica a la agricultura que cuenta con una zona de domos, una zona de cultivos acuapónicos, hidropónicos, verticales y agroecológica

circular, una zona de cultivos en suelo y finalmente una casa de mantenimiento y jardinería. Está ubicado en el sector sur del campus Chía (Castro & Olarte, 2022).



*Figura 4.* LEATYER campus Chía. Foto aérea tomada al laboratorio de experimentación agrotecnología y energías renovables en la sede de Chía de la Universidad El Bosque.

### 5.3 Marco normativo

Frente a los procesos realizados en la construcción de este trabajo los parámetros legales y ambientales se fundamentan en el siguiente lineamiento normativo que se encuentra en la tabla 2:

Tabla 2

Marco normativo

Norma	Definición	Aporte al proyecto
<b>Decreto</b>	Por medio del cual se expide el Decreto	Este decreto establece cuales son los
<b>1076 de 2015</b>	<p>único Reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible para su regulación social y económica, con el fin de garantizar la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la Nación.</p> <p>En el artículo 2.2.3.3.9.5 se establecen los criterios de calidad admisibles para el uso del recurso hídrico en el sector agrícola, estableciendo valores máximos en la presencia de algunos elementos y compuestos químicos. Así mismo dentro del artículo se considera necesario realizar mediciones de pH y conductividad eléctrica (Decreto 1076, 2015, ARTÍCULO 2.2.3.3.9.5.)</p>	<p>Este decreto establece cuales son los parámetros y manejo en cuanto a calidad del agua que se deben tener para poder garantizar un cultivo eficiente y de calidad. Es de suma importancia para la elaboración de este trabajo de grado, ya que al identificar estos criterios se pueden evitar problemas durante la evaluación del sistema propuesto en este trabajo y garantizar la calidad de las especies vegetales producidas durante el proceso.</p>

## 6 Estado del arte

La tabla 3, muestra diferentes proyectos de electrónica y agricultura que se relaciona con el presente trabajo de grado y que sirvieron de guía para la elaboración y construcción de este.

Tabla 3

### Estado del arte

Autor y año	Título	Resultado	Aporte al
		principal	proyecto
Pérez y Castro., 2014	Agricultura urbana y periurbana sin suelo, para Veracruz, México	El establecimiento de estos modelos urbanos y periurbanos en las viviendas pone al alcance de la población urbana alimentos baratos, nutritivos e inocuos, al tiempo que diversifica y enriquece la alimentación. El análisis de costos en ingresos determinó que todos los modelos ofrecen buenas rentabilidades, mayor a 5.5%.	Diferentes modelos de estructuras para cultivos en la agricultura urbana, sus beneficios y rentabilidad.
Langemeyer et al., 2021	Agricultura urbana: ¿un camino necesario hacia la resiliencia urbana y la sostenibilidad global?	La producción de agricultura urbana tiene el potencial de reducir los impactos ambientales asociados con la producción agrícola convencional y las cadenas mundiales de suministro de alimentos, ya que puede cerrar los ciclos de agua y nutrientes en áreas urbanas y evitar la producción agrícola en suelos menos fértiles	Identificación de beneficios e impactos ambientales, sociales y globales que se pueden generar a partir de cultivos de agricultura urbana como las camas elevadas.
Dua et al., 2021	La siembra en camas elevadas reduce el encharcamiento y aumenta el rendimiento del trigo después del arroz	Los tallos y macollos de las plantas de trigo en las camas elevadas se desarrollaron más rápidamente que aquellos que estaban en camas convencionales. En promedio a lo largo de las temporadas de crecimiento, el número de tallos y brotes en las etapas de invernada, unión y antesis camas elevadas fue aproximadamente 22% mayor que en las camas convencionales en general.	Características, beneficios y metodologías empleadas en camas elevadas.
Hernández et al., 2020	Control automático de la distribución de agua en sistemas de riego: revisión y retos	El análisis desarrollado sobre el estado del arte de los sistemas de control de la distribución del agua en los sistemas de riego muestra que aún existen problemas no resueltos tanto de carácter	Identificación de límites y errores que se desarrollan durante el diseño y la implementación del sistema de riego automatizado.

		<p>teórico, como práctico que imposibilitan la obtención de un elevado desempeño en el control de esta clase de procesos.</p>	
Carrera et al., 2019	Prototipo de un sistema de riego automatizado en árboles de cacao	Se encontró que el funcionamiento de los sensores de humedad de bajo costo es aceptable, pues la entrega de valores se aproxima a los que normalmente entregan los sensores de alta precisión. Comprobando el control del riego se puede realizar de manera automática en tiempo real.	Reconocimiento y clasificación de sensores de humedad en suelo empleados para el sistema de riego automatizado. Así mismo, modelos de programación y conexiones entre los elementos utilizados.
Cortés y Vargas, 2021	Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y monitoreo de variables ambientales mediante IOT en los cultivos urbanos de la fundación mujeres empresarias marie poussepin	El sistema diseñado e implementado evidencio cumplir con los requerimientos necesarios para monitorear en tiempo real las variables ambientales y para un riego controlado a partir de la humedad del suelo del invernadero.	Funcionamiento de la comunicación IoT entre controlador y equipos con celular o computador para el monitoreo y control del sistema de riego en el desarrollo de cultivos.
Suarez, 2022	Desarrollo de un prototipo funcional para el monitoreo y control de variables (humedad del suelo, pH del agua, temperatura del ambiente y luminosidad), asociadas al fertirriego del cultivo de tomate Cherry (Solanum lycopersicum var. Cerasiforme), de su etapa vegetativa, en Cota, Cundinamarca	El monitoreo fue beneficioso, respecto a la detección de fallos en la humedad del suelo que se lograron identificar y posibles problemas en el cambio del pH del suelo provocados por el pH del agua. Además, las plántulas tuvieron buena absorción de nutrientes importantes como fósforo, nitrógeno y potasio, debido a su gran germinación de tomates.	Metodología de implementación para un sistema de monitoreo, identificación de ventajas y desventajas para tener en cuenta.
Alao et al., 2022	Smart Solar Powered Irrigation System	Este sistema es alimentado por paneles solares, con lo que los autores aseguran que se reduce la cantidad de energía usada además de su costo a comparación del uso de energía eléctrica de red. Adicional a esto también se concluye que utilizar este tipo de sensores reduce la cantidad de agua utilizada a comparación del riego manual y que se reduce el tiempo que las personas deben estar en el lugar del cultivo ya que el riego de este se puede monitorear y controlar a distancia	Metodología de funcionamiento de un sistema IoT para riego automatizado junto con tecnologías que permiten reducir el uso de la energía y el costo de esta
Caya et al., 2018	Automated Irrigation System with the Integration of Internet of Things for Agricultural Applications	El sistema fue conectado a una aplicación web que permitía el monitoreo y control de los actuadores además de la configuración para el sistema de irrigación. Se	Aplicaciones que pueden utilizarse para informar y modificar el estado del sistema a distancia y sus ventajas a comparación del riego manual

		concluyó que el crecimiento de las plantas fue mejor con el sistema de riego a comparación del riego manual y a su vez se hizo un uso más eficiente del agua	
Obaideen et al., 2022	An overview of smart irrigation systems using IoT	revisión sobre diferentes tipos de tecnologías inteligentes utilizadas actualmente para los sistemas de riego automatizados en la agricultura. Se habla sobre los beneficios que trae el uso de estos sistemas sobre la optimización de los recursos y el manejo de los cultivos por parte de los agricultores	Indicaciones sobre qué tipo de tecnología a utilizar según la ubicación y el proyecto que se esté desarrollando
Gutierrez y Vargas, 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	El sistema funcionaba gracias a la energía de paneles solares y la turbina eólica. Para la interfaz de este sistema se utilizó un servidor, el cual era una aplicación gratuita (Blynk) que funcionaba a distancia con el uso de la red wifi.	Fuentes de energía para el desarrollo de proyectos en el LEATYER y tecnología de transmisión de datos junto con aplicación IoT para sistemas de automatización y monitoreo
Méndez y Zúñiga, 2022	Desarrollo de un microtúnel con ambiente controlado para el cultivo de agraz ( <i>Vaccinium meridionale</i> ), en el laboratorio de experimentación agrotécnica y de energías renovables (LEATYER) del programa de bioingeniería en la Universidad El Bosque, campus Chía	El sistema de riego automatizado dentro del microtúnel demostró ser beneficioso para el crecimiento del agraz a comparación de su crecimiento fuera de este. El sistema permitía observar cambios en las variables de humedad y temperatura ambiental, pH del agua y humedad del suelo.	Ubicación y estructura para la ubicación para el sensor de pH que lee esta variable en el agua destinada al riego de los cultivos.
Chethan et al., 2018	Smart Irrigation System for Agricultural Field Using LabVIEW and IOT	El riego automatizado utilizando LabVIEW junto con una aplicación IoT permitió hacer un uso más eficiente del agua y maximizar la producción del cultivo	Uso de aplicaciones para el desarrollo de sistemas automatizados.

## 7 Metodología

### 7.1 Metodología general

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto, así como las diferentes etapas que la componen y el orden lógico que las mismas siguen para cumplir el objetivo general, son descritas en detalle en la figura 5.

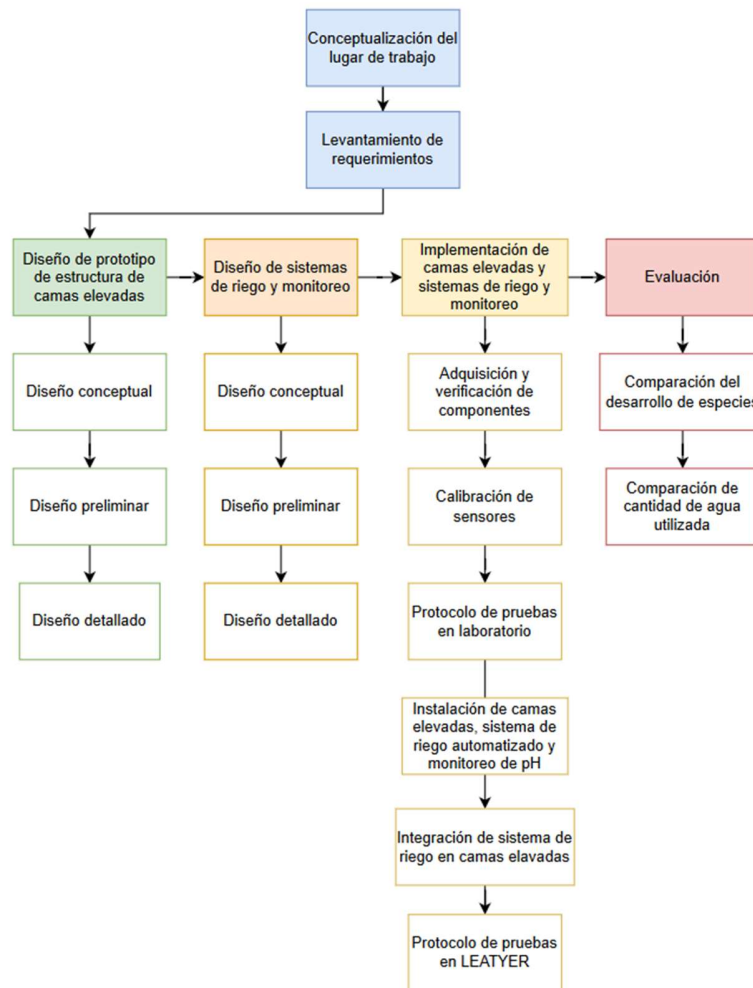


Figura 5. Actividades principales desarrolladas en el proyecto. Los colores mostrados definen diferentes fases asociadas a los objetivos específicos del trabajo. El color azul corresponde a la fase inicial que es la apertura para el planteamiento del proyecto, el color verde corresponde al primer objetivo específico, el color naranja al segundo, el amarillo al tercero y finalmente, el rosado al cuarto.

### 7.2 Conceptualización del lugar de trabajo

Para realizar el levantamiento de requerimientos fue necesario conceptualizar el LEATYER previamente, identificando características de: condiciones ambientales, componentes adyacentes, elementos disponibles para su uso o reciclaje en el proyecto, medidas de las camas de cultivo existentes, área destinada para las camas elevadas, variables fisicoquímicas del suelo que se usaría en estas, ubicación y capacidad de los tanques de almacenamiento de agua, presión de la fuente hídrica, diámetro de las tuberías y mangueras en el sistema de suministro hacia el laboratorio, fuentes eléctricas y su respectivo voltaje y corriente.

### **7.3 Levantamiento de requerimientos**

Con el fin de identificar las características que el sistema debía cumplir en cuanto a funcionalidad, calidad y restricciones, para así dar cumplimiento al objetivo general, se hizo un levantamiento de los requerimientos relacionados con cada objetivo específico.

En cuanto a los requerimientos de las dimensiones del diseño de camas elevadas junto con el sistema de automatización de riego, se tuvo en cuenta del área disponible en el LEATYER para este fin encontrada en la conceptualización. También se identificaron las especies que se busca cultivar en el laboratorio para así conocer la profundidad que debían tener los cajones. Teniendo en cuenta que los sistemas se ubicarían a la intemperie, era necesario que los materiales resistieran las condiciones ambientales del lugar. Para el diseño de los sistemas de control y monitoreo los dispositivos electrónicos debían funcionar con alimentación proveniente de las fuentes de energía disponibles en el lugar.

Ya que en el laboratorio previamente se había construido un sistema de riego automatizado, este debía adecuarse para que funcionara en las camas elevadas utilizando un método de riego que hiciera un uso eficiente del recurso hídrico, registrando alguna variable que indique en momento en que el suministro del agua debe iniciar o detenerse. Para esto se identificaron las características que deben cumplir los dispositivos electrónicos para que el tiempo de respuesta sea oportuno para no afectar el desarrollo de las plantas. A su vez se identificaron



las características que el sensor de pH debía cumplir para hacer una lectura precisa de esta variable en el agua destinada al riego.

Por otro lado, teniendo en cuenta la relevancia de un sistema de control o monitoreo relacionado a una interfaz de usuario, se estableció que los sistemas debían contar con esta plataforma con el fin de que se pueda acceder a la información obtenida mediante los sensores, recibir notificaciones en caso de que estos salgan del rango establecido, conocer el estado del riego y modificar los parámetros de su funcionamiento.

Por último, ya que la evaluación del funcionamiento del sistema se haría con las especies de lechuga *Lactuca sativa* y de Rábano *Raphanus sativus*, el suelo donde se haría su cultivo debía cumplir con los requerimientos físicos y químicos de ambas especies.

#### **7.4 Diseño de prototipo de estructura de camas elevadas**

En esta fase se encuentra el desarrollo de cada actividad de diseño llevada a cabo para dar cumplimiento al primer objetivo específico.

##### **7.4.1 Diseño conceptual**

Se identificaron diferentes tipos de estructuras utilizadas para cultivos en suelo que podrían usarse como camas elevadas en el LEATYER. Esta búsqueda se hizo en páginas de fabricantes de camas de cultivo elevadas y de insumos para jardinería y agricultura. Con base en esta información se decidió cual sería la forma de los cajones y el tipo de drenaje que se realizaría. Además, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas encontradas sobre la elevación de los cajones en agricultura, se determinó si estos se ubicarían o no en el suelo. También se aproximaron las dimensiones de las camas elevadas según el espacio disponible en el laboratorio.

##### **7.4.2 Diseño preliminar**

En el diseño preliminar se describe la formalización de la forma, estructura y composición de los cajones y de su estructura de base o soporte. Esto se hizo con base en información encontrada a partir de revisión bibliográfica en artículos científicos y de empresas comerciales. También se utilizaron matrices de decisión no ponderadas en las cuales se evaluaron los criterios pertinentes utilizando puntajes de 1 a 5, siendo 5 el valor asignado al elemento que mejor se ajuste al criterio evaluado y 1 el valor asignado al que menos se ajuste a este. Al finalizar, se realizó la sumatoria de los puntajes obtenidos por cada componente y se seleccionó el que obtuvo el puntaje más alto. Adicionalmente se realizaron cálculos cuyos resultados permitieron tomar decisiones relacionadas al diseño de los sistemas. La descripción detallada de cada proceso se muestra a continuación.

#### **7.4.2.1 Cajones**

Se identificaron distintos materiales que son utilizados para la construcción de estructuras que se ubicarán a la intemperie y que por ende podrían usarse para la construcción de los cajones. Con base en esto se realizó una matriz de decisión para seleccionar el material más apto para este fin. Los criterios evaluados se basaron en la respuesta del material a condiciones que pueden perjudicarlo, el peso que la estructura llegaría a tener al usar el material y la aproximación de su costo final. Las características evaluadas fueron: resistencia al agua, resistencia a insectos, hongos y bacterias, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, masa del material por  $m^3$ , durabilidad y costo.

Al conocer cual material se usaría, se compararon diferentes proveedores teniendo en cuenta el formato de venta de este, su costo y disponibilidad de envío al LEATYER. Con base en las dimensiones comerciales del material, se definieron las dimensiones de los cajones. También se seleccionaron los procesos a los que este debía ser sometido para aumentar su resistencia a las condiciones ambientales del lugar. Por último, se hizo la selección del material a utilizar para la estructura de soporte de los cajones mediante la matriz de decisión previamente realizada.

#### 7.4.2.2 Soportes

Se realizaron cálculos de capacidad de carga máxima de los cajones con el fin de identificar la distribución de carga en estos usando las siguientes ecuaciones:

La ecuación 1, describe la capacidad de fuerza expresada en Kilo-Newtons por metro cuadrado (KN/m<sup>2</sup>), y se calcula a partir de la fuerza total en KN y área de la cama en m<sup>2</sup>, así:

Capacidad de carga máxima

$$\frac{KN}{m^2} = \frac{Fuerza\ total\ KN}{Área\ de\ la\ cama\ m^2} \quad (1)$$

La fuerza ejercida sobre puntos de apoyo se calculó mediante la ecuación 2.

$$Fuerza\ ejercida\ en\ cada\ punto\ de\ apoyo = AP * FT \quad (2)$$

Siendo,

$$AP = \text{Área correspondiente al punto de apoyo (m}^2\text{)}$$

$$FT = \text{fuerza total que se ejerce sobre la cama (KN)}$$

De acuerdo con el resultado obtenido de las ecuaciones 1 y 2, se identificaron los puntos de apoyo necesarios, y a partir de esto, con base en diferentes materiales seleccionados, teniendo en cuenta que debían ser resistentes a la intemperie, se plantearon estructuras que brindaran dicho apoyo a los cajones, buscando a su vez, que su altura estuviera acorde a lo establecido en literatura relacionada con diseños ergonómicos para estructuras similares.

Para evaluar si las estructuras planteadas soportarían el peso al cual estarían sometidas, se identificaron las propiedades mecánicas de sus respectivos materiales con el fin de realizar

simulaciones de tensión estática en Fusion360 20.0.17457 y cálculos mecánicos de fuerza a flexión. A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas:

*Inercia del material*

$$I = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)$$

(3)

Siendo:

$$I = \text{inercia (m}^4\text{)}$$

$$R = \text{radio externo (m)}$$

$$r = \text{radio interior (m)}$$

*Esfuerzo a flexión del material*

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

(4)

Donde:

$$\sigma = \text{esfuerzo a flexión } \left( \frac{kN}{m^2} \right)$$

$$M = \text{Momento máximo (kN m)}$$

$$I = \text{Inercia de la sección transversal (m}^4\text{)}$$

$$C = \text{distancia del centroide al extremo más lejano (m)} = R$$

Según los resultados se hizo la evaluación de la viabilidad de cada diseño, comparando el soporte que cada estructura brindaría a los cajones y su costo total para finalmente seleccionar cual estructura se usaría.

#### **7.4.2.3 Drenaje**

Con base en estructuras comerciales similares a la de este proyecto, la dimensión de los cajones, la ubicación de las bases y métodos recomendados para la modificación del material del cajón sin afectar sus propiedades mecánicas, se planteó el diseño del drenaje. También se tuvo en cuenta en el diseño, el uso de algún mecanismo o material que evite pérdidas de suelo a través del drenaje, actuando como un filtro.

#### **7.4.3 Diseño detallado**

La cantidad precisa de componentes para construir las camas elevadas del diseño inicial fue calculada a partir de un modelo CAD, así como de consejos de expertos en construcción y proveedores preseleccionados. Al haber identificado la totalidad de los componentes y su ubicación la estructura, se desarrolló del protocolo de ensamblaje de las camas elevadas y se estableció su ubicación final en el terreno del LEATYER.

Al completar el diseño detallado de las camas elevadas, se identificó el número de plantas requeridas para optimizar la producción, sin problemas por competencia entre estas, mediante el cálculo de densidad de siembra. Para esto fue seleccionado el arreglo de siembra que permite cultivar la mayor cantidad de plantas en el mismo espacio. Ya que, tanto el rábano como la lechuga mantienen la misma distancia entre plantas e hileras, se usó el arreglo de tresbolillo para las camas elevadas, el cual aumenta la densidad de siembra en un 15% (Fundación Manuel Mejía, 2021). Para calcular la densidad de siembra en este arreglo, siguiendo las ecuaciones planteadas por Quarrington (2022), en primer lugar, era necesario hallar el espacio entre las filas. Esto se hizo con la ecuación 5 como se muestra a continuación:

*Espacio entre filas de plantas para camas elevadas*

$$\text{Espacio entre filas} = \text{espacio entre plantas} \cdot 0,866$$

(5)

Luego fue necesario hallar el número de plantas para las filas pares (Ecuación 6) e impares (ecuación 7), tomando en cuenta la “longitud” y “ancho” como las dimensiones de la cama de cultivo (camas elevadas o de suelo):

*No. De plantas por filas pares de camas elevadas*

$$No. \text{ plantas filas pares} = \frac{longitud - (espacio \text{ entre plantas} \cdot 0,5)}{espacio \text{ entre plantas}}$$

(6)

*No. De plantas por filas impares de camas elevadas*

$$No. \text{ plantas filas impares} = \frac{longitud}{espacio \text{ entre plantas}}$$

(7)

Posteriormente se halló la cantidad de filas que tendrá el cultivo siguiendo la ecuación 8:

*No. De filas que tendrá el cultivo*

$$No. \text{ de filas} = \frac{ancho - espacio \text{ entre plantas}}{espacio \text{ entre filas}} + 1$$

(8)

Siendo “ancho” el ancho que tienen las camas elevadas.

Para identificar el número de plantas que iban en cada fila, primero fue necesario hallar cuantas filas pares e impares cabían en cada cama. Este valor se halló mediante las ecuaciones 9 y 10:

*Número de filas pares camas convencionales*

$$\text{No. de filas pares} = \frac{\text{No. de filas}}{2}$$

(9)

*Número de filas impares camas convencionales*

$$\text{No. de filas impares} = \text{No. de filas} - \text{No. de filas pares}$$

(10)

Finalmente, para conocer la cantidad total de plantas por cultivo, se siguió la siguiente fórmula mostrada en la ecuación 11:

*Número total de plantas por cultivo*

$$NP = (PP \cdot FP) + (PI \cdot FI)$$

(11)

Donde:

*Np = Número total de plantas en el cultivo*

*PP = Número de plantas en filas pares*

*FP = Número de filas pares*

*PI = Número de plantas en filas impares*

*FI = Número de filas impares*

Ya que en las camas convencionales se hacen los cultivos en trazo cuadrado, se calculó la densidad de siembra para este trazo. Siguiendo las ecuaciones planteadas por Quarrington (2022) en primer lugar, fue necesario hallar la cantidad de plantas que cabían en cada fila y en cada columna. Esto se hizo siguiendo las ecuaciones 12 y 13:

*Número de plantas por fila camas convencionales*

$$Plantas\ por\ fila = \frac{longitud}{espacio\ entre\ plantas}$$

(12)

*Número de plantas por columna camas convencionales*

$$Plantas\ por\ columna = \frac{ancho}{espacio\ entre\ plantas}$$

(13)

Donde “longitud” hace referencia al largo de las camas convencionales y “ancho” se refiere al ancho de las camas convencionales.

Finalmente, el número total de plantas se halló siguiendo la ecuación 14:

*Número total de plantas camas convencionales*

$$No.\ total\ de\ plantas = plantas\ por\ fila \cdot plantas\ por\ columna$$

(14)

Con base a los resultados obtenidos se modeló un diagrama en Fusion360 que permitiera visualizar la ubicación de las plantas en las camas junto con las cotas de la distancia entre plantas, filas, y entre las plantas y los bordes de las camas.

Para realizar el plan de fertilización, en primer lugar se identificaron los requerimientos nutricionales de cada especie en cuanto a Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Este valor se suele expresar como kg de elemento por hectárea de suelo (kg/ha), sin embargo, en este caso



era necesario conocer el requerimiento de elemento por cada planta. Para hallar este valor se realizó el cálculo siguiendo la ecuación 15.

Conversión de requerimiento nutricional por planta

$$\text{Requerimiento por planta} = \frac{\text{área ocupada por una planta} \cdot \text{kg del elemento}}{1\text{ha}}$$

(15)

Al obtener este valor, se hizo la conversión de kg a g como se muestra en la ecuación 16.

*Conversión de Kilogramos a gramos*

$$1 \text{ gramo} = 1 \text{ Kg} * 1000$$

(16)

Luego fue necesario hallar la cantidad de cada elemento presente en el suelo. Para esto, ya que en el análisis de suelo el valor de los elementos se mostraba en unidades de ppm y meq/100g, se hizo la conversión a unidades de kg/ha mediante una calculadora diseñada por la empresa Bioterra. Por último, se utilizaron las ecuaciones 15 y 16 para identificar, en el área que ocupa una planta, qué cantidad hay de cada elemento ya presente en el suelo en unidades de gramos (g).

Al haber encontrado este valor, se hizo la multiplicación del requerimiento nutricional de cada planta por el número total de plantas en el cultivo, obtenido con el cálculo de densidad de siembra. Este procedimiento se muestra en la ecuación 17.

*Requerimiento nutricional por cultivo*

$$\text{Requerimiento por cultivo} = \text{Requerimiento por planta} * \text{No. de plantas por cultivo.}$$

(17)

Con el valor obtenido, fue necesario hacer una resta como se muestra en la ecuación 18, entre el requerimiento por cultivo y los valores ya presentes en el suelo de cada cultivo. Esto se hizo para cada especie en camas convencionales y camas elevadas.

*Cantidad de elemento faltante en los cultivos*

$$EF = RTC - PEC$$

(18)

Siendo:

$$EF = \text{Elemento faltante}$$

$$RTC = \text{Requerimiento total por cultivo}$$

$$PEC = \text{presencia de elemento en cada cultivo}$$

A partir de los valores obtenidos en la ecuación 18 se identificaron los fertilizantes que se aplicarían para otorgar la cantidad faltante de cada elemento. Al hallar esto se calcularon cuántos gramos de cada elemento había en la cantidad total del producto siguiendo los porcentajes encontrados en la tabla de composición de este. Luego se realizó una regla de tres para hallar el valor que se debía de aplicar de acuerdo con la cantidad del elemento faltante como se muestra en la ecuación 19.

*Cantidad de fertilizante a aplicar*

$$CFA = \frac{CEC * PF}{CGEF}$$

(19)

Donde:

*CFA = cantidad de fertilizante a aplicar*

*CEC = cantidad de elemento necesario por cultivo*

*PF = Peso neto o cantidad total del fertilizante comprado*

*CGEF = Cantidad del elemento en gramos equivalente al porcentaje del fertilizante*

Finalmente, al obtener los valores de fertilizante necesario en cada cultivo, se hizo un registro en Excel 2016 (Windows y Microsoft 365), con el fin de evidenciar el aporte nutricional, brindado a cada cultivo y la aplicación del fertilizante por número de plantas.

## **7.5 Diseño de sistemas de riego y monitoreo**

En este apartado se describen las actividades realizadas para la formalización del diseño conceptual, preliminar y detallado del sistema de riego automatizado y el sistema de monitoreo de pH en el agua.

### **7.5.1 Diseño conceptual**

Mediante revisión bibliográfica relacionada a sistemas de riego automatizado y de monitoreo de pH en agua para riego, se identificaron tipos de automatización, estructuras, sistemas de comunicación, interfaces, etc., que podían ser desarrolladas en el LEATYER teniendo en cuenta también los hallazgos de la conceptualización del lugar. Considerando lo anterior y los requerimientos previamente establecidos para estos sistemas, se planteó el diseño conceptual como se muestra a continuación.

#### **7.5.1.1 Sistema de riego automatizado**

Se identificaron las adaptaciones que debían realizarse para rehabilitar el sistema de electroválvulas y su caja, para que así estas pudieran usarse en el riego de las camas elevadas y que a su vez puedan ser adaptadas para el suministro de agua para los demás cultivos del laboratorio. Con base en el diagnóstico del sistema, se hizo su rediseño mediante el software Fusion360 versión 2,0,17457. También se estableció su ubicación en el terreno, el recorrido de la tubería hasta las camas, la ubicación del sistema electrónico y el recorrido del cableado hacia las electroválvulas.

El tipo de automatización con el cual funcionaría el sistema y la tecnología de comunicación que se usaría para enviar y recibir datos de los sensores fueron determinados a partir de información encontrada en bibliografía. Así mismo, siguiendo los requerimientos establecidos, este sistema fue relacionado con una interfaz de usuario.

#### **7.5.1.2 Sistema de monitoreo de pH en el agua**

A partir de la información obtenida de la conceptualización del LEATYER en cuanto a los puntos de almacenamiento y fuentes hídricas, se seleccionó el lugar donde se haría el monitoreo del pH y mediante el software Fusion360 versión 2,0,17457 se planteó el diseño conceptual de la estructura que mantendría el sensor en esta ubicación. Esto se realizó con base en diseños encontrados en otros proyectos donde se hacía el monitoreo de variables en agua. También se seleccionó de la tecnología de comunicación, método de visualización y alertas a partir de información recopilada relacionada a sistemas de monitoreo, relacionando el sistema a una interfaz de usuario.

#### **7.5.2 Diseño preliminar**

En el diseño preliminar se describen las actividades y procedimientos realizados para la formalización de los componentes necesarios para continuar con el desarrollo de los sistemas

planteados en el diseño conceptual. Para esto se utilizaron matrices de decisión sin ponderación, simulaciones e información obtenida a partir revisión bibliográfica de fabricantes, vendedores, artículos de ingeniería, proyectos de automatización y desarrolladoras de software.

#### **7.5.2.1 Sistema de riego automatizado**

Se rediseñó la tubería para electroválvulas utilizando materiales que impidan la aparición de escapes de agua teniendo en cuenta la estructura planteada en el diseño conceptual. Posteriormente el diseño fue plasmado en un modelo CAD desarrollado con Fusion360 versión 2,0,17457 para obtener la aproximación de las dimensiones que tendría la tubería, para posteriormente diseñar una caja cuyas proporciones permitan ubicar la tubería junto con las electroválvulas en su interior. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta los puntos de entrada para el agua, del cableado hacia el circuito y de las mangueras que transportan el agua hacia las camas elevadas. También se seleccionó el diámetro y tipo de manguera que se usaría para este fin.

Al identificar diferentes irrigadores que cuyo funcionamiento fuera basado en goteo, entre ellos se compararon las características de versatilidad para diferentes cultivos, ahorro de agua, facilidad de manejo para el usuario y su costo utilizando una matriz de decisión. Para establecer la ubicación del instrumento seleccionado en las camas elevadas se desarrolló un diseño hidráulico que garantizaría una distribución uniforme del agua de acuerdo con la dinámica hídrica en la textura de suelo que requiere el tipo de cultivos que se realizan en el LEATYER.

Con base en el recorrido de las mangueras establecido en el diseño conceptual, la ubicación definida para los irrigadores y la estructura diseñada para la tubería de electroválvulas con los materiales seleccionados, se llevó a cabo una simulación en el software Epanet 2.2. para verificar el correcto funcionamiento del sistema de riego. En donde se tuvo en cuenta, el coeficiente de rugosidad y pérdidas menores de cada uno de los conectores de la tubería, la presión presente en el LEATYER y la distancia entre el tanque, sistema de electroválvulas y

mangueras microporosas. Posterior a esta verificación, se hizo la selección del sensor de humedad de suelo que se usaría teniendo en cuenta características como resistencia a la humedad a largo plazo, costo y disponibilidad en el país. También se estableció la cantidad mínima de sensores y electroválvulas necesarias para cada cultivo.

Luego se identificaron los diferentes controladores que podrían utilizarse para el desarrollo del circuito, esto teniendo en cuenta las tecnologías de comunicación seleccionadas en el diseño conceptual. Entre los controladores se hizo la comparación de cuatro características relevantes de acuerdo a los requerimientos del sistema: cantidad de pines análogos/digitales, velocidad del wifi, velocidad del procesador y su costo. También se identificaron los demás componentes electrónicos necesarios para automatizar el riego, y con base en lo encontrado, se calculó el consumo de corriente de todo el sistema para seleccionar la fuente de energía para su alimentación. Finalmente, se realizó el diagrama del circuito con todos los dispositivos seleccionados.

Se seleccionó la plataforma que se usaría para desarrollar la interfaz de usuario mediante una matriz de decisión basada en los requerimientos establecidos para su funcionamiento. Los ítems para comparar fueron: posibilidad de modificación de parámetros por el usuario, visualización para varias personas, visualización a distancia y costo.

#### **7.5.2.2 Sistema de monitoreo de pH**

Se hizo la comparación de dos materiales diferentes para el diseño de la estructura donde se ubicaría el sensor, seleccionando aquel que tuviera menor riesgo de daños o deformaciones en su estructura, menor costo y mayor posibilidad de adaptación para construir la estructura planteada en el diseño conceptual. Posteriormente, mediante Fusion360, se concretó su diseño teniendo en cuenta las dimensiones encontradas en el mercado para el material y la aproximación de las dimensiones del sensor.

Teniendo en cuenta la disponibilidad de un sensor de pH en el LEATYER, mediante su ficha técnica se verificó que este cumpliera con los requerimientos establecidos para este sensor. Con base en las especificaciones del sensor, se seleccionaron el controlador y la plataforma para desarrollar la interfaz mediante las matrices de decisión desarrolladas para el sistema de riego automatizado ya que los criterios a evaluar serían los mismos.

Por último, se identificó la fuente de alimentación del laboratorio que se usaría calculando el consumo de corriente del sistema y posteriormente se realizó un diagrama del circuito teniendo en cuenta los elementos necesarios para la construcción de este.

### **7.5.3 *Diseño detallado***

A continuación, se presenta el procedimiento de selección de los subcomponentes electrónicos, hidráulicos y mecánicos necesarios para la implementación de los sistemas de riego y monitoreo planteados en el diseño preliminar.

#### **7.5.3.1 *Sistema de riego automatizado***

Se calculó la cantidad necesaria de materiales y subcomponentes para la construcción de la caja de electroválvulas con base en su modelo en Fusion360. Para la tubería del sistema se seleccionaron los tipos de tubería, acoples y demás componentes que permitieran la unión entre las electroválvulas y los irrigadores seleccionados. Mediante bibliografía relacionada a sistemas de riego con realimentación de sensores de humedad de suelo se identificó cual debía ser la distribución de los sensores de humedad de suelo, teniendo en cuenta a su vez, la ubicación de los irrigadores en las camas elevadas. Según lo encontrado se hicieron ajustes en el diagrama preliminar del circuito añadiendo los componentes faltantes del sistema.

Para implementar el sistema de riego en las camas elevadas se seleccionaron los diámetros del cableado a utilizar teniendo en cuenta la distancia que debía recorrer desde el

componente al que se conectaría hasta el controlador, el voltaje y la corriente requerida para cada componente. A su vez se identificaron los complementos necesarios para unir el cableado al controlador. Por último, se desarrolló un diagrama de flujo identificando el proceso que se deben seguir en el código de programación para que el controlador desarrolle las funciones establecidas en los requerimientos y que se integre con la interfaz de la plataforma seleccionada.

#### **7.5.3.2 Sistema de monitoreo de pH**

Inicialmente se hizo la construcción de un prototipo de la estructura planteada en el diseño preliminar, del cual se identificaron características que se debían corregir para que este fuera funcional y que su construcción fuera viable. Con base en esto se hizo un rediseño y se identificaron los subcomponentes necesarios para su implementación. Adicionalmente, se seleccionaron los demás componentes necesarios para poder construir el sistema electrónico y se definió la ubicación final del circuito con respecto a la ubicación del sensor. Por último, se desarrolló un diagrama de flujo indicando el proceso que debe seguir el código de programación de tal forma que el controlador realice las funciones establecidas para el sistema de monitoreo y que este se integre con la interfaz de usuario.

### **7.6 Implementación de camas de cultivo junto con sistema de riego automatizado y monitoreo de pH**

En esta fase se encuentra la descripción de cada una de las actividades realizadas para dar cumplimiento al tercer objetivo específico. Entre estas se encuentran la adquisición y verificación de componentes, calibración de sensores, protocolo de pruebas e instalación de los sistemas.

#### **7.6.1 Adquisición y verificación de componentes**

Se hizo la adquisición de los elementos identificados en los diseños detallados de las camas elevadas, sistema de riego automatizado y monitoreo de pH. Mediante un listado se organizaron los componentes y para cada uno de ellos se describió el método que se usaría para



verificar su correcto funcionamiento o su integridad, las observaciones con respecto a cada componente, su estado, y finalmente, que acción se debía seguir en caso de presentar un mal funcionamiento o mal estado. Al finalizar la verificación, y haber seguido la ruta de acción en caso de que fuera necesario, se inició la implementación de los sistemas.

### **7.6.2 Calibración de sensores, desarrollo de códigos de programación e interfaz de usuario**

En la siguiente sección, se describen las actividades realizadas para desarrollar los sistemas de automatización y monitoreo.

#### **7.6.2.1 Sistema de riego automatizado**

Para calibrar los sensores de humedad de suelo inicialmente se caracterizó su comportamiento con el uso de un osciloscopio, observando las variaciones en su voltaje al estar en suelo seco y al introducirse en suelo saturado. Con los valores obtenidos, y con base a la resolución del controlador seleccionado, se obtuvieron los valores que equivaldrían al 0 y 100% de humedad en suelo siguiendo la ecuación 20.

*Conversión de voltaje a resolución ADC*

$$\text{Voltaje en resolución ADC} = \frac{\text{voltaje del sensor} \cdot 4095}{3,3V}$$

(20)

Utilizando Excel 2016 o posterior para Windows y Microsoft 365, se graficaron los valores del voltaje en resolución ADC contra el porcentaje de humedad de suelo para obtener la gráfica de calibración y su ecuación. Luego, mediante Arduino IDE se programó el código del riego automatizado con base al diagrama de flujo presentado en el diseño detallado. El código se desarrolló de tal forma que se hiciera la lectura de las variables de humedad en suelo, utilizando

las ecuaciones obtenidas de las gráficas, reemplazando el valor de x con el valor obtenido por el sensor.

#### **7.6.2.2 Sistema de monitoreo de pH**

Para calibrar el sensor de pH se siguió el protocolo establecido por el fabricante del sensor seleccionado. En primer lugar, teniendo en cuenta que el sensor se había usado previamente en otros proyectos, se debía sumergir el electrodo en una solución de 0,1M HCL durante 24 horas y luego sumergirlo por “varias horas” en una solución de 3M KCl para restaurar su sensibilidad. No fue necesario preparar estas soluciones ya que se encontraban disponibles. Al finalizar este proceso, se siguió el método de calibración de dos puntos, utilizando soluciones con pH de 7 y 10. Para la calibración se conectó el controlador seleccionado con el sensor, y se desarrolló un código de programación que permitiera visualizar la salida de voltaje en resolución ADC. Se obtuvo el voltaje al sumergir el sensor en cada solución, y se graficaron estos valores contra el pH de cada solución con el fin de obtener la curva de calibración junto con su respectiva ecuación. Se desarrolló el código de programación para el monitoreo de pH en Arduino IDE, con base al diagrama de flujo presentado en el diseño detallado de sistema. Para hacer la lectura de la variable de pH en el agua se usó la ecuación obtenida de la gráfica, y se reemplazó el valor de x con el valor obtenido por el sensor.

#### **7.6.2.3 Desarrollo de interfaz de usuario**

Se descargó la aplicación móvil de la plataforma seleccionada para desarrollar la interfaz. Se establecieron dos ventanas distintas, una para el sistema de riego automatizado y otra para el sistema de monitoreo de pH. En estas se utilizaron widgets diferentes con el fin de mostrar tanto gráfica como numéricamente el valor obtenido de los sensores de humedad del suelo y pH. Para la interfaz del sistema de riego, se utilizaron íconos que permitieran visualizar el estado de

cada una de las electroválvulas (encendida/apagada). Por último, se desarrollaron las funciones que permiten obtener las notificaciones de los sistemas y modificar los parámetros del riego.

### **7.6.3 Protocolo de pruebas**

Para verificar el funcionamiento de los sistemas de riego y monitoreo, se planteó un protocolo de pruebas con base a los requerimientos que se deben cumplir. A cada prueba se le asignó un nombre, el requerimiento al cual corresponden, los pasos que se deben seguir para realizar la prueba y el valor o el resultado que se espera obtener. Las pruebas se realizaron antes y después de llevar a cabo la implementación de los sistemas en el LEATYER. Este protocolo se encuentra como **“Anexo1\_Protocolo de pruebas”**.

Para llevar a cabo el protocolo de pruebas previo al montaje, se hizo la conexión de los componentes según los circuitos diseñados y cada uno se vinculó con su respectiva interfaz de usuario. Luego se siguió el protocolo y se registraron los resultados. Al verificar que los sistemas funcionaban correctamente, se continuó con los demás pasos de la implementación mostrados a continuación.

### **7.6.4 Preparación de camas de cultivo convencionales**

Se niveló el terreno destinado a las camas convencionales y utilizando guaduas se creó el marco de las camas de la misma forma que estas se han construido previamente en el laboratorio. Finalmente, las camas se rellenaron con el suelo adquirido por la universidad.

### **7.6.5 Instalación de camas elevadas**

Se niveló el terreno designado para las camas elevadas y luego se hicieron los hoyos en los cuales se ubicarían las bases de los cajones. Posteriormente se siguió el protocolo de ensamblaje de las camas elevadas. Luego de completar el protocolo, los cajones se rellenaron con el mismo suelo que se utilizó en las camas convencionales y se verificó la estabilidad de la estructura durante un periodo de seis meses.

#### **7.6.6 *Instalación de sistema de riego automatizado***

Se hizo la construcción de la caja de válvulas siguiendo los planos obtenidos en el diseño detallado y se ubicó en el terreno. También se instaló la fuente para el suministro de agua destinado exclusivamente al riego automatizado. Se construyó el sistema de tubería para las electroválvulas y se hizo la verificación de su funcionamiento conectándolo al suministro de agua y observando que no hubiera filtraciones. Al haber comprobado que este funcionaba correctamente, se hizo el cableado de cada válvula para que luego estas fueran introducidas a la caja construida conectando la tubería a la fuente hídrica. También se instaló el sistema de tubería desde las electroválvulas hasta las camas elevadas como se especificó en el diseño del sistema.

Se instalaron tuberías subterráneas para el cableado de los sensores y de las electroválvulas. La caja de paso se modificó de tal forma que tuviera puntos de acceso para la tubería instalada y demás cableado necesario para el funcionamiento del sistema. Dentro de la caja se ubicaron los componentes seleccionados del circuito electrónico para posteriormente hacer la conexión del cableado de las electroválvulas.

### **7.6.7 Implementación del sistema de riego automatizado en las camas elevadas**

Para implementar el sistema de riego se ubicaron los sensores en el suelo de los cultivos de las camas elevadas como se definió en el diseño detallado y se encendió el sistema electrónico, estableciendo los parámetros que debía seguir el riego de cada especie en la interfaz de usuario según los requerimientos hídricos encontrados en bibliografía.

Se volvió a ejecutar el protocolo de pruebas correspondientes al riego automatizado para comprobar que el sistema funcionaba correctamente en el LEATYER. Al completar la verificación, se hizo el trasplante de las plántulas a las camas de cultivo (elevadas y convencionales) y se hizo la fertilización del suelo según el plan desarrollado.

### **7.6.8 Implementación del sistema de monitoreo de pH en el agua para riego**

La estructura de soporte del sensor fue construida siguiendo su diseño detallado, posteriormente se introdujo el sensor en la estructura y se verificó su balance al estar en el agua. Se hicieron las modificaciones en la caja de paso de tal forma que hubiera puntos de acceso para los cables de alimentación del controlador y del sensor. La caja de paso se fijó en una estructura que permitiera su soporte en el área del tanque de agua. Posteriormente, se introdujeron los elementos del circuito y se conectaron como se establece en su diagrama. También se instaló una caja de protección para las conexiones temporales del sistema. Finalmente, se conectó el circuito a la fuente de alimentación para así activar el sistema de monitoreo junto con la interfaz.

## **7.7 Evaluación del sistema**

En esta fase se describen las actividades realizadas para la evaluación de los cultivos de camas elevadas, con riego automatizado y monitoreo de pH comparado con los cultivos de camas convencionales.

### **7.7.1 Evaluación del desarrollo de las plantas**

Mediante revisión bibliográfica se buscaron fuentes de información donde realizaron la evaluación del desarrollo de las mismas especies que se cultivaron en este proyecto para así lograr identificar aquellas características que se deben observar al hacer la comparación entre su crecimiento en camas elevadas y en camas convencionales.

#### **7.7.1.1 Lechuga**

Villa et al. (2019) afirman que para la lechuga realizar un análisis fenotípico permite evaluar su crecimiento. En este se observan las características físicas de la especie como su tamaño total (diámetro), cantidad de hojas y peso a la hora de cosecha. Además, también se evalúa el rendimiento del cultivo por  $m^2$ .

Para las variables que impliquen una medición de longitud se usó una regla, para las variables de masa una gramera y para calcular el rendimiento se usó la ecuación 21:

*Rendimientos de cultivo*

$$R = \frac{\text{kg de hortaliza}}{m^2}$$

(21)

Las características físicas se evaluaron cada siete días hasta la cosecha (Rojas, 2019) y el peso final y el rendimiento de los cultivos se evaluó al momento de la cosecha (Villa et al., 2019).

#### **7.7.1.2 Rábano**

Para el rábano se hizo una evaluación fenotípica para evaluar su crecimiento con base en la metodología de Garcia et al., (2021), en la cual para cada planta se obtuvieron datos de las

variables de número de hojas, altura de la planta “desde el cuello de la raíz hasta la parte más pronunciada de la hoja terminal”, y el rendimiento del cultivo por  $m^2$ . Las características físicas se evaluaron cada 10 días desde el trasplante de las plántulas hasta el momento de la cosecha, y el rendimiento de los cultivos se evaluó en el momento de la cosecha.

Para las variables que impliquen una medición de longitud se usó una regla, para las variables de masa una gramera y para calcular el rendimiento se usó la ecuación 9.

Los datos obtenidos para ambas especies se registraron en Excel versión 16 (Windows y Microsoft) y posteriormente se utilizó el programa R core con el fin de realizar un análisis estadístico descriptivo comparando los datos de las camas elevadas vs las camas convencionales. Finalmente se comprobaron estos resultados por medio de la prueba t-Student.

### **7.7.2 Evaluación de riego**

Para evaluar la cantidad de agua utilizada en las camas elevadas y en las camas convencionales, en primer lugar, se obtuvo el caudal de los instrumentos de riego automatizado y de riego manual midiendo la cantidad de agua que se obtiene en un tiempo determinado para luego utilizar la ecuación 22:

*Caudal*

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

(22)

Siendo

$$Q = \text{Caudal}$$

$$V = \text{Volumen}$$

$$t = \text{tiempo}$$

Luego se hizo el monitoreo del riego manual y del riego en las camas elevadas para obtener el volumen de agua utilizado en cada sistema despejando la ecuación 21 y obteniendo la ecuación 22 como se muestra a continuación:

*Volumen del agua*

$$V = t \cdot Q$$

(23)

Para el riego automatizado, en la interfaz se estableció una automatización en la cual se envía una notificación cada vez que las válvulas abren o cierran. Con base a esa información se calculó el tiempo que las válvulas estuvieron abiertas cada vez que se hizo el riego, para así reemplazar el valor de “t” en la ecuación 11, y se reemplaza “Q” con el valor obtenido de caudal para el sistema de riego automatizado. Para el riego manual, se hizo el cronometraje del tiempo que duraba cada riego para reemplazar el valor de “t” y se reemplaza “Q” con el valor obtenido para el caudal del riego manual.

El registro de estos datos, y el resultado de esta ecuación cada vez que se hacía el riego de los cultivos se hizo en un Excel, en el cual al finalizar el periodo de los cultivos se hizo la suma del volumen de agua utilizado tanto en las camas elevadas como en la convencional, para luego comparar estos valores con el requerimiento hídrico de cada especie para identificar si se había proporcionado la cantidad de agua necesaria.



## 8 Resultados y discusión

### 8.1 Conceptualización del lugar de trabajo

El espacio donde se desarrolló el prototipo de camas elevadas se muestra en la Figura 6 resaltado en azul como área de camas de cultivo. Aquí, el espacio destinado a camas convencionales es de  $18m^2$ , donde hasta el momento del desarrollo del proyecto se encontraban 6 filas, cada una con 2 camas de cultivo convencionales con dimensiones de 7 m x 1,2 m. La ubicación destinada a las camas elevadas cuenta con un área de  $14,4m^2$ . Para el almacenamiento del agua a la que se hizo el monitoreo de pH hay 2 tanques, señalados como 2 y 3. En cuanto a fuentes de energía del LEATYER, en el costado norte se encuentra un panel solar que tiene una capacidad de hasta 7,66A, y se encuentra conectado a un controlador de carga con 2 puertos USB de 5V 2A y un voltaje de salida de 12V/24V y 30A. Este controlador no se encontraba en funcionamiento durante el desarrollo del proyecto. Por otra parte, hay 4 paneles solares con corriente de 8,06A que están conectados a un regulador de carga de 24V y un inversor de 1500W a 110V AC en el domo de energías. Desde este domo hay un cableado subterráneo que llega hasta el área de camas de cultivo. Durante el desarrollo de este proyecto, las baterías de los paneles solares presentaron daños por lo que no se contó con energía solar en el LEATYER. La fuente de energía disponible fue de 110V AC en la casa de mantenimiento del campus.



Figura 6. Ubicación de camas elevadas y componentes en el LEATYER. Nota: 1. Panel solar costado norte, 2. Tanque de agua junto a domo de germinación, 3. Casa de mantenimiento, 4. Conjunto de cuatro paneles solares, 5. Tanque de agua a mayor distancia del LEATYER.

En el área destinada a las camas elevadas se encontraba la caja con parte del sistema de riego construido anteriormente. En esta se encontraban 16 electroválvulas 110 AC NPT  $\frac{1}{4}$ ", dos racks de relés y mangueras de  $\frac{1}{2}$ ". Ninguno de estos dispositivos se encontraba en funcionamiento. La estructura de la tubería de electroválvulas presentaba fugas y la madera de la caja donde estas se encontraban estaba deteriorada. Tampoco había un controlador ni conexión a alguna fuente de alimentación. Adicional a esto, la fuente de agua provenía de tanques a través de tuberías de  $\frac{1}{2}$ " y llega a una llave instalada junto al del panel solar No 1. De allí el agua sale con una presión de 18 psi (Gutiérrez, Vargas, 2018). En cuanto a materiales disponibles para su uso en este proyecto se encontraron troncos de guadua, estructuras metálicas y madera plástica.

Para el suelo disponible para su uso en los cultivos de las camas se evaluaron los factores considerados como requerimientos básicos para cualquier planta: pH, CO, P, K, Ca, Mg, Na, acidez de cambio, CICE, textura, Cu, Fe, Mn, Zn, B y N total presentes en la muestra para conocer su estado inicial. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4

Análisis del suelo del LEATYER

Resultados									
Código	Lote	pH	CT	N	Ca	Mg	K	Na	Al
317	LEATYER EI Bosque	5,4	7,79	0,78	2,26	1,16	0,77	0,06	0,34

Código	CICE	P	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Ar	L	A
317	4,59	2,77	0,55	417	2,64	12,3	0,29	26	32	42

Código	Text
317	F

A partir de estos resultados se evidencia que el suelo cuenta con una textura franca, lo que es un buen indicador para el suelo, ya que, este tipo de textura permite el drenaje del agua sin ningún problema y se caracteriza por tener un gran porcentaje de materia orgánica lo que lo hace ideal para la elaboración de cultivos (Gómez 2004). Así mismo se evidencia un pH bajo fuertemente ácido, por lo que es necesario la aplicación de cal para subir este valor. Un pH ácido ejerce indirectamente sobre el suelo más presencia de metales pesados, ya que estos crean uniones más fuertes en este espacio y por el contrario uniones débiles en los cationes como Potasio, Sodio, Calcio y Magnesio. Es por esto, que como se muestra en la tabla 4, hay valores menores en estos cuatro cationes comparados con algunos metales pesados como Hierro, Zinc y Manganeseo.

Teniendo en cuenta que los requerimientos de estos elementos varían según la especie que se cultivará, este análisis se usó como base para desarrollar un plan de fertilización adaptado a rábano y lechuga. Este se muestra en el diseño detallado.

## 8.2 Requerimientos

A continuación, se muestran los requerimientos que debe cumplir el producto tanto en funcionalidad, calidad y también las restricciones que este tiene.

### **8.2.1 Funcionales**

- Las camas de cultivo elevadas y los sistemas de riego y monitoreo deben funcionar estando a la intemperie.
- El suelo para el cultivo de la lechuga y el rábano debe tener las características adecuadas establecidas para cada especie
- La profundidad de las camas debe ser apropiada para cultivar hortalizas de clima frío.
- Los sistemas de irrigación y monitoreo deben poder alimentarse con las fuentes de alimentación disponibles en el LEATYER.
- El tipo de riego utilizado debe ser por goteo con el fin de hacer uso más eficiente del agua (Benavides Et al., 2017).
- El sistema de irrigación debe activarse y desactivarse en función de los rangos de humedad de cada una de las especies vegetales para las camas de cultivo elevadas.
- Los sensores deben poder medir valores de humedad del suelo entre 0 y 100% ("Guide: Soil Moisture Recommendations for Flowers, Plants and Vegetables", 2018), y el de pH entre un valor entre 5 y 7 (University of Massachusetts Amherts, 2022)
- Los datos obtenidos de los sensores deben poder ser visualizados en una interfaz de usuario.
- La interfaz de usuario debe mostrar si las válvulas están encendidas o apagadas.
- La interfaz de usuario debe notificar cuando las variables medidas están por encima o por debajo de los rangos establecidos de humedad.

- La interfaz de usuario debe notificar cuando el valor de pH del agua sale del rango de los valores aceptables para el agua de riego agrícola (entre 4,5 y 9)
- La interfaz de usuario debe permitir que los usuarios modifiquen el rango bajo el cual funcionen el sistema de riego y las notificaciones sin tener que modificar el código.

### **8.2.2 De calidad**

- Se deben rediseñar los sistemas de riego construidos anteriormente en el LEATYER y adecuarlos a las nuevas camas de cultivo y a los requerimientos establecidos para el nuevo sistema.
- El material de las camas de cultivo no debe deteriorarse frente a: la humedad del ambiente (hasta 100%), humedad del suelo (50%-80%) y temperatura de entre 7 y 20°C ("Previsión meteorológica y clima mensual Chía, Colombia", n.d.) ("2018).
- Los sensores del sistema de irrigación deben ser resistentes a condiciones de humedad del suelo (0%-100%) y de ambiente (hasta 100%), viento (hasta 15 Km/h) y temperatura (7 y 20°C) ("Previsión meteorológica y clima mensual Chía, Colombia", n.d.) ("Guide: Soil Moisture Recommendations for Flowers, Plants and Vegetables", 2018).
- El sensor de humedad del suelo debe hacer lecturas de esta variable con un porcentaje de error máximo de 6,4% (Soulis et al., 2015).
- El sensor de pH debe hacer lecturas de esta variable con un porcentaje de error máximo de 3,63 % (Hanna instruments, 2021)
- Los sensores deben estar calibrados para detectar humedad en el suelo entre 0 y 100% (Soulis et al., 2015).
- El tiempo de respuesta del sistema de riego debe ser de aproximadamente 5 minutos (J.Escobar, comunicación personal,2021).

### **8.2.3 De restricción**

- Las camas elevadas deben tener el tamaño adecuado para que ocupen el área de  $14,4\text{ m}^2$  disponible en el LEATYER
- El uso de las camas elevadas estará destinado únicamente para el cultivo de hortalizas

## **8.3 Diseño de prototipo de estructura de camas elevadas**

Las tres fases donde se desarrolla el diseño de los cajones y las bases para estos se muestran a continuación.

### **8.3.1 Diseño conceptual**

Para el diseño inicial se decidió usar la misma profundidad a lo largo de todo el cajón, teniendo en cuenta que, al ser un espacio de experimentación, puede ser necesario hacer cultivos de una misma especie, por lo que un cajón con menor profundidad en algún extremo puede no contar con el espacio suficiente para el desarrollo correcto de todas las plantas. De igual manera, partiendo del espacio disponible para las camas elevadas y la necesidad de tener un espacio de cultivo similar al de las camas convencionales, se decidió que los cajones tuvieran forma rectangular.

Así mismo, se decidió usar una estructura para elevar los cajones del suelo. Se agregaron más soportes a comparación de las camas elevadas encontradas en el mercado teniendo en cuenta que, por el espacio que tendrían que ocupar, su tamaño sería mayor, y a diferencia de las camas comerciales, estas tendrían que soportar el peso de suelo en vez de sustrato el cual suele ser más ligero.

En cuanto al sistema de drenaje se decidió hacer agujeros al fondo de las camas en vez de usar la separación entre las tablas como espacio para drenaje como se encontró en diseños comerciales, ya que en los agujeros se pueden usar componentes como tubos para evitar que el

agua haga contacto con la madera constantemente, mientras que para el espacio entre tablas se dificulta hacer este aislamiento y hay una mayor área que estaría en contacto con la humedad constantemente.

Teniendo en cuenta que el espacio disponible es de  $14,4m^2$ , se planteó que el tamaño de cada cama fuera de  $7m^2$ . En la Figura 7 y 8 se muestran los planos del diseño conceptual de las camas elevadas.

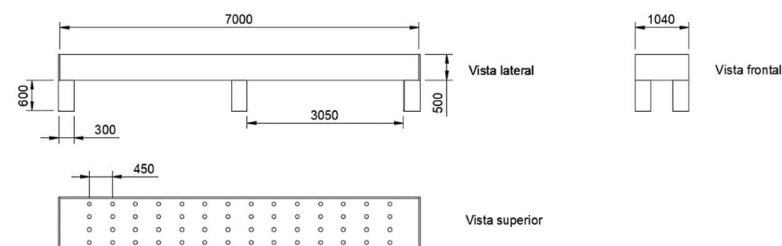


Figura 7 Diseño conceptual de las camas elevadas.

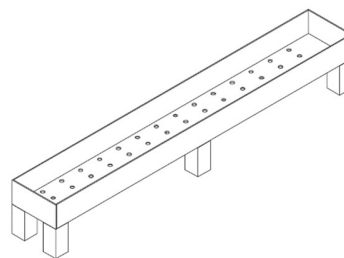


Figura 8. Diseño conceptual de las camas elevadas vista 3D.

## 8.3.2 Diseño preliminar

### 8.3.2.1 Cajones

Los materiales encontrados para construcción de elementos que se ubican a la intemperie son: madera de teca, madera plástica, polietileno de alta densidad y madera de pino. Las características de cada material según los criterios que se evaluaron se muestran a continuación.

En cuanto a la resistencia al agua la madera de teca contiene altos niveles de aceites por lo cual se caracteriza como un material casi impermeable sin tener que hacerle algún tratamiento adicional, además, estos aceites también repelen insectos. Se considera que esta madera tiene una durabilidad de hasta más de 75 años (Teak + Table Outdoor, 2021).

La madera plástica es un material impermeable por lo que no se verá afectado por la presencia de humedad, lluvia u otras condiciones relacionadas a la presencia de agua (Ruiz et al., 2021). También se considera inmune a plagas o insectos y tiene una duración mayor a la de la madera natural gracias al uso de polímeros para su fabricación (Maderplastic, 2022).

El polietileno de alta densidad también es impermeable (Casiopea, 2015) y es resistente a insectos, hongos y demás organismos (OPS, 2022). Se considera que con el uso puede durar hasta 50 años (US FUSION & Specialty Construction, 2022).

En cuanto a la madera de pino, originalmente esta no es resistente al agua, ya que es un material que puede absorber la humedad lo que afecta sus propiedades mecánicas y además promueve el crecimiento de hongos y otros organismos en la madera (Parker, 2022). Sin embargo, existen tratamientos como la inmunización de la madera, lo cual no afecta sus propiedades mecánicas y hace que esta sea resistente al agua, a diferentes condiciones ambientales, a hongos y plagas. Además, se pueden aplicar diferentes productos sobre la madera para que esta impermeabilizarla y que aumente su resistencia a la luz solar (Pintuco, 2022). Se espera que la madera inmunizada tenga una duración de entre 15 y 20 años (Madepinos, 2022), pero al usar recubrimientos como el mencionado anteriormente se puede aumentar su durabilidad.

Aunque el acero es un material impermeable, no es del todo resistente al agua ya que al pasar el tiempo esta ocasiona su oxidación lo cual afectará sus propiedades y estructura a largo



plazo (White, 2020). En general, las estructuras hechas en acero pueden durar entre 50 y 100 años, son resistentes a los insectos, al moho (Hance Construction, 2020).

Los valores de las variables de módulo de elasticidad, módulo de ruptura, masa del material y costo, se encuentran organizados en la tabla 5.

Tabla 5

Propiedades físico-mecánicas de materiales considerados

	Madera de teca	Madera plástica	HDEP	Madera de pino	Acero
<b>Módulo de elasticidad</b>	95.001,56 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>a</sup>	34.649,96 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>b</sup>	15.295,7 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>c</sup>	83.616,73 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>d</sup>	2.142.000 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>e</sup>
<b>Módulo de ruptura</b>	929,27 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>f</sup>	412,88 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>g</sup>	458,87 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>c</sup>	897,35 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>d</sup>	3716,86 $\frac{kg}{cm^2}$ <sup>h</sup>
<b>Masa del material por m<sup>3</sup></b>	655kg <sup>i</sup>	838,34 kg <sup>j</sup>	970kg <sup>k</sup>	450 kg <sup>l</sup>	7.849,05 kg <sup>m</sup>
<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	\$231.510 <sup>n</sup>	\$22.750 <sup>n</sup>	\$12.857 <sup>o</sup>	\$4.650 <sup>n</sup>	\$155.722 <sup>p</sup>

Nota. <sup>a</sup> (Darmono, Ma'arif, Widodo, & Pamungkas, 2019), <sup>b</sup> (Arandha et al., 2017), <sup>c</sup> (Binti, 2020), <sup>d</sup> (Mańkowski, Laskowska, & Zbieć, 2018), <sup>e</sup> (Civil's Guide, 2021), <sup>f</sup> (Darmono, Ma'arif, Widodo, & Pamungkas, 2019), <sup>g</sup> (Arandha et al., 2017), <sup>h</sup> (Alhassan, Olasehinde, Musonda, & Odeniyi, 2020), <sup>i</sup> (Cotswold Teak, 2021), <sup>j</sup> (Ruiz A, Lozano O, & González M, 2021), <sup>k</sup> (Tangent, 2022), <sup>l</sup> (Tadesse & Fidalgo Fonseca, 2022), <sup>m</sup> (Spira, 2021), <sup>n</sup> (Homecenter, 2022), <sup>o</sup> (ProEmplas, 2022), <sup>p</sup> (Wesco, 2022)

Los puntajes asignados a cada material según las variables evaluadas se muestran en la tabla 6. Teniendo en cuenta que el mayor puntaje total lo obtuvo la madera de pino, este fue el material utilizado para la construcción de los cajones.

Tabla 6

Matriz de decisión para el material de las camas

Propiedades	Madera de teca	Madera plástica	HDPE	Madera de pino (tratada)	Acero
Resistencia al agua	4	5	5	4	3
Resistencia a insectos, hongos y bacterias	4	5	5	4	5
Módulo de elasticidad	4	2	1	3	5
Módulo de ruptura	5	2	3	4	1
Masa del material por m <sup>3</sup>	4	3	2	5	1
Durabilidad	4	5	3	3	3
Costo	1	3	4	5	2
Total	26	25	23	28	20

Para la selección del proveedor de la madera se compararon 3 empresas que tenían disponibilidad del material y hacían envíos a Chía. Esta comparación se muestra en la tabla 7.

Tabla 7

Proveedores de madera de pino

Empresa	Tipo de madera	Medida tabla ancho x alto (metro)	Medida tabla largo (metro)
Inmunizadora Serye	Pino inmunizado con vacío-presión y químico CCA	0,25 x 0,025	3 y 4
Madepinos	Pino inmunizado con vacío-presión y químico CCA tipo C	0,18 x 0,025	1-1,5-2,5-3
Maderas Inmunicol	Pino inmunizado con vacío-presión y químico CCA	0,10 x 0.025	3

La empresa seleccionada para la compra de la madera fue Maderas Inmunicol debido a su costo, disponibilidad de entrega y las medidas del material, teniendo cuenta que, al cortar las tablas para obtener las dimensiones necesarias para los cajones, el material sobrante sería menor a comparación del sobrante de las tablas de otros proveedores.

Ya que la madera que se usaría estaba inmunizada, esta se encontraba protegida contra la humedad, hongos, xilófagos y otros depredadores, sin embargo, era importante que este material también fuera resistente a otras condiciones ambientales. Para esto se decidió utilizar la pintura impermeabilizante “vareta” la cual como beneficio trae alta protección a la intemperie para muebles expuestos al sol lluvia y humedad (Pintuco, 2022). Adicional a esto, para disminuir el contacto que el agua tendría con la madera se decidió utilizar plástico tipo invernadero para cubrir el interior de las camas antes de introducir el suelo. Este plástico tiene propiedades que lo hacen resistente a la luz UV por lo que no se deteriorará al estar expuesto a la luz solar. Además, cuenta con un calibre que lo hace resistente a perforaciones, rasgaduras o deformaciones. El

uso en conjunto de estos materiales permitiría construir una estructura resistente a todas las condiciones ambientales del LEATYER tal como se había establecido en los requerimientos, asegurando así la durabilidad del producto y previniendo deformaciones o daños estructurales ocasionados por el deterioro de los materiales seleccionados.

Con base en el espacio disponible en el LEATYER para las camas elevadas y el tamaño de las tablas del proveedor seleccionado, se decidió construir 4 camas elevadas, cada una con 3 m de largo, 1 m de ancho y 0,5 m de profundidad cumpliendo los requerimientos establecidos en cuanto al uso del espacio designado para las camas elevadas y la profundidad que requieren las especies para su desarrollo.

Debido a la fuerza ejercida por el suelo sobre la estructura, se tuvo en cuenta la posibilidad de que las tablas que la componen se separaran, por esto, se decidió usar madera plástica para hacer refuerzos en las paredes desde la parte interna de los cajones. Este material se seleccionó teniendo en cuenta la matriz de decisión de la tabla 6, donde según el puntaje se puede observar que, para este fin, la madera cumple los requerimientos de resistencia a condiciones de la intemperie y propiedades mecánicas que permitirán que las tablas cumplan con su función de soporte. Estas tablas debían ser cortadas para medir 0,5 m de tal forma que queden con la misma profundidad de los cajones.

#### **8.3.2.2 Soportes**

El estudio de las fuerzas a las que se someterían los cajones no fue realizado mediante simulaciones, esto debido a que la madera es un material ortótropo y su comportamiento es poco predecible ya que depende de diversos factores que no se pueden configurar en los softwares de simulación. Aunque es posible configurar la madera de tal forma que se comporte como un material isotrópico en la simulación, esto no demostraría su comportamiento real en las

condiciones a las que se enfrenta el material (AutoDesk, 2022). Debido a esto, este análisis fue realizado mediante los cálculos que se muestran a continuación.

Para poder obtener la fuerza total a la que se someterían los cajones se tuvo en cuenta el volumen dentro de estos, el cual corresponde a  $1,4m^3$ , y la masa total que habría dentro de estos que corresponde a  $1400\text{ kg}$ . Esto se obtiene suponiendo que los cajones estuviesen llenos de agua (densidad igual a  $1000\text{ kg}/m^3$ ), con el fin de hallar el límite de carga máximo que tendrían que sostener los soportes.

La fuerza a la que se someten los soportes fue hallada de la multiplicación de la masa total de los cajones ( $1400\text{ kg}$ ) por la gravedad ( $9,8\text{ m}/s^2$ ). Este valor fue convertido de N a KN, obteniendo  $13,72\text{ KN}$ .

Se halló la fuerza ejercida por metro cuadrado usando la ecuación 1. Se dividió  $13,72\text{ KN}$  entre el área total de cada cajón, que corresponde a  $2,8\text{ m}^2$  y se obtuvo  $4,9\text{ KN}/m^2$ . Debido a la longitud de los cajones, se planteó la idea principal del contar con 3 puntos de apoyo para distribuir las cargas con el fin de evitar la flexión y el pandeo de las tablas. Se realizaron los cálculos mostrados a continuación, para identificar la fuerza ejercida sobre cada punto de apoyo con base en el diagrama de distribución de áreas. Se tomaron los puntos centrales entre los 3 puntos de apoyo como indicadores, ver Figura 9.

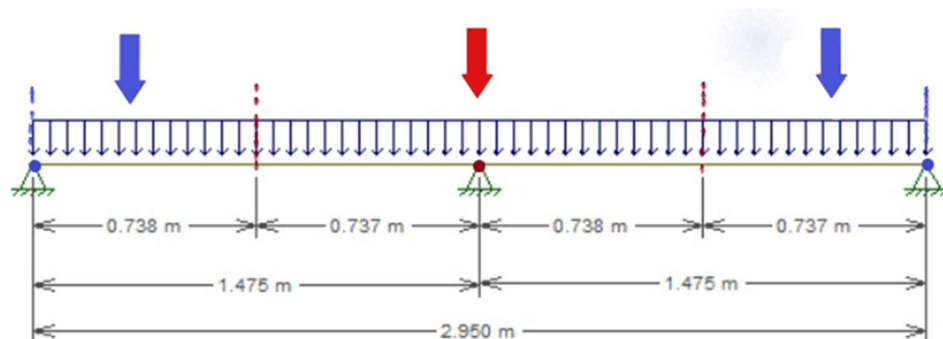


Figura 9. Distancias para distribución de cargas

Tomando el ancho de las camas que corresponde a  $0,95\text{ m}$  y la distancia que ocupa cada punto de apoyo,  $0,74\text{ m}$  (Figura 9), se obtuvo el área correspondiente a cada punto de apoyo la cual fue de  $0,70\text{m}^2$ .

Por lo tanto, la fuerza ejercida en cada punto de apoyo fue hallada usando la ecuación 2. y su valor fue de  $3,44\text{ KN}$ .

Se tuvo en cuenta que  $3,44\text{ KN}$  corresponde a la fuerza ejercida en los puntos de apoyo de las esquinas (Secciones azules mostradas en la figura 9), ya que, en el centro (sección roja mostrada en la figura 9), se recibe el doble de fuerza, debido a que se suman las cargas del lado derecho y del lado izquierdo de los cajones. Por lo que, se decidió evaluar la fuerza total y realizar la evaluación de carga máxima sobre este valor que corresponde a  $6,88\text{ KN}$ .

Con este valor, se plantearon los tres diseños posibles de las bases teniendo en cuenta que su altura debía ser de  $0,5\text{ m}$ , ya que se ha establecido que para trabajo pesado la superficie de trabajo debería estar elevada a aproximadamente  $1\text{ m}$  (ESA, 2009), y la altura de los cajones ya contaba con  $0,5\text{ m}$ .

- **Estructura de soporte en guadua**

Para el diseño de los soportes elaborados con guadua, las uniones se realizaron como indica Cadena (2019), mediante el uso de pernos como se muestra en la Figura 10.

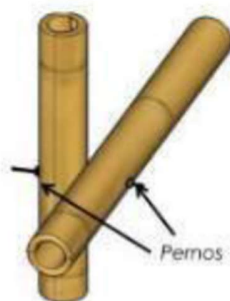


Figura 10. Unión entre guaduas. Tomado de “Guía Didáctica para Diseño y Construcción de estructuras de Guadua y otros Bambúes” por D. Cadena, 2019.

Con base en esto, se diseñó la estructura que se muestra en la Figura 11, creando los 3 puntos de apoyo correspondientes.



Figura 11. Estructuras en guadua para las camas elevadas

Con el anterior resultado se calcularon las reacciones de cada punto de apoyo mediante el software libre Ftool 4.0. Se halló que cada reacción se entiende como el momento flector producido por la distribución de cargas y el esfuerzo que resiste el material, obteniendo los valores que se muestran en la figura 12.

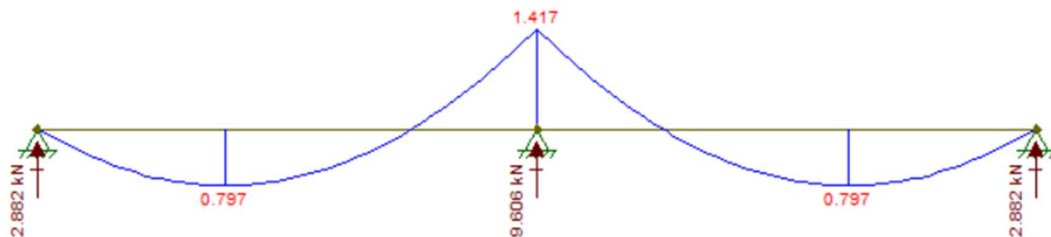


Figura 12. Carga por cada punto de apoyo en software libre Ftool. Vista lateral de los tres soportes.

En cada soporte se sitúan dos patas que sostienen el cajón (ver figura 11), por lo que la reacción del soporte del centro obtenida en la figura 12 (9,606 KN) debió ser dividida entre 2 obteniendo 4,803 KN, pues es lo correspondiente a la reacción dada en cada pata de la cama.

Como se muestra en la figura 13. Se evidencia el momento máximo de la viga del soporte central, obteniendo 1.141 kN m, valor usado para el cálculo de esfuerzo a flexión (ecuación 4).



Figura 13. Reacciones por cada pata de la estructura. vista frontal de cada soporte

Para iniciar con el análisis de resistencia se estimó un diámetro exterior de la guadua de 12 cm y un diámetro interior de 10 cm. Se empleó la ecuación 3 y se obtuvo un valor de  $5.27 * 10^{-6} m^4$  como inercia del material.

Usando la ecuación 4 se obtuvo el esfuerzo a flexión al cual sería sometido el soporte central en guadua, el cual fue  $6493,60 \frac{KN}{m^2}$

$$\sigma = \frac{1.141 \text{ kN m} * 0.03}{5.27 * 10^{-6}} = 6493.60 \frac{kN}{m^2}$$

Según Sapuyes. E., et (2018), en su investigación de “Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua”, el módulo de elasticidad en promedio de una guadua es de 15483 MPa, lo que equivale a  $15483000 \frac{kN}{m^2}$ , esto quiere decir, que su capacidad de resistencia es mucho mayor a la que será sometida, por lo que no presentará ningún daño.

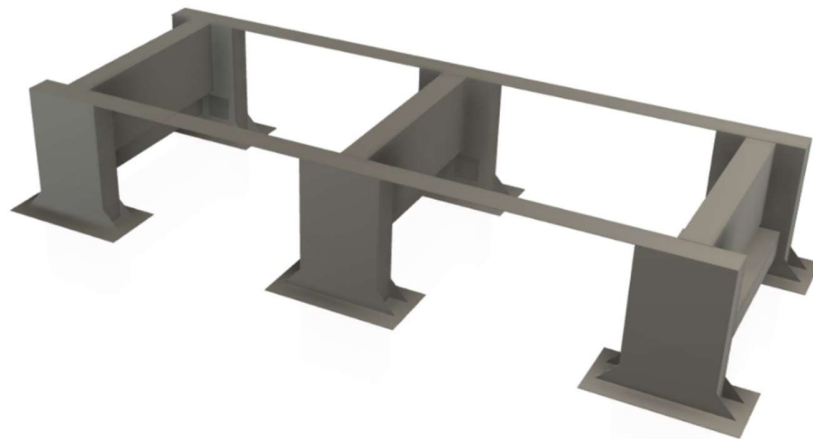
Para esta estructura el costo total sería de aproximadamente \$300.000 COP. Este costo se debe a los materiales que se necesitarían para fijar las bases en el terreno. El costo de las



guaduas y los pernos no se suma, ya que, en caso de necesitarlos, estos serían otorgados por parte de la universidad, debido a la disponibilidad de estos materiales en el LEATYER.

- **Estructura de soporte en acero**

Para la base en acero se hizo un modelo CAD en Fusion360 2.0.17457 como se muestra en la Figura 14.



*Figura 14. Modelo CAD de la base en acero.*

Con este modelo se hizo una simulación de tensión estática para analizar si la estructura soportaría el peso de los cajones junto con el cultivo. Para esto, se usó el mismo peso que se empleó para la estructura de guadua (3,44 KN) ya que las fuerzas se reparten de la misma manera.

En la figura 15 se muestra el resultado de la simulación. La escala de colores al lado derecho de la estructura es un indicador de los límites de seguridad, en el cual el color azul muestra que la estructura se encuentra por debajo del límite mínimo de seguridad, el color verde muestra que la estructura se encuentra dentro del límite permitido del material antes de que este se flexione, el color amarillo indica que la estructura se deforma con la tensión aplicada y finalmente el rojo indica la falla de la estructura, es decir, su ruptura. En este caso, la estructura

se encuentra en color azul con lo que se comprueba que no presentará fallas al estar sometida a la fuerza establecida.

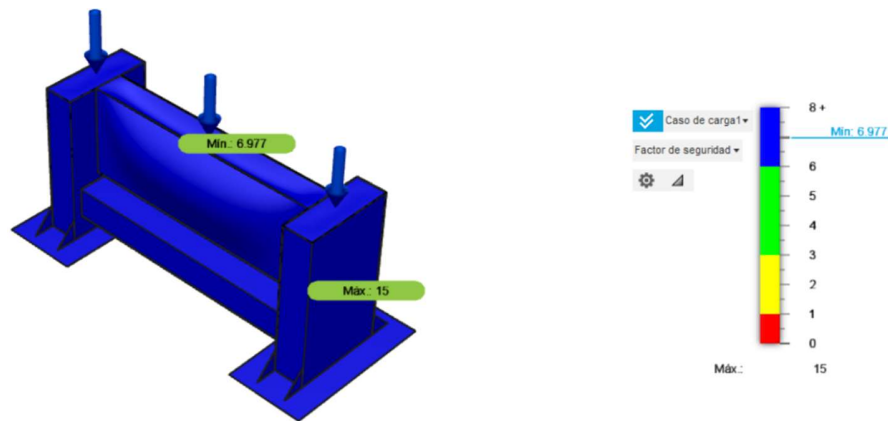


Figura 15. Simulación de tensión estática

Al cotizar la mano de obra y los materiales necesarios para la fabricación de esta estructura se obtuvo un precio de aproximadamente 2'000.000 COP en total.

- **Estructura de soporte en madera de pino**

Por último, para las bases con madera de pino se ideó un diseño con base en las camas elevadas encontradas en el diseño conceptual (Figura 16).



*Figura 16. Estructuras en madera de pino para las camas elevadas*

Al igual que la guadua, la madera de pino no se puede simular, por lo que se realizó el mismo procedimiento para hallar las reacciones del soporte central. Así mismo se realizó los cálculos de inercia y esfuerzo a flexión para verificar que la estructura soportaría el peso de los cajones, como se muestra a continuación.

Para las tablas de 25 cm x 2.5 cm, se calculó la inercia de la sección transversal con respecto al centroide de masa mediante la ecuación 3, obteniendo  $3,26 * 10^{-6} m^4$  de inercia del material.

Se usó la ecuación 4 para hallar el esfuerzo a flexión al que se sometería el soporte central de la estructura en madera de pino, el cual fue  $4380.33 \frac{KN}{m^2}$

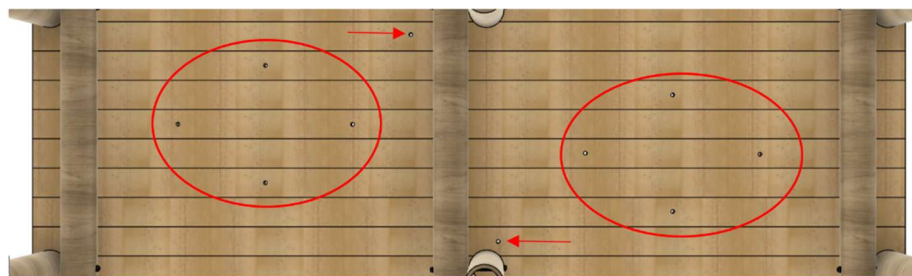
El módulo de elasticidad en promedio de la madera de pino es de  $8200000 \frac{kN}{m^2}$ , esto quiere decir, que su capacidad de resistencia es mucho mayor a la que será sometida, por lo que teóricamente no presentaría ningún daño. Y su costo de esta estructura sería de aproximadamente \$600.000 COP.

Teniendo en cuenta el costo de las 3 estructuras y su desempeño como base de los cajones de las camas elevadas, se seleccionó la estructura hecha en guadua, ya que proporciona el soporte necesario para sostener los cajones con su capacidad de peso máximo. Además, es un material que se encuentra disponible para usar dentro de las instalaciones del LEATYER, por lo que el costo para su construcción es menor. Así mismo, se realiza un aprovechamiento de la guadua, promoviendo su reutilización.

### **8.3.2.3 Drenaje**

Para el drenaje de las camas se encontró que el diámetro de los orificios no debe exceder 1/3 del ancho de las tablas para prevenir afectaciones sobre su resistencia mecánica, y además,

deben ser ubicados en el centro de cada tabla (DeKorne, 2022). Teniendo en cuenta que el ancho de las tablas es de 10cm, el diámetro de los orificios no debía exceder de 3,3 cm de diámetro. También se consideró la ubicación de las bases seleccionadas. Con base en esto se diseñó un patrón usando orificios de ½ pulgada que se ubicaran entre los soportes de guadua. La cantidad de orificios debía ser suficiente para que el agua drene de las camas pero que a su vez mantenga la humedad del suelo. Por esto se realizaron dos patrones en forma cuadrada al lado derecho e izquierdo de las camas como se muestran entre círculos rojos en la figura 17. Se adicionaron dos orificios más, cada uno a un lado de la guadua central como se indica con las flechas rojas, para auxiliar el drenaje en la parte central de las camas.



*Figura 17. Ubicación de orificios para el sistema de drenaje. Vista inferior de camas elevadas.*

Adicionalmente, para prevenir que el suelo salga de las camas cuando se hace el riego se seleccionó el geotextil como material para filtrar el agua.

Este diseño permite mantener la humedad del suelo en los cajones, con lo cual se optimiza el uso del recurso hídrico reduciendo la frecuencia y volumen de agua utilizada en los cultivos.

El diseño preliminar de las camas elevadas se muestra en la Figura 18 y 19.

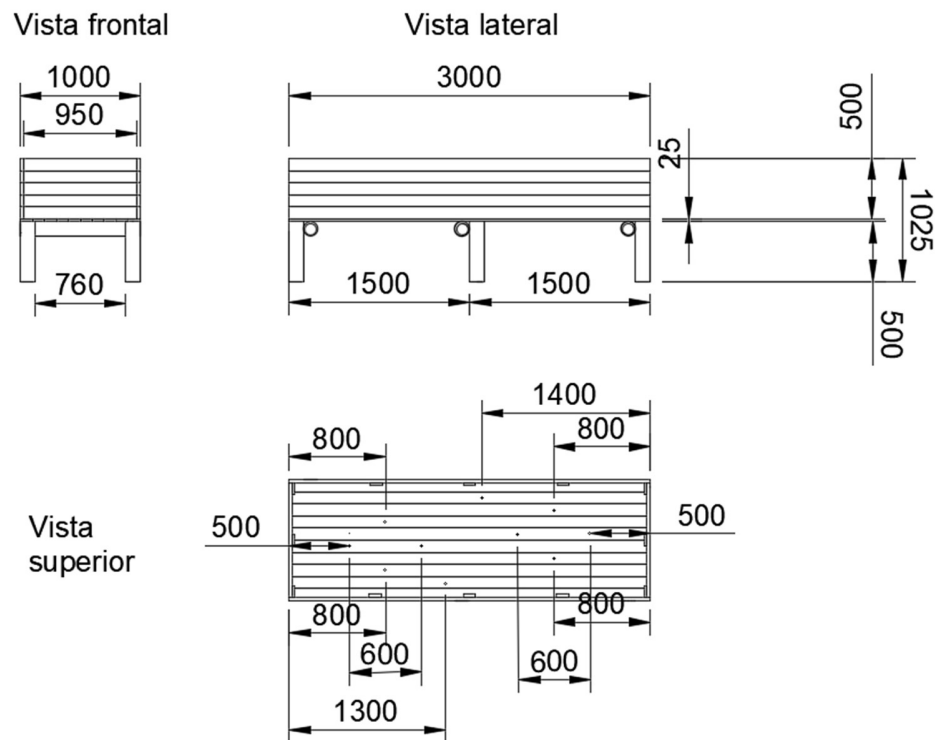


Figura 18. Diseño preliminar de las camas elevadas. Todas las medidas se encuentran en mm.



Figura 19. Modelo CAD del diseño preliminar de las camas elevadas

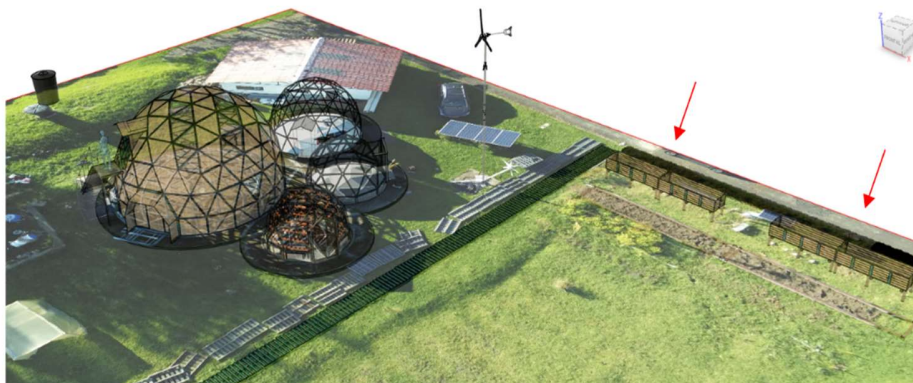
### 8.3.3 Diseño detallado

Se identificó que en total se necesitaban 96 tablas de pino para construir 4 camas elevadas, es decir, en cada cama se usan 24 de estas tablas. Para la madera plástica, se necesitan en total 32 tablas de 0,5 m. Se debía usar tornillos tipo goloso de 2x8" y se determinó la ubicación de los tornillos de tal forma que estos brinden el soporte necesario para mantener la estructura unida, se encuentren en una ubicación en la cual queden centrados dentro de la madera y cuidando que al unir la totalidad de la estructura no haya tornillos que se crucen entre sí.

Para las bases, teniendo en cuenta que la medida de las guaduas es de 2,35 m, se necesitan 12 guaduas en total. Para unir las guaduas entre sí como se muestra en el diseño preliminar, se debía usar 6 pernos de 1 m de largo por ½ " de diámetro y arandelas y tuercas de la misma medida en cada extremo de los pernos. Es decir, 12 tuercas y 12 arandelas por cama.

Teniendo el conocimiento de cuáles eran los materiales necesarios para hacer el ensamblaje de las camas y su ubicación en la estructura, se diseñó el plano final del diseño junto con el protocolo de ensamblaje de camas elevadas, los cuales se adjuntan como **Anexo2\_Planos camas elevadas** y **Anexo3\_Protocolo de ensamblaje camas elevadas**. Estos diseños otorgan información sobre cómo se debe hacer la construcción de las camas elevadas lo cual permite hacer una implementación eficiente de esta estructura en el LEATYER.

Por último, de las 4 camas se separaron 2 para cada especie con el fin de ubicarlas en el LEATYER como se muestra en la Figura 20, respetando el patrón de ubicación de camas de cultivo que ya se ha establecido allí.



*Figura 20. Ubicación de camas elevadas en el LEATYER.*

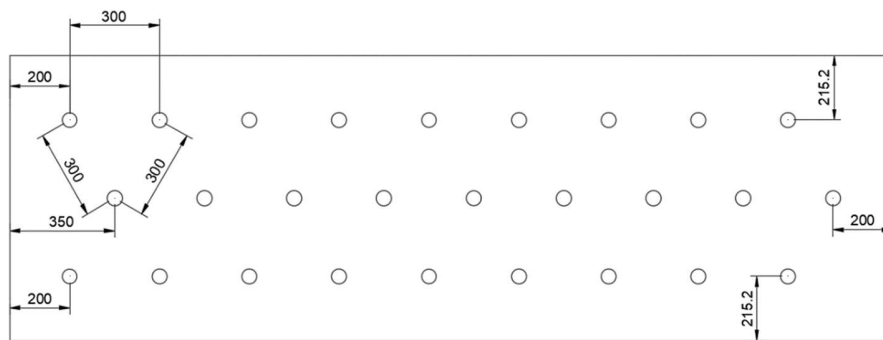
Los resultados obtenidos del cálculo de densidad de siembra para los cultivos se muestran a continuación. Se debe tener en cuenta que, en todos los cálculos relacionados con cantidad de plantas y número de filas, el valor obtenido es redondeado al número menor ya que esta variable siempre debe corresponder a un número entero.

Para el cultivo de lechuga en camas elevadas teniendo en cuenta que: el espacio entre plantas es de 0,3 m, la longitud interna de las camas es de 2,95 m y que el ancho es de 0,95 m se calculó un total de 27 plantas.

Para el cultivo de rábano en camas elevadas teniendo en cuenta que: el espacio entre plantas es de 0,2 m, la longitud interna de las camas es de 2,95 m y que el ancho es de 0,95 m se calculó un total de 70 plantas.

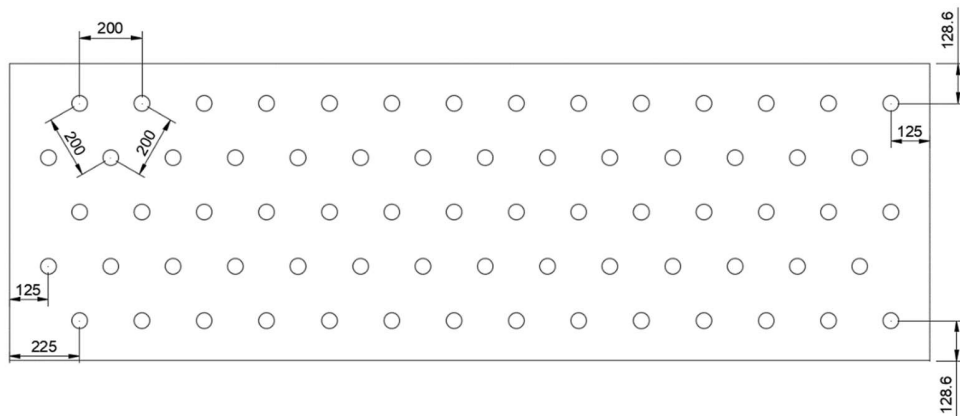
Ya que para los cultivos en cama convencional solo se usó una cama para ambas especies, se dividió el largo de la cama en dos para obtener el área correspondiente a cada cultivo. Teniendo en cuenta que entonces el largo de la cama convencional es de 3,5 m, para el cultivo de lechuga se calculó un total de 33 plantas, y para el cultivo de rábano 85 plantas.

En primer lugar, se hizo el modelo para las camas elevadas. Para el cultivo de lechuga la distribución se muestra en la figura 21.



*Figura 21.* Distribución de lechugas en camas de cultivo elevadas.

La distribución del rábano en las camas elevadas se muestra en la figura 22.

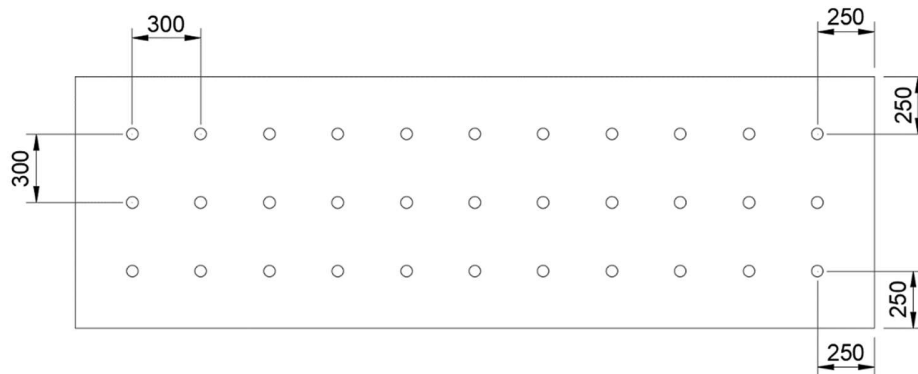


*Figura 22.* Distribución de rábanos en camas de cultivo elevadas.

Para la cama convencional se hizo un diagrama por aparte para cada especie, cabe recordar que ambas especies se ubicaron en una misma cama de cultivo.

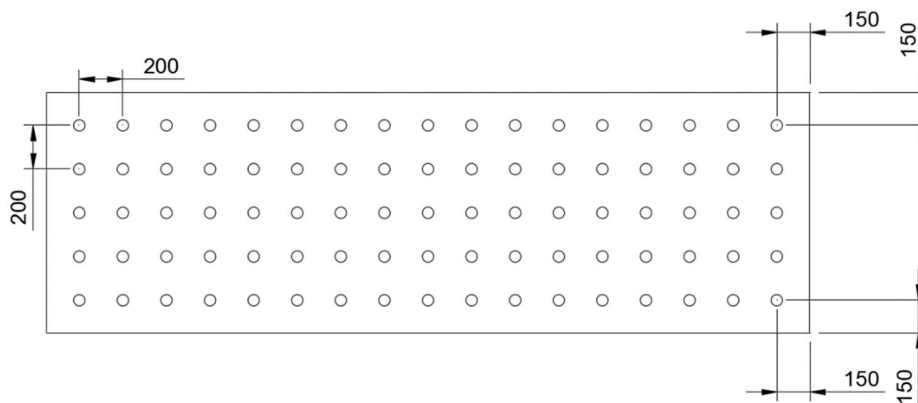


La distribución de lechuga en cama convencional se muestra en la figura 23.



*Figura 23.* Distribución de lechuga en cama convencional.

La distribución del rábano en cama convencional se muestra en la figura 24.



*Figura 24.* Distribución de rábano en cama convencional.

Con base en estos resultados se estableció el plan de manejo para el suelo de ambos cultivos. Se identificó que el nivel de pH debía aumentarse ya que la lechuga requiere un pH entre 6 y 7, y el rábano de 5,5 a 6,8. Para hacer esto aplicó cal al suelo teniendo en cuenta que se requieren 5 toneladas por cada hectárea. Es decir, para todas las camas de cultivo se usó un 1,5kg por cada una. Al hacer esto el pH del suelo aumentó a un valor de 6. También se identificó que el suelo cuenta con una textura tipo franco mediante el análisis de suelo, y que esta es apropiada para las especies que se van a cultivar.

Se calculó el requerimiento de Nitrógeno (N), Potasio (K) y Fósforo (P) con base en el área ocupada por cada planta. Esto se hizo para camas elevadas y convencionales.

En la revisión bibliográfica se encontró que los requerimientos nutricionales de la lechuga y el rábano son similares entre sí, y para algunos elementos son iguales, adicionalmente, la aplicación de fertilizantes comerciales no da el aporte nutricional exacto que necesita cada planta, ya que debido a las proporciones en que estos se preparan, no se puede coincidir con exactitud en todos los elementos. Con base en esto, el plan de fertilización se realizó de manera general para ambas especies.

A continuación, se presentan los cálculos realizados para hallar el valor de cada uno de los elementos (N,P,K) presentes en cada cultivo, con base en el área que corresponde a cada planta de ambas especies.

- **Nitrógeno (N)**

Requerimiento de Nitrógeno encontrado mediante bibliografía: 125 Kg/ha

**Requerimiento por cada planta de rábano**

Mediante la ecuación 5 se calculó el requerimiento de Nitrógeno por cada planta, multiplicando el área que necesita una planta de rábano ( $0,04\ m^2$ ) por el requerimiento del cultivo (125 kg) y se dividió entre una hectárea que equivale a  $10000\ m^2$ . Se obtuvo un valor de 0,0005 kg.

**Requerimiento por cada planta de lechuga**

Para la lechuga se realizó el mismo proceso que para el rábano, teniendo en cuenta que el área en este caso corresponde a  $0,09\ m^2$ , el valor obtenido fue de 0,001125 kg.

### **Peso del suelo en cada cajón**

$$m = \rho * v$$

$$m = 2,4 \text{ m}^3 * 1400 \text{ Kg/m}^3$$

$$m = 3360 \text{ Kg}$$

Partiendo de que el resultado entregado en el análisis de suelo está dado en porcentaje (0,78%) de materia orgánica, se encontró mediante revisión bibliográfica que este valor corresponde a 0,78 Kg de materia orgánica por cada 100 Kg de suelo (Mora, 2020), por lo que se realizó la siguiente regla de tres, tomando el peso del suelo dentro de cada cama para hallar el porcentaje de materia orgánica presente.

$$x = \frac{3360 \text{ Kg} * 0,78 \text{ Kg m.o}}{100 \text{ Kg}}$$

$$x = 26,21 \text{ Kg m.o}$$

Así mismo también se encontró que para hallar el nitrógeno total presente en suelo se debe calcular el 5% de la materia orgánica presente en este, y, a partir de ese valor, solo el 2% corresponde al nitrógeno disponible para las plantas (Mora,2020). Por lo que se realizaron los siguientes cálculos.

### **Cantidad de Nitrógeno presente en el suelo**

$$26,21 \text{ Kg} - - - \rightarrow 100\%$$

$$x - - - \rightarrow 5\%$$

$$x = \frac{5\% * 26,21 \text{ Kg}}{100\%}$$

$$x = 1,31 \text{ Kg de Nitrogeno Total}$$

$$1,31 \text{ Kg} \longrightarrow 100\%$$

$$x \longrightarrow 2\%$$

$$x = \frac{2 * 1,31 \text{ Kg}}{100}$$

$$x = 0,026 \text{ Kg N}$$

### **Fosforo (P)**

Requerimiento de fosforo encontrado mediante revisión bibliográfica: 50 Kg/ha

#### **Requerimiento por cada planta de rábano**

Mediante la ecuación 5 se calculó el requerimiento de Fosforo por cada planta, multiplicando el área que necesita una planta de rábano ( $0,04 \text{ m}^2$ ) por el requerimiento del cultivo ( $50 \text{ kg}$ ) y se dividió entre una hectárea que equivale a  $10000 \text{ m}^2$ . Se obtuvo un valor de  $0,0002 \text{ kg}$ .

#### **Requerimiento por cada planta de lechuga**

Para la lechuga se realizó el mismo proceso que para el rábano, teniendo en cuenta que el área en este caso corresponde a  $0,09 \text{ m}^2$ , el valor obtenido fue de  $0,00045 \text{ kg}$ .

#### **Cantidad de fosforo presente en el suelo**

Teniendo en cuenta que  $2,77 \text{ mg/Kg}$ , corresponde a la presencia de  $2,77 \text{ mg}$  de potasio en cada kilogramo de suelo, se realizó una regla de tres para hallar la cantidad de mg presentes en la totalidad del suelo.

$$x = \frac{3360 \text{ Kg} * 2,77 \text{ mg}}{1 \text{ Kg}}$$

$$x = 9307,2 \text{ mg}$$

$$x = \frac{9307,2}{1000000}$$

$$x = 0,09 \text{ Kg en } 6m^2$$

### **Potasio (k)**

Requerimiento de Potasio: 150 kg/ha

#### **Requerimiento por cada planta de rábano**

Mediante la ecuación 5 se calculó el requerimiento de Potasio por cada planta, multiplicando el área que necesita una planta de rábano (  $0,04 \text{ m}^2$ ) por el requerimiento del cultivo (150 kg) y entre una hectárea equivalente a  $10000 \text{ m}^2$ . Se obtuvo un valor de 0,0006 kg.

#### **Requerimiento por cada planta de lechuga**

Para la lechuga se realizó el mismo proceso que para el rábano, teniendo en cuenta que el área en este caso corresponde a  $0,09m^2$ . El valor obtenido fue de 0,0014 kg.

#### **Cantidad de potasio presente en el suelo**

$$x = \frac{6 \text{ m}^2 * 752,7 \text{ Kg}}{10000 \text{ m}^2}$$

$$x = 0,452Kg$$

Y, teniendo en cuenta que el potasio soluble e intercambiable corresponde solo el 2% del Potasio total, se obtuvo la siguiente cantidad de potasio disponible para la planta:

$$x = \frac{0,452 * 2}{100}$$

$$x = 0,09 \text{ Kg de K}$$

Mediante la ecuación 16 se convirtió todos los valores dados en unidades de kilogramos (kg) a unidades de gramos (g). Así mismo, usando la ecuación 17 se halló la cantidad faltante de cada elemento.

En la tabla 8, 9 y 10 se muestran todos los valores obtenidos para realizar el plan de fertilización.

Tabla 8

*Plan de fertilización Nitrógeno*

Plan de fertilización de Nitrógeno	Camas elevadas		Camas convencionales	
	Rábano	Lechuga	Rábano	Lechuga
Distancia entre plantas (m)	0,2000	0,3000	0,2000	0,3000
Requerimiento por cultivo (kg/ha)	125,00	125,00	125,00	125,00
Número de plantas	138,00	57,000	85,000	33,000
Área por cada planta (m <sup>2</sup> )	0,0400	0,0900	0,0400	0,0900
Requerimiento por planta (kg)	0,0005	0,0011	0,0005	0,0011
Requerimiento total por cama (kg)	0,0690	0,0641	0,0425	0,0371
Requerimiento total por cama (g)	69,000	64,130	42,500	37,130
Elemento presente en el suelo (g)	26,000	26,000	26,000	26,000
Elemento faltante en el suelo	43,000	38,130	16,500	11,130
Total, elemento faltante				27,630
En cama convencional				

Tabla 9

*Plan de fertilización Fosforo*

Plan de fertilización de Fosforo	Camas elevadas		Camas convencionales	
	Rábano	Lechuga	Rábano	Lechuga
Distancia entre plantas	0,2000	0,3000	0,2000	0,3000
Requerimiento por cultivo (kg/ha)	50,000	50,000	50,000	50,000
Número de plantas	138,00	57,000	85,000	33,000
Área por cada planta (m <sup>2</sup> )	0,0400	0,0900	0,0400	0,0900
Requerimiento por planta (kg)	0,0002	0,0004	0,0002	0,0004
Requerimiento total por cama (kg)	0,0267	0,0256	0,0170	0,0148
Requerimiento total por cama (g)	27,600	25,650	17,000	14,850
Elemento presente en el suelo (g)	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000
Elemento faltante en el suelo	18,600	16,650	8,0000	5,8500
Total, elemento faltante				13,850
En cama convencional				

Tabla 10

Plan de fertilización Potasio

Plan de fertilización de Potasio	Camas elevadas		Camas convencionales	
	Rábano	Lechuga	Rábano	Lechuga
Distancia entre plantas	0,2000	0,3000	0,2000	0,3000
Requerimiento por cultivo (kg/ha)	150,00	150,00	150,00	150,00
Número de plantas	138,00	57,000	85,000	33,000
Área por cada planta (m <sup>2</sup> )	0,0400	0,0900	0,0400	0,0900
Requerimiento por planta (kg)	0,0006	0,0014	0,0006	0,0014
Requerimiento total por cama (kg)	0,0828	0,0770	0,0510	0,0446
Requerimiento total por cama (g)	82,800	76,950	51,000	44,550
Elemento presente en el suelo (g)	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000
Elemento faltante en el suelo	73,800	67,950	42,000	35,550
Total, elemento faltante En cama convencional				77,550

### Aplicación de fertilizantes

Se escogieron los fertilizantes basados en los resultados obtenidos de la cantidad de elemento faltante para cada cultivo y por los valores de NPK que contenían los fertilizantes comerciales (Ingeniería Mora, 2020).

Tabla 11

Aplicación de fertilizantes camas elevadas

Aplicación de fertilizantes		
Camas elevadas	Fertilizante 9-12-36 (g)	Nutricrecer (g)
Cultivo de rábano	150	60
Cultivo de lechuga	138	60

Tabla 12

Aplicación de fertilizantes camas convencionales

Aplicación de fertilizantes		
Camas convencionales	Fertilizante 9-12-36 (g)	Nutricrecer (g)
Cultivo de lechuga y rábano	150	30

A continuación, se muestran las tablas con los aportes nutricionales que realizan los fertilizantes a cada cultivo.

Tabla 13

*Aporte nutricional cultivo de lechuga*

<b>Cultivo de lechuga</b>		<b>Aporte nutricional</b>	
Elementos	Fertilizante 9-12-36 (g)	Nutricrecer (g)	Total (g)
N	12,42	24,00	36,42
P	16,54	1,800	18,34
K	49,60	1,800	51,40

Tabla 14

*Aporte nutricional cultivo de rábano*

<b>Cultivo de rábano</b>		<b>Aporte nutricional</b>	
Elementos	Fertilizante 9-12-36 (g)	Nutricrecer	Total (g)
N	13,5	24	37,50
P	18	1,8	19,80
K	54	1,8	55,80

Tabla 15

*Aporte nutricional cama convencional*

<b>Cama convencional</b>		<b>Aporte nutricional</b>	
Elementos	Fertilizante 9-12-36 (g)	Nutricrecer (g)	Total (g)
N	13,50	12,00	25,50
P	18,00	0,90	18,90
K	54,00	0,90	54,90

De acuerdo con los valores obtenidos en cuanto al requerimiento de cada elemento por cultivo y lo aplicado por medio de los fertilizantes, se puede observar que, no se logró proporcionar puntualmente el requerimiento nutricional (NPK) en cada cultivo. Sin embargo, los



valores estuvieron muy cerca de lo ideal (100%). En promedio, se consiguió suplir el 95% del nitrógeno requerido por las plantas. En cuanto al fósforo, debido a los porcentajes de fertilizante utilizados, se aplicó entre un 6% y un 36% más de lo necesario. Por otro lado, el potasio fue el nutriente con menor porcentaje de aplicación, alcanzando un 75%. Lo que significa que se presenta en bajo porcentaje deficiencia de Potasio y exceso de Fosforo.

La deficiencia de potasio en las plantas provoca que en días secos estas se marchiten y que durante la etapa de crecimiento las hojas queden pequeñas. Otro síntoma que pueden presentar las plantas es la falta de turgencia (capacidad de elasticidad) que a su vez puede provocar estrés hídrico (Collage of agricultural sciences, s.f). Por otra parte, el exceso de fósforo afecta negativamente la absorción de Nitrógeno, hierro y Zinc por parte de las plantas (Roots, s.f). Sin embargo, se debe considerar que, el suelo también cuenta características como presencia de materia orgánica, lo cual puede permitir alcanzar un balance nutricional, por lo que las plantas no se verían afectadas por estos factores.

#### **8.4 Diseño del sistema de riego y monitoreo**

A continuación, se muestran los resultados de cada fase del diseño para los sistemas de riego automatizado y monitoreo de pH.

##### **8.4.1 *Diseño conceptual***

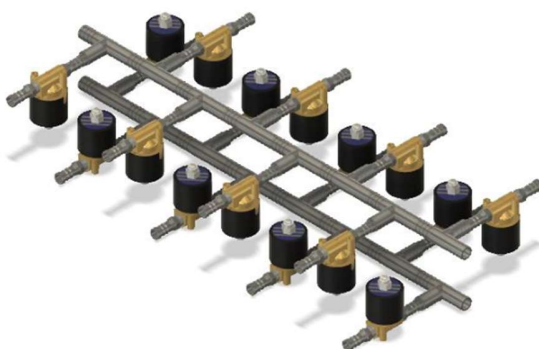
En esta sección se muestra el diseño conceptual con base a la información encontrada en cuanto a tipos de automatización, estructuras, sistemas de comunicación, etc., que podrían desarrollarse en el LEATYER.

##### **8.4.2 *Sistema de riego automatizado***

Se optó por hacer un rediseño de la caja de electroválvulas debido a que el diseño anterior no permitía acceder a su interior en caso de que fuera necesario hacer mantenimiento al sistema. Adicionalmente, se identificó que los componentes utilizados para realizar la tubería de las

válvulas presentaban fugas debido a la presión del agua, por lo cual se debía rehacer esta estructura.

Con base a la información anterior, inicialmente se planteó el rediseño de la tubería de las válvulas partiendo del diseño previamente establecido, el cual se muestra en la figura 25.



*Figura 25.* Diseño de electroválvulas anterior en el LEATYER; tomado de: "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" por K. Gutierrez y .Vargas,2018

Se decidió seguir el mismo patrón triangular, ya que este permite tener una mayor cantidad de válvulas en un menor espacio. Sin embargo, las que se encuentran ubicadas en la parte superior no se fijarían de forma invertida. En uno de los extremos se agregó una conexión entre las válvulas superiores e inferiores, con el fin de que el agua ingrese al sistema desde un solo punto. En el otro extremo, se cerró la tubería ya que no se conectaría ningún componente de ese lado y esto también brindaría soporte para las válvulas superiores. El modelo CAD y los planos de este rediseño en etapa conceptual se muestran en las figuras 26 y 27.

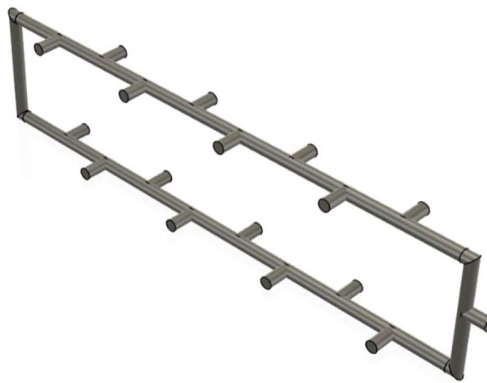


Figura 26. Modelo CAD del diseño conceptual de las electroválvulas.

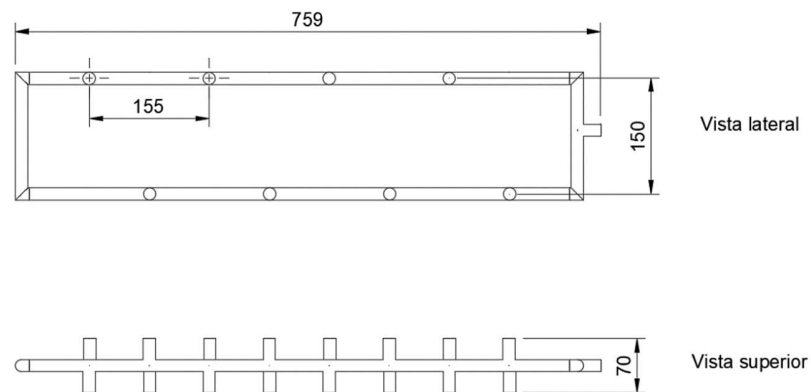


Figura 27. Planos del diseño conceptual de las electroválvulas.

Teniendo en cuenta estas dimensiones, además de las dimensiones de las electroválvulas, se planteó el diseño de la caja donde se ubicaría este sistema. En este diseño se pueden observar los orificios de salida para las mangueras de cada electroválvula, la tubería del cableado y la tubería de la fuente hídrica. En la figura 28 se muestra el modelo de la caja y cómo se ubicaría la tubería de las electroválvulas dentro de esta.



Figura 28. Diseño CAD de la caja de electroválvulas

En la figura 29, se muestran los planos de la caja.

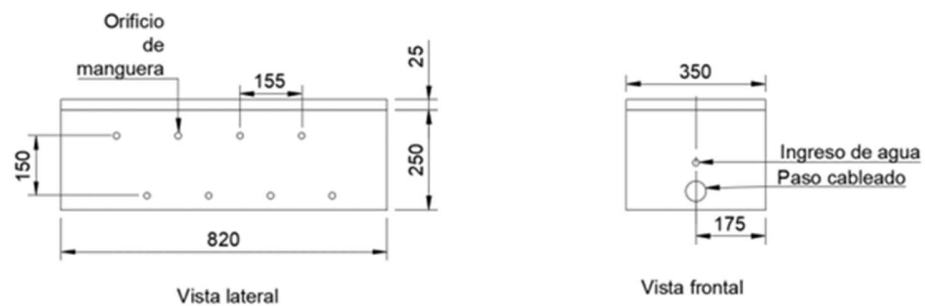


Figura 29. Planos de la caja de electroválvulas

Se determinó que la caja estaría ubicada en el suelo, en medio de las camas elevadas, teniendo en cuenta que allí se encuentra la fuente hídrica para el sistema. Las mangueras hacia las camas elevadas, y la tubería con el cableado se instalarían de forma subterránea, de tal forma que estos elementos no obstaculicen el paso peatonal en la zona. La caja de paso con el circuito se ubicaría en el mismo lugar donde se encuentra el regulador del panel solar y la batería de este que, ya que, allí se encuentra la fuente eléctrica proveniente del inversor y además provee una estructura donde esta se puede atornillar.

Para el funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta que se usaría la información adquirida por sensores de humedad para realimentar el sistema y así indicar cuando el riego

debe iniciar o detenerse, se planteó un sistema de lazo cerrado. Además, para enviar la información adquirida por los sensores y recibir las indicaciones necesarias para el proceso de automatización de riego, se decidió usar la conexión wifi utilizando un sistema IoT, con el fin de que estos datos también sean visualizados, se pueda tener el control de los parámetros de la automatización y se reciban notificaciones respecto al sistema desde una interfaz disponible a distancia. En la figura 31, se muestra el diseño conceptual del funcionamiento del riego automatizado.

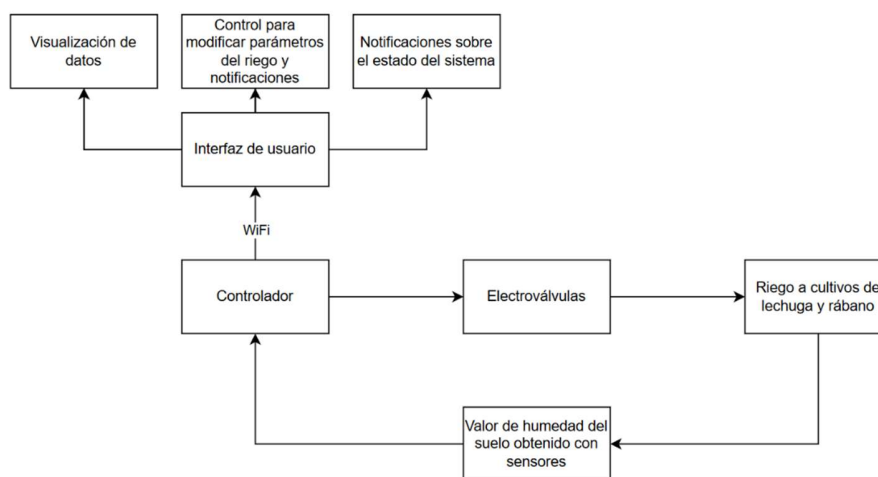


Figura 30. Diseño conceptual del sistema de riego.

#### 8.4.2.1 Sistema de monitoreo de agua

El monitoreo del pH se haría en el tanque de agua junto al domo de germinación debido a su mayor cercanía a fuentes eléctricas. Para esto se planteó el uso de un flotador con el fin mantener el sensor al mismo nivel del agua. Para el diseño conceptual del flotador inicialmente se obtuvo una medida aproximada del sensor para este proyecto teniendo en cuenta las dimensiones encontradas de diferentes sensores de pH. Con base a esto se realizó el diseño que se muestra en la figura 31 y 32.



Figura 31. Diseño CAD del flotador para el sensor de pH.

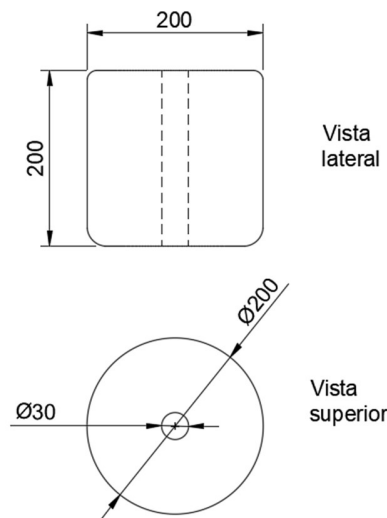
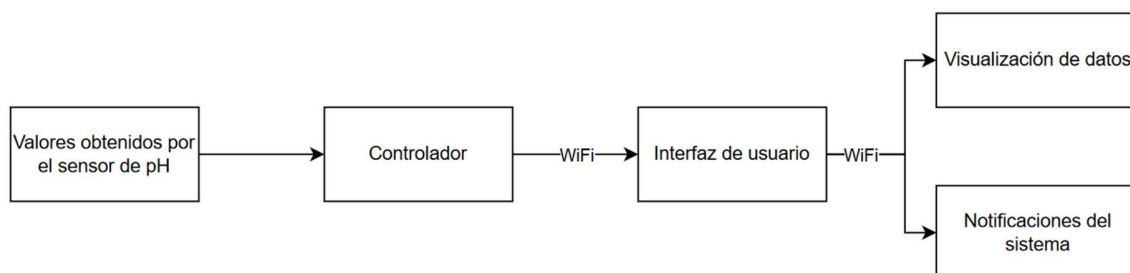


Figura 32. Planos diseño del flotador para sensor de pH.

En este diseño se propone que el sensor se introduzca en el orificio central, el cual se extiende hasta el otro extremo del objeto. El tamaño de este orificio, al tener el mismo diámetro del sensor, permitiría que este se sostenga dentro de la estructura. Además, gracias al diámetro del flotador este mantendría el equilibrio en el agua para que el sensor no se voltee o cambie su posición lo cual impediría hacer la lectura del pH.

Se decidió usar la conexión wifi junto con la tecnología IoT para la transmisión de datos hacia una interfaz donde estos puedan ser visualizados y que, a su vez, se puedan recibir alertas sobre el estado del sistema estando a distancia. El diseño conceptual del sistema de monitoreo de pH se muestra en la Figura 33.



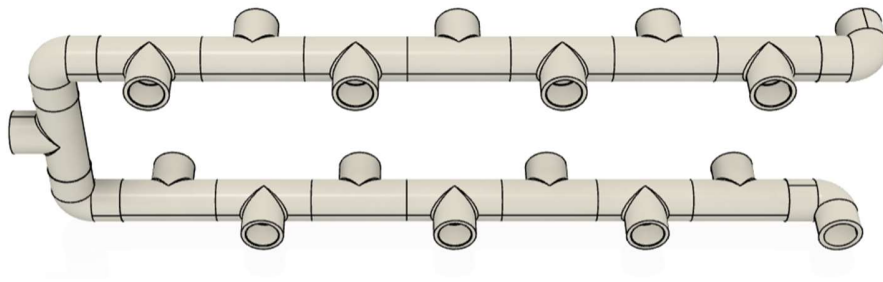
*Figura 33. Diseño conceptual del sistema de monitoreo de pH*

### **8.4.3 Diseño preliminar**

Los resultados del sistema preliminar de los sistemas de automatización de riego y monitoreo de pH se muestran a continuación

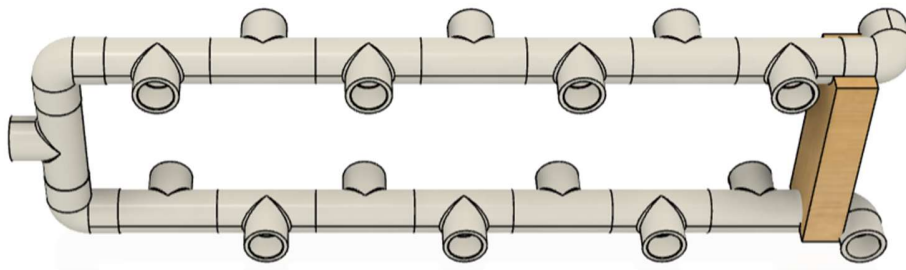
#### **8.4.3.1 Sistema de riego automatizado**

Se determinó que la tubería se haría con PVC, teniendo en cuenta que este material cuenta con acoples, tubos y adaptadores que permiten la unión a las válvulas, y a su vez, ya que estos componentes están diseñados para que al unirse con soldadura soporten presiones iguales y superiores a las del suministro hídrico en el laboratorio, su correcto ensamblaje garantiza que no habrá fugas en el sistema. Teniendo en cuenta el tamaño de las válvulas, se usaron tubos y acoples de 1/2" para hacer la tubería, ya que este es el tamaño más pequeño que se encuentra en el mercado. Partiendo del diseño conceptual, se realizó el modelo que se muestra en la figura 35 utilizando codos y tees del material seleccionado.



*Figura 34. Modelo CAD del diseño preliminar de la tubería PVC para el sistema de electroválvulas*

Ya que con acoples de PVC no era posible hacer el soporte entre las válvulas superiores e inferiores que se había planteado en el diseño conceptual, se decidió reemplazar esta estructura por un corte de madera adaptado al diámetro de las tuberías como se muestra en la figura 35.



*Figura 35. Modelo CAD del diseño preliminar del sistema de electroválvulas con el acople de madera.*

Los planos de este diseño se muestran en la figura 36.



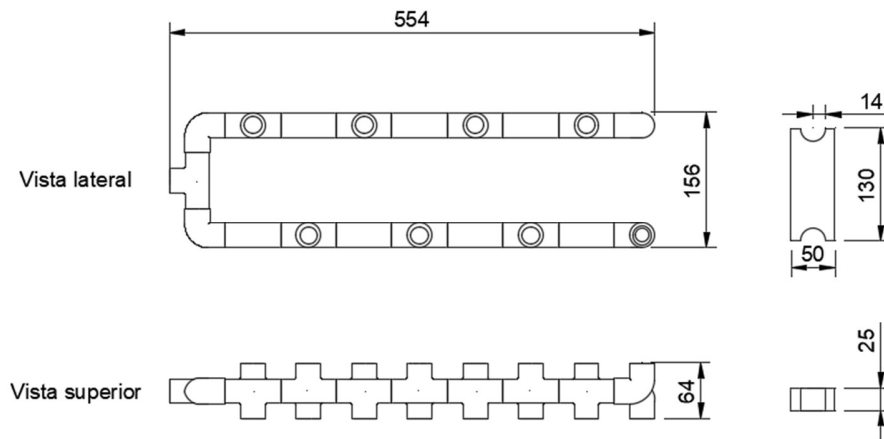


Figura 36. Planos del diseño preliminar del sistema de electroválvulas con el acople de madera.

Se seleccionó el diámetro de la tubería para el cableado teniendo en cuenta que se requería espacio suficiente para 37 cables, por lo que la tubería utilizada sería de 1".

Teniendo en cuenta la matriz de decisión de la tabla 6, se decidió utilizar la madera plástica para la construcción de la caja de electroválvulas. Esto debido a que el material cumple con las características necesarias para resistir a las condiciones ambientales del LEATYER y sus propiedades mecánicas son adecuadas teniendo en cuenta que, para esta estructura, no se deberá soportar ningún peso ya que su función es netamente de protección para las electroválvulas en el terreno establecido. Teniendo en cuenta las dimensiones de las tablas de madera plástica disponibles en el LEATYER, se diseñó la caja creando un modelo CAD de este como se muestra en la figura 37, junto con sus planos, en la figura 38.

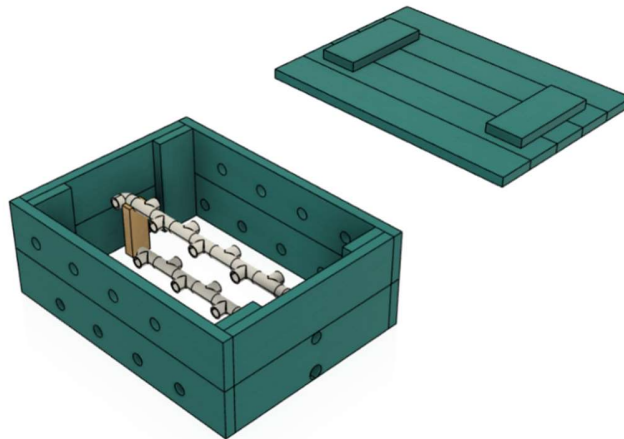


Figura 37. Modelo CAD del diseño preliminar de los orificios para el cableado e ingreso de mangueras.

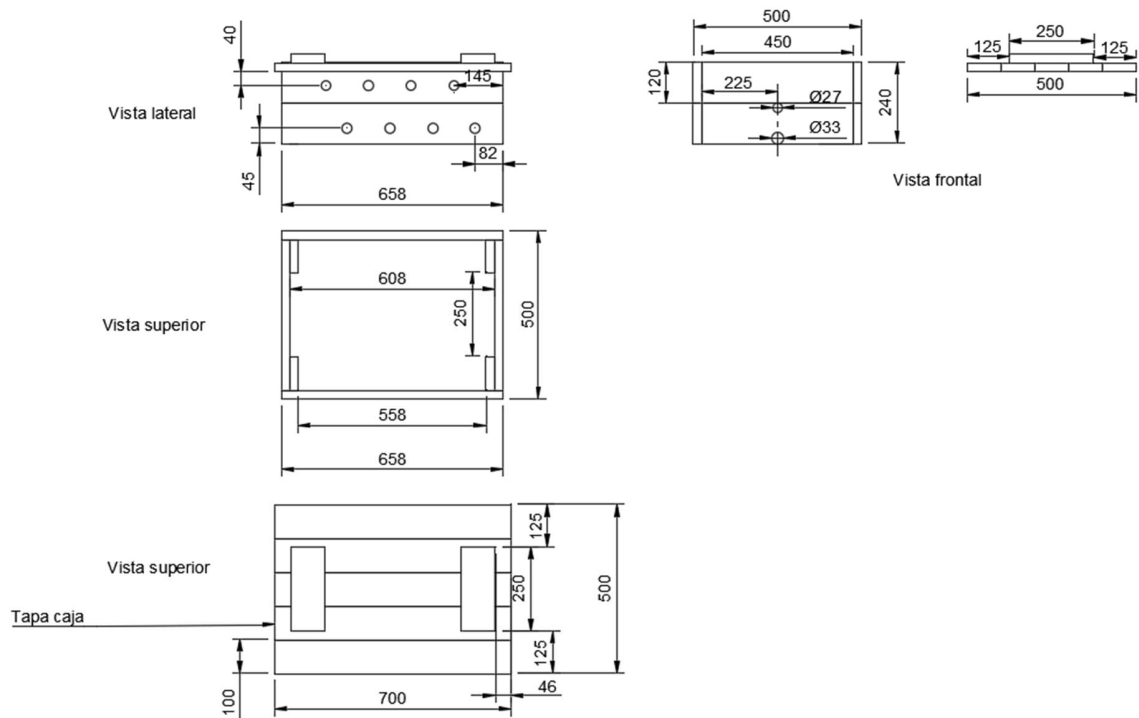


Figura 38. Planos del diseño preliminar de los orificios para el cableado e ingreso de mangueras.

En esta etapa del diseño se decidió utilizar una manguera de polietileno de 16mm para transportar el agua desde las válvulas hasta las camas elevadas, teniendo en cuenta la disponibilidad de adaptadores que permiten la unión de esta manguera a la tubería de las

válvulas, su resistencia a la presión del agua que hay en el laboratorio y su color negro, el cual va a prevenir el crecimiento de organismos en el agua, teniendo en cuenta que parte de esta manguera estaría expuesta a la luz solar.

Para completar el sistema de irrigación, los irrigadores por goteo comparados son: mangueras perforadas, mangueras micro porosas, goteros y mangueras individuales.

En cuanto a la versatilidad para diferentes cultivos se debe tener en cuenta que todos los sistemas mencionados, a excepción de la manguera micro porosa, deben ser modificados cada vez que se cambie la especie al cultivar ya que las perforaciones, goteros o mangueras individuales deben ubicarse sobre cada planta, y ya que diferentes especies deben distribuirse en arreglos distintos, sería necesario cambiar el sistema dependiendo de la especie. Esto también supone un mayor grado de dificultad para la instalación del montaje de los irrigadores, aunque se cabe resaltar que, para las mangueras perforadas, al no necesitar de más componentes se reduce su nivel de dificultad al momento de instalación. La manguera micro porosa tampoco requiere componentes adicionales para su instalación y funciona en cualquier cultivo ya que el agua se distribuye de manera uniforme a lo largo de toda la manguera.

En cuanto al ahorro del agua todos los sistemas, a excepción de las mangueras micro porosas, usan el agua únicamente sobre la planta que se va a regar, mientras que la micro porosa cubre filas completas, regando también el espacio entre las plantas lo que supone un gasto mayor de agua a comparación con los otros sistemas. Por último, se encontró que la manguera micro porosa tiene el costo más alto y además debe ser importada. Los goteros y mangueras individuales son los siguientes con mayor costo debido a la cantidad de elementos que se necesitan para construir un sistema de este tipo. El instrumento más económico son las mangueras perforadas.

En la tabla 16 se muestran los resultados de la matriz de decisión con base a los puntajes asignados según la información presentada anteriormente.

Tabla 16

Matriz de decisión para instrumento de riego

	<b>Manguera perforada</b>	<b>Manguera micro porosa</b>	<b>Goteros individuales</b>	<b>Mangueras individuales</b>
<b>Versatilidad para diferentes cultivos</b>	4	5	4	4
<b>Ahorro de agua</b>	5	4	5	5
<b>Facilidad de manejo para el usuario</b>	4	5	3	3
<b>Costo</b>	5	3	4	4
<b>Total</b>	16	17	15	16

Ya que la manguera micro porosa obtuvo el mayor puntaje, este fue el instrumento seleccionado para realizar el riego de los cultivos.

Teniendo en cuenta la recomendación de proveedores de este producto, se decidió ubicar las mangueras con una distancia de 30 cm entre sí teniendo en cuenta el tipo de cultivos que se realizarán en las camas elevadas y la textura del suelo que se requiere para su crecimiento (Swan Products LLC, 2022). Esto garantiza el desplazamiento del agua en el suelo de tal forma que esta cubra la totalidad de la superficie de las camas elevadas, teniendo en cuenta que el agua se extenderá aproximadamente 15cm hacia ambos lados desde el punto de irrigación. La

distribución de las mangueras se hizo buscando que cada manguera tuviera la longitud de cada fila, en vez de usar la manguera completa ubicándola en un patrón serpenteante para así evitar la pérdida de presión del agua como se muestra en la Figura 40.



Figura 39. Ubicación de mangueras dentro de la cama de cultivo.

Nota. Las medidas que se muestran en el diagrama están en mm.

A continuación, se presenta la simulación donde se verifica el correcto funcionamiento del sistema de distribución del agua desde las electroválvulas. En la aplicación se especificó la distancia desde el tanque de suministro de agua hasta las electroválvulas, y la distancia que hay entre estas en el sistema de tubería.

De igual manera, a partir de la presión, caudal, distancias, coeficiente de rugosidad y coeficiente de pérdidas menores de los accesorios de la red de tubería, el programa analizó si la presión final en cada punto del sistema de riego era suficiente para la distribución del agua. Según Carlos Felipe Granados en su trabajo de grado titulado “Estimación de coeficientes de pérdidas menores (localizadas) de energía por unidad de longitud y por diámetros de las tuberías típicas de redes colombianas, para ser utilizados en procesos de diseño optimizado y/o calibración”, los coeficientes de pérdidas menores por cada conector de tubería PVC de  $\frac{1}{2}$ " están establecidas de la siguiente manera: Codo de  $90^\circ = 1,5 K_m$ , tee =  $0,3 K_m$ , y electroválvula =  $0,2 K_m$ . El coeficiente de pérdidas menores depende de la cantidad de accesorios, el tipo de accesorio,

el diámetro de este y el flujo. Muchos diseñadores ignoran estos valores, ya que en algunos casos son irrelevantes si se comparan con las pérdidas por fricción. Sin embargo, al no ser un sistema de red a una escala industrial, para este trabajo de grado se ejecutó dentro de la simulación.

Para la simulación con 16 electroválvulas abiertas, los resultados de la simulación se muestran en la figura 41.

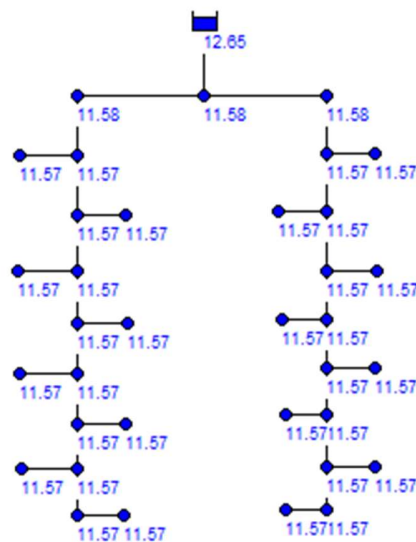
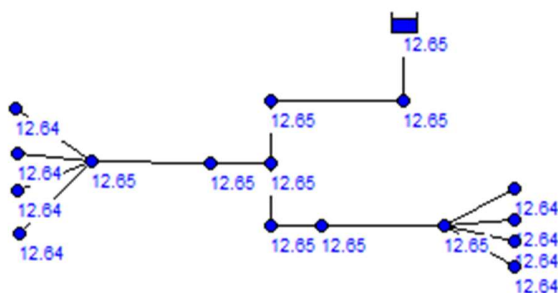


Figura 40. Simulación de la distribución de agua

El coeficiente de rugosidad para PVC según la ecuación de Darcy- Weisbach que relaciona la pérdida de energía dada por la carga hidráulica de acuerdo con la fricción a lo largo de la tubería determinada por la simulación corresponde a 0,0015.

Se evidencia que la pérdida de presión es de 1,08 Mca según los parámetros establecidos anteriormente, lo que corresponde al 8,6 % de la presión inicial. Con esta disminución, la presión continúa siendo positiva en cada electroválvula, lo cual representa que no habrá inconvenientes en la distribución del agua hacia las mangueras micro porosas, aun cuando todas las electroválvulas se encuentren abiertas.

En la figura 42 se muestra el resultado de la simulación de las dos electroválvulas junto con las mangueras micro porosas que se usarían para las camas elevadas.



*Figura 41.* Simulación de la distribución de agua con solo dos electroválvulas abiertas.

Se evidencia que al activar solo dos electroválvulas se genera una disminución de 0.01Mca (metros columna de agua) en la presión, lo que corresponde a una disminución del 0,08% de la presión inicial. Con esta disminución el valor de la presión del agua en los extremos de las mangueras continúa siendo positivo, lo cual demuestra que el agua se distribuirá correctamente a lo largo de las mangueras micro porosas.

Estas simulaciones permiten verificar que la estructura planteada para la tubería de las electroválvulas, junto con los irrigadores seleccionados para las camas elevadas, permiten una correcta distribución del agua teniendo en cuenta la presión de esta en el LEATYER. Adicionalmente, se comprueba que para el momento en que se implementen las demás electroválvulas del sistema a futuro, el sistema no presentará inconvenientes ocasionados por pérdidas de presión.

Para los sensores de humedad con los que se obtendría la información necesaria para iniciar o detener el riego, se encontró que aquellos de contenido volumétrico de agua, o de tensión de agua más utilizados y accesibles dentro del presupuesto del proyecto son los capacitivos y los resistivos. Para seleccionar que tipo de sensor se usaría se tuvo en cuenta que

los sensores resistivos están hechos de materiales que con el tiempo presentarían daños por oxidación ya que están expuestos a la humedad, por otra parte, los sensores capacitivos están aislados del suelo evitando el contacto de sus componentes con elementos que puedan dañarlos (Jamshedji, 2022).

El daño de los electrodos en los sensores afectaría la lectura que hacen de la variable de humedad, por lo cual esta va a ser incorrecta, y al ocurrir esto, ya que el riego depende del porcentaje de humedad leído, este no se haría en los momentos adecuados por lo que se afectaría negativamente el desarrollo de las plantas. Por esta razón, se seleccionaron los sensores capacitivos, ya que su tiempo de vida útil es mayor y sus lecturas serán más precisas. La referencia de sensor de humedad de suelo capacitivo que se puede adquirir en Colombia es el Gikfun EK1940. Este es compatible con el controlador seleccionado y cumple con los requerimientos mencionados para el sensor, ya que su porcentaje de error es de 1% (Indiamart, 2023) y puede ser calibrado para medir el porcentaje de humedad en el suelo según el voltaje obtenido con diferentes volúmenes de agua en el suelo.

De forma preliminar se estableció que como mínimo el sistema contaría con dos sensores de humedad, teniendo en cuenta que se iban a desarrollar dos cultivos distintos. En cuanto a las electroválvulas, ya que se busca que cada una riegue un cultivo del LEATYER, se usarían dos para este sistema de riego.

Los controladores encontrados junto con las características que se evaluaron son:

- **Arduino UNO Wi-Fi**

Tiene 14 pines digitales que funcionan como entrada o salida que brindan un voltaje de 5V y 6 pines de entrada analógicos con voltaje de 5V y resolución de 10 bits. Cuenta con un módulo ESP8266 Wi-Fi integrado, lo que le permite conectarse a redes wifi (Arduino, 2022). Se puede alimentar conectándose al computador con cable USB o a otras fuentes de alimentación con el



uso de adaptadores, funciona con voltajes desde 6V hasta 20V (Arduino, 2022). Su frecuencia de reloj de 16Mhz y la velocidad del es wifi de hasta 72,2 Mbps ya que tiene un módulo Esp8266 integrado (Fernández, 2019). La versión arduino UNO Wi-Fi Rev. 2 se consigue en su versión original a \$278.000 COP, mientras que la versión UNO Wi-Fi descontinuada por Arduino se consigue a \$52.000 COP (Arduino, 2022).

- **Arduino WiFi shield**

Permite usar controladores Arduino que no cuentan con wifi originalmente agregando este tipo de conexión inalámbrica (Arduino, 2022). Al incorporarse con un Arduino este funciona como de costumbre teniendo en cuenta que no se debe usar el pin digital número 7 ya que es el que hace la conexión entre las placas (Arduino, 2022). Es Compatible con: Arduino Uno R3, Mega 2560, Leonardo y derivados (Arduino, 2022). La frecuencia de reloj depende del controlador al que se conecte y no se encuentra la velocidad específica de su conexión wifi. Se encuentra a \$22.000 COP, pero se debe tener en cuenta que hay que comprar tanto la placa como el controlador para que este funcione (Arduino, 2022).

- **ESP32**

Permite utilizar conexión wifi y bluetooth. Tiene 6 pines GPIO disponibles cuando se usa la función wifi para entradas análogas y 9 pines GPIO disponibles como pines digitales al usar wifi (Last Minute Engineers, 2022). Su frecuencia de reloj de 160 a 240Mhz (Teja, 2021) y la velocidad del wifi es de hasta 150 Mbps (*ESP-IDF programming guide v5.0.1 documentation*, 2022), Se encuentra con un valor alrededor de \$30.000 COP.

- **ESP8266**

Es un controlador con conexión wifi, tiene 1 pin analógico y 11 pines digitales de entrada tipo pull up y 1 pin digital de entrada tipo pull down. Tiene 6 pines digitales de salida. Su Frecuencia de reloj de 80 Mhz (ESP8266 Arduino interface, 2017) Y la velocidad de wifi de hasta 72,2 Mbps (Alzate, 2019). Se encuentra en un rango de precio entre \$20.000 y \$30.000 COP (Llamas, 2018).

Los puntajes signados según la información presentada anteriormente junto con el puntaje total para cada controlador se muestran en la tabla 17.

*Tabla 17*

*Matriz de decisión para controlador*

	<b>Arduino UNO wifi</b>	<b>Arduino wifi shield</b>	<b>ESP32</b>	<b>ESP8266</b>
<b>Cantidad de pines análogos/ digitales</b>	5	5	5	0
<b>Velocidad de conexión wifi</b>	4	0	5	4
<b>Velocidad del procesador</b>	3	3	5	4
<b>Costo</b>	1	2	4	5
<b>Total</b>	13	10	19	13

Ya que el puntaje mayor fue obtenido por el ESP32 este sería el controlador utilizado para el sistema de control del riego.

Finalmente, la totalidad de los componentes electrónicos identificados para llevar a cabo el desarrollo de la automatización fueron:

- Controlador ESP32 Devkit V1
- Sensores de humedad de suelo Gikfun EK1940
- Relés JQC-3F-5VDC
- Electroválvulas 2W-025-08 (tomadas del sistema de riego establecido previamente)
- Fuente de alimentación para el controlador
- Fuente de alimentación para las electroválvulas

Teniendo en cuenta que, aunque los componentes seleccionados pueden encontrarse en softwares de diseño o simulación electrónica, las referencias en estos programas son diferentes a las mencionadas anteriormente, por lo cual una simulación no demostraría el comportamiento real del circuito o los componentes de este proyecto. Por esta razón, el consumo de corriente de cada componente se identificó en su respectiva ficha técnica. El consumo de corriente según la cantidad de componentes necesarios para construir el sistema se muestra en la tabla 18.

Tabla 18

*Consumo de corriente del sistema*

Elemento	Gasto de corriente c/u	Unidades	Gasto de corriente total
<b>Controlador ESP32</b>	128mA	1	128mA
<b>Sensor de humedad</b>	5mA	2	10mA
<b>Electroválvulas</b>	180mA	16	2880mA
<b>Relé</b>	2mA	16	32mA
<b>Total</b>			3050mA

El consumo total de corriente que se muestra en la tabla 18, solo se da cuando todas las electroválvulas se encuentran encendidas al tiempo. Ya que para este proyecto solo se usarán 2 de las 16 electroválvulas y relés, el consumo de corriente será 502mA. Teniendo en cuenta que el circuito estaría conectado a una fuente de 110V AC, la cual puede ser el inversor de los paneles solares o la fuente de servicio público de energía eléctrica, la potencia eléctrica para el sistema con todas las electroválvulas encendidas corresponde a 335,5W y para el uso de dos electroválvulas la potencia corresponde a 55,22W. Ya que del inversor instalado ofrece potencia de 1500W, este podrá ser la fuente de alimentación cuando se repare el sistema de energía solar del LEATYER. Ya que la fuente de energía disponible durante el desarrollo de este proyecto proviene del servicio de Enel, la potencia del circuito no representará un inconveniente.

Con base a lo anterior se diseñó el circuito para el funcionamiento del sistema de riego automatizado. Su diagrama se muestra en la figura 43.

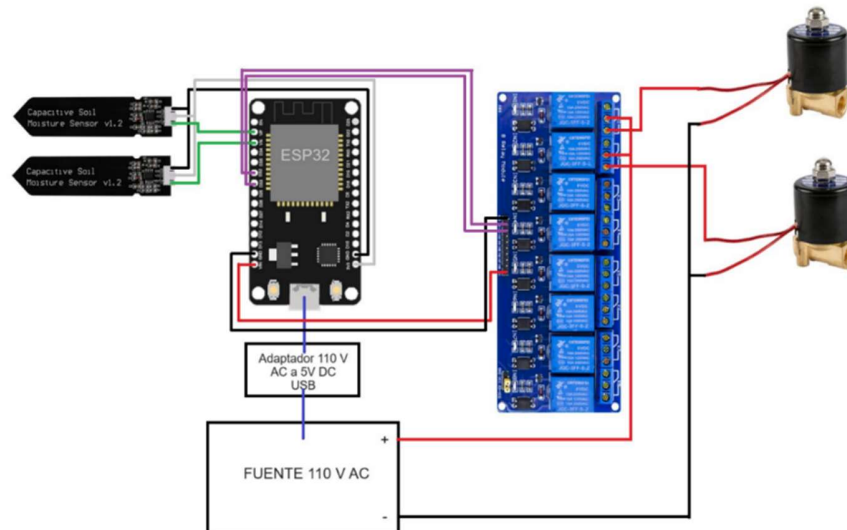


Figura 42. Diagrama de circuito para control de riego

Nota: imágenes de referencia recuperadas de: (Amazon, 2023) para sensores de humedad del suelo, (Bilbao Electronics, 2023) para rack de relés de 8 canales, (Xingsheng, 2023) para electroválvulas, (Wokwi, 2023) para controlador ESP32.

En caso de que se busque escalar el sistema añadiendo dispositivos electrónicos al circuito, se debe tener en cuenta que el valor máximo de corriente que puede proveer el controlador seleccionado es de 1200mA, considerando la recomendación del fabricante de usar una fuente de alimentación que suministre 0,5 A al controlador (Espressif Systems, 2023). Es importante resaltar que el adaptador de 110 V AC a 5 V DC USB seleccionado para este proyecto suministraría 0,2 A al controlador.

Para el desarrollo de la interfaz de usuario, las plataformas que podrían ser utilizadas se muestran a continuación:

- Blynk: es un software que permite crear aplicaciones IoT (internet of things) para automatizaciones, alertas, monitoreo, control remoto, etc. utilizando alrededor de 10 líneas de código para conectar sensores u otros tipos de hardware a la plataforma. El resto de las funciones para la aplicación se crean a partir de un editor de “arrastrar y soltar” (Blynk , 2023). Dependiendo de las funciones que se vayan a crear con Blynk, su uso puede ser gratis, o puede ser necesario pagar mensualidades que van desde \$6,99 USD hasta \$599 USD (Blynk, 2023).

- Arduino IoT: Es una plataforma que permite la creación de proyectos IoT mediante una interfaz en la que se pueden crear distintas configuraciones, códigos, carga de datos y visualización de los mismos. Entre las características con las que cuenta esta plataforma están el monitoreo de datos, sincronización de variables, programador de tareas, cargas OTA, webhooks, soporte con Amazon Alexa y el uso compartido de los tableros creados (Arduino, 2023). El uso de Arduino IoT, dependiendo de los requerimientos para los proyectos que se crearán, puede ser gratis o tener el costo de una mensualidad entre \$1,99 y \$19,99 USD (Arduino, 2023).

- ThingSpeak: Es una plataforma IoT que permite el análisis y visualización de datos obtenidos en vivo además de controlar acciones que se requieran para el sistema. Es gratuito para proyectos no comerciales donde se reciban menos de 3 millones de mensajes al año. Para proyectos más grandes hay varias opciones de licencias que se pueden comprar (MathWorks, 2023).

- LabView: Es un entorno de programación donde esta se realiza gráficamente. Aquí se tienen diferentes funciones como la adquisición de datos, control de instrumentación, monitoreo, interacción con el sistema, uso de otros lenguajes de programación en caso de ser necesario, acceso al sistema de manera remota, automatización de secuencias de pruebas, entre otros (National Instruments Corp, 2023). Aunque para usar este software se necesita comprar una de sus licencias, este costo no se tendría en cuenta ya que la universidad otorga una licencia estudiantil para el uso del programa.

Tanto Blynk como LabVIEW cuentan con widgets que brindan un espacio para que el usuario haga modificaciones en los parámetros de la interfaz. Por otra parte, Arduino IoT y ThingSpeak solo cumplen con la finalidad de que el usuario visualice el estado del sistema. Todos los programas, a excepción de LabVIEW, conceden el permiso de compartir la interfaz entre varios usuarios y permiten su visualización a distancia. ThingSpeak cuenta con una aplicación móvil para este fin, sin embargo, se reportan fallas en la actualización de datos y visualización de los diagramas, indicadores, etc. Al comparar el costo de cada aplicación, tanto Thingspeak como LabVIEW son servicios gratuitos para el desarrollo de este proyecto. Teniendo en cuenta

la cantidad de widgets que se deben utilizar para el desarrollo de la interfaz, tanto para Blynk como para Arduino IoT se debe pagar un plan mensual, siendo el plan de Arduino IoT es más económico que el de Blynk.

El puntaje asignado a cada plataforma según las características mencionadas anteriormente se muestra en la tabla 19.

*Tabla 19*

*Matriz de decisión para programación e interfaz del sistema*

	<b>Blynk</b>	<b>Arduino IoT</b>	<b>ThingSpeak</b>	<b>LabVIEW</b>
<b>Posibilidad de modificación de parámetros por el usuario</b>	5	1	1	5
<b>Visualización para varias personas</b>	5	5	5	1
<b>Visualización a distancia</b>	5	5	4	1
<b>Costo</b>	3	4	5	5
<b>Total</b>	18	15	15	12

Ya que Blynk fue la plataforma con mayor puntaje, esta sería la utilizada para el desarrollo de la interfaz de usuario.

#### **8.4.3.2 Sistema de monitoreo de pH**

El diseño preliminar del flotador se hizo a partir de flotadores tubulares que se encuentran en el mercado. Esto debido a que poseen una forma que puede ser adaptada para ajustarse de tal forma que creen una estructura como la planteada en el diseño conceptual, su costo es bajo y no corre el riesgo de perder el aire ya sea por daños en el material, sistema de cierre defectuoso u otras razones como puede ocurrir con flotadores inflables.

El diseño del flotador, realizado con base al diseño conceptual del mismo, las medidas de los flotadores tubulares estándar, y las medidas estimadas del sensor, se muestra en la figura 44. En esta estructura se busca introducir el sensor en el orificio central del flotador. Ya que al evaluar esta opción se encontró que el diámetro de esta estructura por sí sola no permitiría que el sensor se mantenga en posición vertical al estar dentro del agua, se añadió un flotador que la envuelve en la parte inferior, aumentando así el diámetro total.



*Figura 43. Planos del diseño del flotador para sensor de pH.*

Los planos de este diseño se muestran en la figura 45.



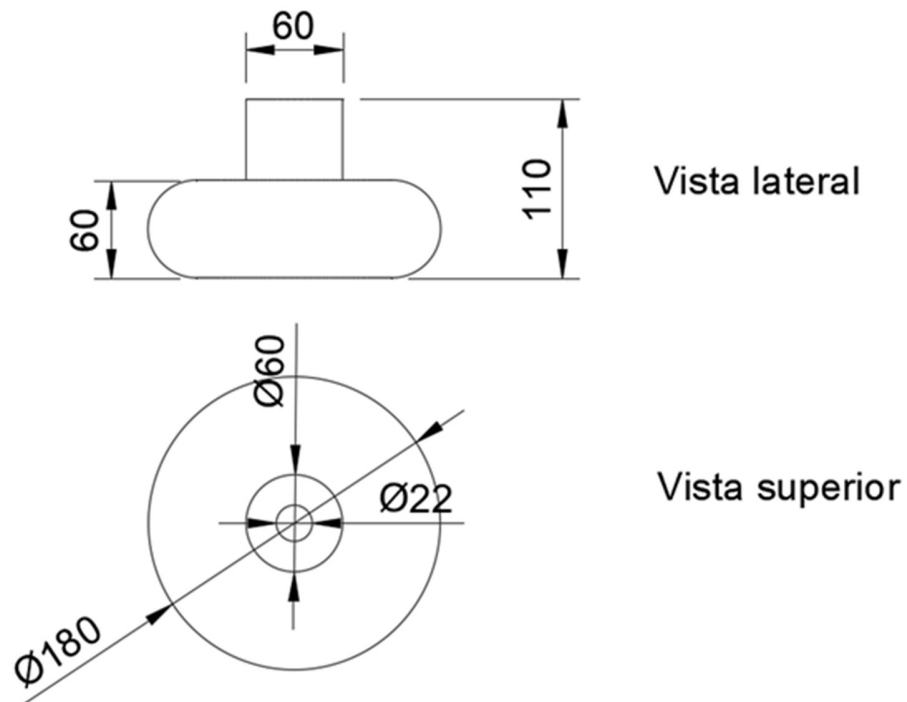


Figura 44. Modelo CAD del diseño del flotador para sensor de pH.

Para el monitoreo, el sensor disponible en el laboratorio era de la referencia HAOSHI H-101. Entre sus especificaciones están: rango de lectura de pH entre 0-14 y porcentaje de error de 1%. Esta información permite verificar que cumple con los requerimientos establecidos para el sensor y que por ende puede usarse para este proyecto.

En cuanto al controlador, en la matriz asociada a su selección (tabla 17) para el sistema de monitoreo de pH, únicamente cambia el puntaje asignado a la cantidad de pines analógicos/digitales, reajustando la calificación de este criterio con un puntaje de 5 para el ESP8266 ya que, al usar un solo sensor, el único pin analógico de este controlador es suficiente. Sin embargo, en el puntaje total de la matriz, el ESP32 se mantiene con el valor más alto por lo que sería el controlador utilizado para este sistema. También se usaría la misma plataforma para

desarrollar la interfaz de usuario seleccionada para el sistema automatizado ya que los criterios se evalúan de la misma manera para el sistema de monitoreo.

El consumo de corriente de cada componente, identificado en sus respectivas fichas técnicas, y el valor total del consumo de corriente del sistema se muestra en la tabla 20.

*Tabla 20*

*Consumo de energía del controlador y sensor de pH*

<b>Elemento</b>	<b>Gasto de corriente c/u</b>	<b>Unidades</b>	<b>Gasto de corriente total</b>
<b>Controlador ESP32</b>	120mA	1	120mA
<b>Sensor de pH</b>	40mA	1	40mA
<b>Total</b>			160mA

Ya que para este sistema se necesita una fuente DC, teniendo en cuenta la ubicación del tanque de agua y su cercanía al domo de energías, se puede conectar al regulador de 24V, el cual tiene disponibilidad de hasta 100A, es decir, tiene una potencia de 2400W. Para esta fuente de energía la potencia requerida corresponde a 3,84 W, por lo cual es posible hacer la conexión del sistema a esta fuente de alimentación. Sin embargo, ya que durante el desarrollo de este proyecto el sistema de energía solar no estaba en funcionamiento, se optó por alimentar el sistema mediante el servicio de energía Enel a 110V AC, utilizando un adaptador de 110V AC a 5V DC USB. Con esta fuente de energía la potencia del sistema corresponde a 17,6 W lo cual no representa un inconveniente.

Se realizó el diagrama del circuito teniendo en cuenta todos los elementos necesarios para su funcionamiento como se muestra en la figura 46.



Figura 45. Diagrama del circuito para el sistema de monitoreo. imágenes de referencia recuperadas de: sensor de pH (Botland, 2023), controlador ESP8266 (Suconel, 2022)

#### 8.4.4 Diseño detallado

A continuación, se muestra el resultado de la selección de subcomponentes electrónicos, hidráulicos y mecánicos necesarios para la implementación de los sistemas de riego y monitoreo planteados en el diseño preliminar.

##### 8.4.4.1 Sistema de riego

Se identificó que el tipo de tornillo que se debe utilizar para mantener unida la estructura de la caja de válvulas es de 2x8". En los planos que se adjuntan como **Anexo4\_Planos caja electroválvulas**, se muestra el diseño detallado de la caja, donde se muestra la ubicación de los tornillos en la estructura, lo cual permitirá hacer una implementación más eficiente de la misma. Adicionalmente se decidió usar silicona para evitar el paso del agua hacia el interior de la caja a través de su tapa con el fin de prevenir daños en las electroválvulas. También se optó por poner plástico de tipo invernadero calibre 6 como fondo de la caja, con el fin de prevenir el contacto de las electroválvulas con la humedad del suelo donde estas se ubican.

Para poder desarrollar el sistema de tubería propuesto en el diseño preliminar, se identificó que era necesario utilizar tees, codos, y tubo PVC de  $\frac{1}{2}$ ". Estos elementos deben soldarse entre sí para prevenir fugas o daños en la estructura debido a la presión del agua. Para unir las electroválvulas al sistema es necesario utilizar racores de  $\frac{1}{4}$ " a  $\frac{1}{2}$ " macho-macho, y para conectar las electroválvulas a la manguera seleccionada en el diseño preliminar, es necesario el uso de los componentes enlistados a continuación:

- Manguera de 8mm
- Adaptador de tubo a manguera  $\frac{1}{2}$ " a 16mm
- Adaptador hembra PVC  $\frac{1}{2}$ " por  $\frac{1}{2}$ "
- Conector de  $\frac{1}{4}$ " a 6 mm para riego
- Buje roscado PVC de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{1}{4}$ "

Estos componentes son los que permitirían hacer la unión de todo el sistema de electroválvulas garantizando que no habrá escapes de agua en el sistema.

Adicionalmente, para hacer el recorrido subterráneo de la manguera desde las electroválvulas hasta las camas elevadas es necesario utilizar 3 codos de 16mm teniendo en cuenta que este es el diámetro de la manguera seleccionada en el diseño preliminar.

Para establecer la distribución de los sensores se identificó que en la ficha técnica de estos no se establece un rango de medición. Esto se debe a que el valor de humedad del suelo se obtiene al hallar la capacidad de carga del capacitor dependiendo del lugar donde se ubique el sensor (Hrisko, 2020). Con base al principio de funcionamiento de los sensores de humedad, se encontró que, para obtener una lectura que represente el contenido de agua en el suelo de un espacio determinado, se recomienda tener en cuenta variaciones en la textura, diferencia en pendientes, entre otros, y se busca ubicar a los sensores en las áreas que presenten mayor

heterogeneidad. Mientras en área mantenga las mismas características, el valor leído por el sensor va a ser representativo para ese espacio (Meter group, 2022).

En las camas elevadas la textura, la exposición solar, y la pendiente de la estructura se mantiene igual. Sin embargo, al observar el funcionamiento de mangueras micro porosas se notó que la salida del agua, al inicio del riego, no es uniforme a lo largo de la manguera, sino que el agua sale desde el extremo más cercano a las válvulas y tarda unos segundos en llegar al final. Por esta razón, en un tiempo determinado, puede haber mayor humedad de ese lado del cultivo mientras que al otro extremo la humedad será menor. Con base a esto se decidió utilizar dos sensores de humedad por cultivo, al inicio y al final del sistema de irrigación, y promediar los porcentajes obtenidos para así tener un valor que indique la generalidad de la humedad en el suelo. Además, teniendo en cuenta la ubicación de las mangueras micro porosas que se muestra en la figura 47, se decidió ubicar los sensores en medio de dos mangueras, ya que ahí es el punto en donde más tarda en llegar el agua. Si se ubicaran junto con las mangueras, el valor de humedad leído sería mayor al valor que hay entre las mangueras, donde puede haber plantas que no obtendrán la irrigación adecuada para su desarrollo ya que el riego podría desactivarse antes de que se alcance la humedad requerida en este espacio.

Con base a lo anterior, el diseño preliminar del circuito se debe modificar agregando dos sensores más. Esto se representa en el diagrama de la figura 47.

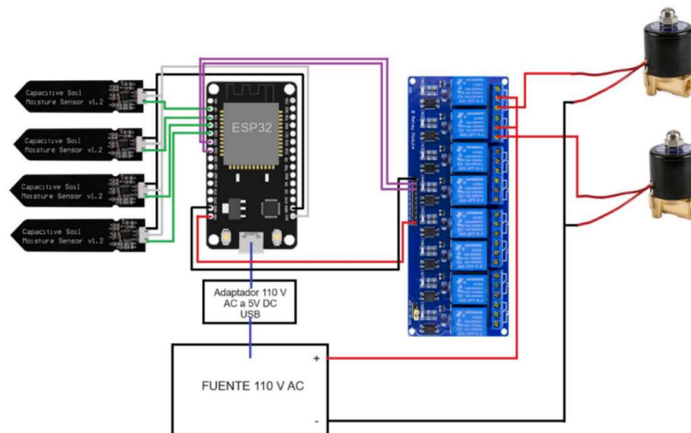


Figura 46. Diseño detallado del circuito para sistema de riego automatizado.

Agregar estos sensores al sistema aumenta el consumo de corriente de 502mA a 512mA, con lo cual la potencia del circuito cambia a 56,32 W, lo cual no representa inconvenientes al hacer la conexión del circuito a las fuentes de alimentación.

Para el cableado se identificó que la distancia para los sensores más lejanos desde la caja de paso sería de 12 m y para los más cercanos, 6 m. Con base a esto se definió el uso del cable tipo 3x18 AWG, teniendo en cuenta que su resistencia permitía conducir el voltaje sin afectar la medición de los sensores. Para las electroválvulas, cada cable debía medir aproximadamente 1,5 m para llegar a la caja de paso. Para esto se seleccionó un cable de 20 AWG.

Para conectar los sensores de humedad, teniendo en cuenta que el cableado tiene un diámetro que no es compatible con los pines del controlador, o con regletas de pines, sería necesario conectar estos cables a un lado de una bornera, y al otro, conectar alambre para protoboard ya que este es compatible con los pines. Para la conexión del circuito se decidió ubicar el controlador en una baqueta, de tal forma que las conexiones se mantengan unidas firmemente al estar soldadas con el fin de prevenir situaciones que puedan afectar el sistema,

como interrupción en la conexiones o cortos en caso de que cables sueltos se lleguen a tocar teniendo en cuenta que el alambre no está hecho para sostenerse en placas tipo protoboard.

Por otra parte, para distribuir la energía hacia las electroválvulas se encontró que un terminal de distribución de 16 salidas permite realizar esta conexión utilizando uno para voltaje positivo y el otro para tierra.

Adicional a esto se calculó la cantidad de tubería y complementos que debían usarse para instalar el cableado de forma subterránea hasta la caja de paso. Para esto se requerían 15m de tubo conduit de ½ pulgada, 10 codos y 2 tees.

Los pasos para seguir al desarrollar el código de programación que permita llevar a cabo el riego automatizado, con base en la interfaz de usuario seleccionada en el diseño preliminar se muestran en la figura 48.

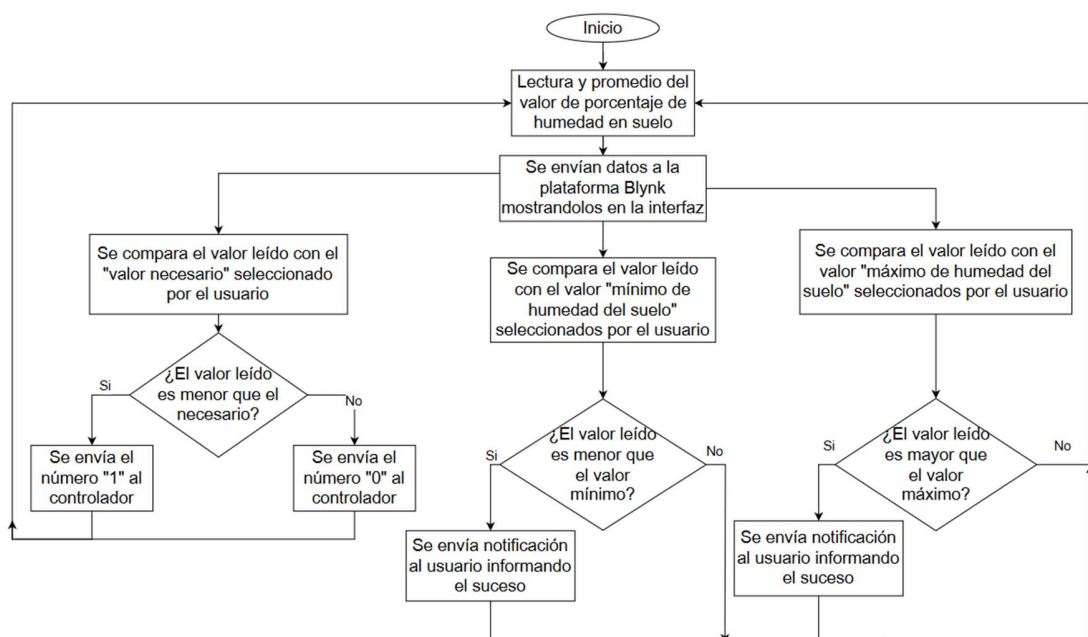


Figura 47. Diagrama de flujo para el funcionamiento del código sistema de riego.

#### 8.4.4.2 Sistema de monitoreo de pH

Al desarrollar el prototipo del flotador planteado en el diseño preliminar se encontró que realizar la unión del flotador inferior como se había establecido no es posible. Esto se debe a que la flexibilidad que tiene el material limita su movimiento y por ende no permite que sea ubicado como se había establecido. Por esta razón, se hizo un rediseño de tal forma que, en la parte inferior, en vez de unir las dos caras del flotador entre sí, estas queden lado a lado como se representa en la figura 49.



*Figura 48.* Diseño detallado del flotador para sensor de pH.

Como método de unión para la estructura se seleccionaron amarres plásticos ya que este material cumple con la función estructural que requiere el diseño y adicionalmente es resistente a la humedad dentro del tanque de agua.

Para hacer el montaje del circuito se definió que el controlador se ubicaría en 2 mini protoboards, ya que el cableado que tiene el sensor de pH está hecho para conectar con jumpers, se considera que el soldar este tipo de cableado es innecesario ya que por su diseño este se mantendrá en la placa. Para conectar el controlador a la fuente de alimentación sería necesario utilizar una extensión de 10 m, junto con un adaptador de 110V AC a 5V DC USB que permita conectar el cable USB-Micro USB al controlador. Se estableció que la caja de paso con el circuito



se ubicaría al lado del tanque, y junto a esta, se instalaría otra caja donde se encuentren los terminales de la extensión y el adaptador.

El diagrama de flujo para establecer el funcionamiento del código de programación de este sistema se muestra en la Figura 50.

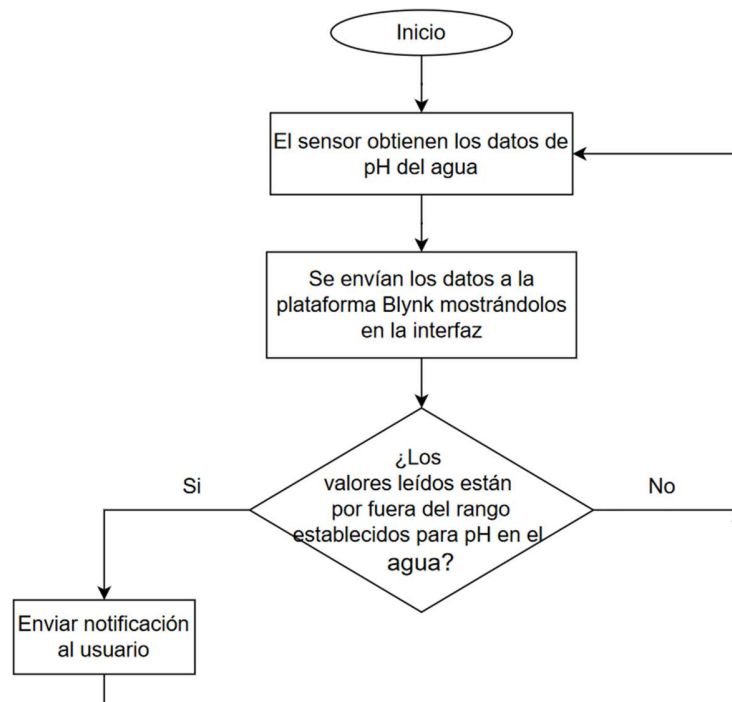


Figura 49. Diagrama de flujo para el funcionamiento del código sistema de monitoreo.

## 8.5 Implementación de camas de cultivo junto con sistema de riego automatizado y monitoreo de pH

Los resultados de las actividades realizadas para la implementación de las camas de cultivo elevadas junto con el sistema de riego automatizado y monitoreo de pH en el agua de riego se muestran a continuación.

### 8.5.1 Adquisición y verificación de componentes

El protocolo de verificación de componentes y sus resultados se muestran en el

**Anexo5\_Protocolo de verificación de componentes.**

### **8.5.2 Calibración de sensores, desarrollo de códigos de programación e interfaz de usuario**

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la automatización del riego y monitoreo del agua.

#### **8.5.2.1 Sistema de riego automatizado**

Los valores obtenidos del osciloscopio al tener el sensor en suelo seco y en suelo saturado, y luego convertirlos al valor según la resolución del controlador son los que se muestran en la tabla 21.

*Tabla 21*

*Valores tomados de los sensores de humedad*

<b>No. sensor</b>	<b>Voltaje en suelo seco (V)</b>	<b>Voltaje en suelo saturado (V)</b>	<b>Valor ADC en suelo seco</b>	<b>Valor ADC en suelo saturado</b>
1	1,99	1,04	2469	1291
2	2	1,02	2482	1266
3	2,02	1,02	2507	1266
4	1,87	1,04	2321	1291

La gráfica de los valores obtenidos en ADC para cada sensor, su porcentaje de humedad correspondiente y su respectiva curva de calibración se muestran en las Figuras 51 a la 54.

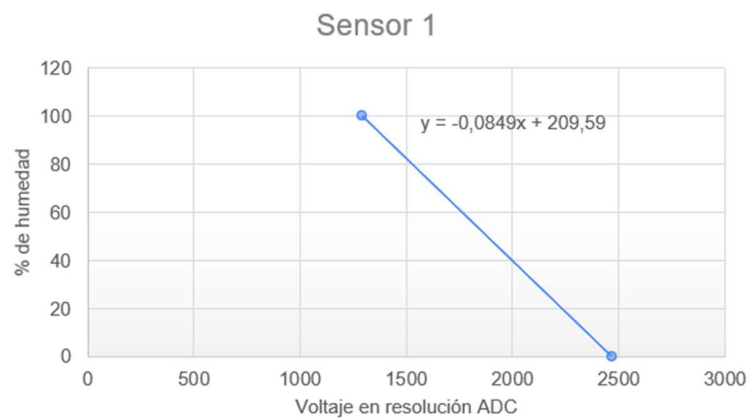


Figura 50. Curva de calibración sensor de humedad 1.

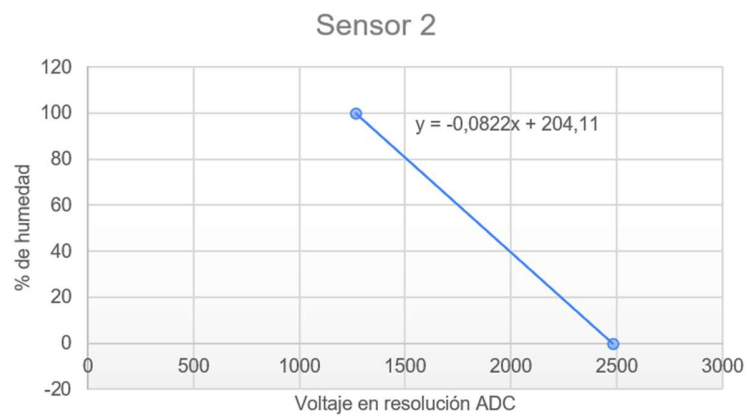


Figura 51. Curva de calibración sensor de humedad 2

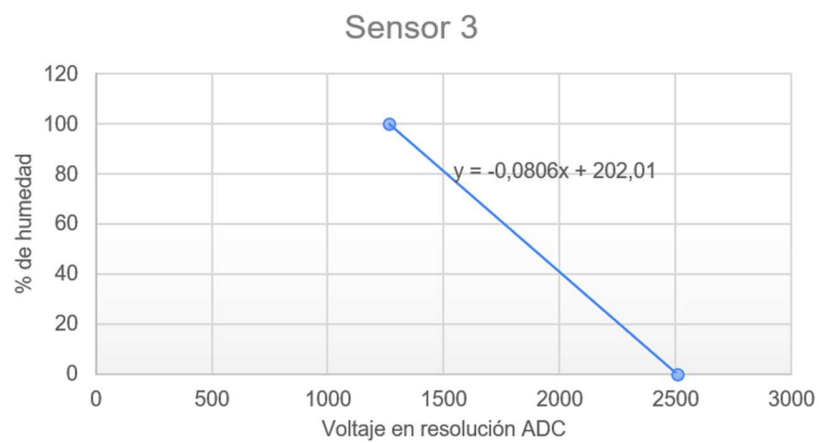


Figura 52. Curva de calibración sensor de humedad 3

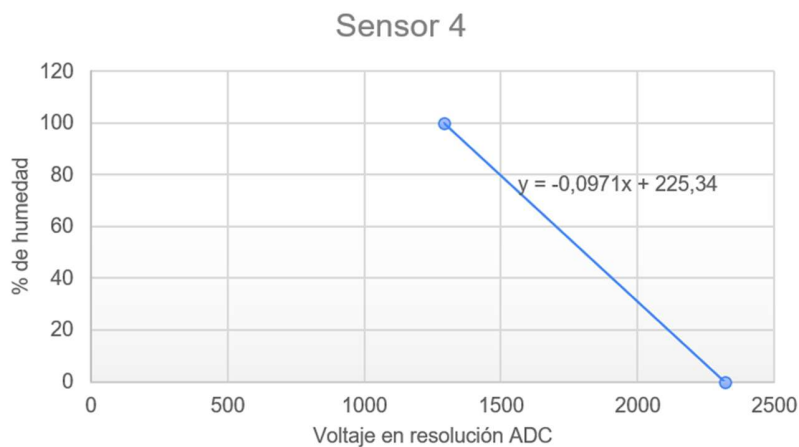


Figura 53. Curva de calibración sensor de humedad 4

El código desarrollado para el sistema de riego automatizado se adjunta como **Anexo6\_Código riego automatizado.**

#### 8.5.2.2 Sistema de monitoreo de pH

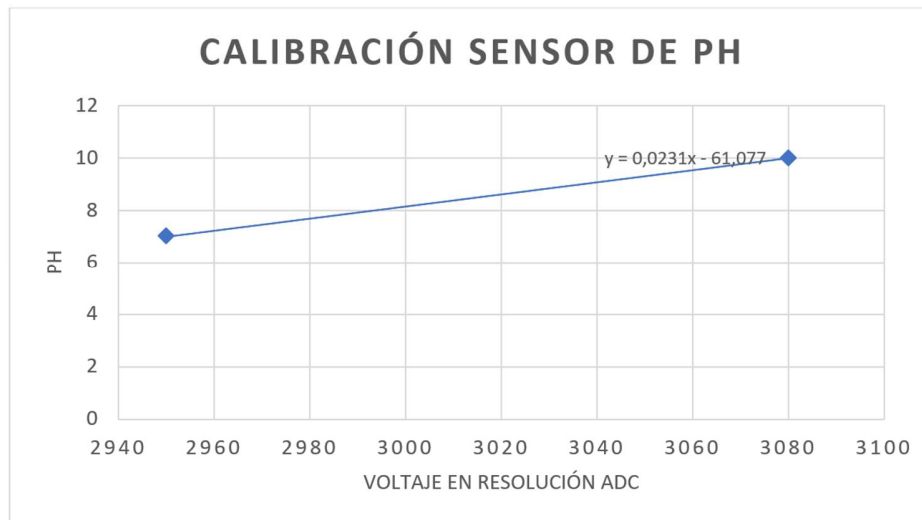
Los resultados obtenidos al sumergir el sensor en las soluciones de pH 7 y 10 se muestran en la tabla 22.

Tabla 22

Valores tomados del sensor de pH

pH	Valor en resolución ADC
7	2950
10	3080

La gráfica de la curva de calibración junto con su ecuación se muestra en la figura 55



*Figuración 54.* Curva de calibración sensor de pH.

El código desarrollado para el sistema de monitoreo de pH en el agua se adjunta como **Anexo7\_Código monitoreo pH.**

#### **8.5.2.3 Desarrollo de interfaz de usuario**

Las ventanas para el sistema de monitoreo y el sistema de riego automatizado dentro de la aplicación Blynk se encuentran en la pestaña de dispositivos como se muestran en la figura 56.

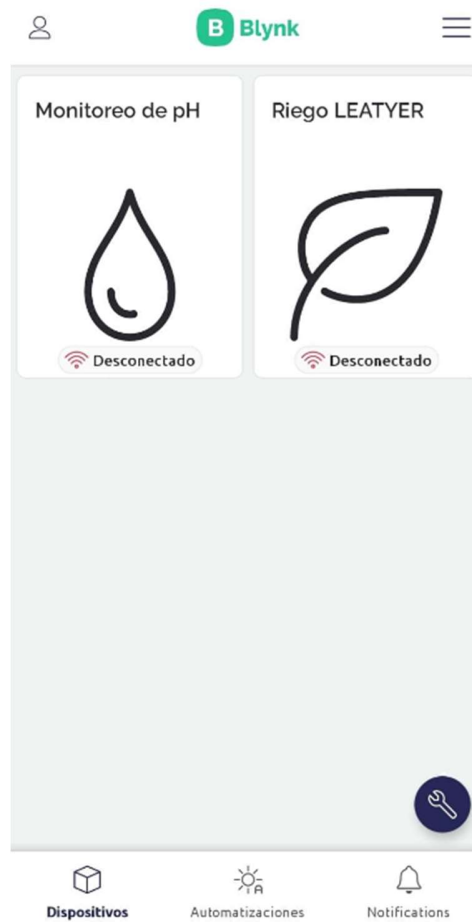


Figura 55. Visualización de monitoreo de pH y riego automatizado en aplicación Blynk.

En la figura 57 se muestra que, para la ventana del sistema de monitoreo de pH, se encuentra un indicador que en el centro muestra el valor numérico del valor de pH leído y alrededor de este número muestra gráficamente en que posición se encuentra el pH dentro de la escala de 0 a 14.



Figura 56. Visualización de indicador de pH en aplicación Blynk.

En la figura 58 se muestran los indicadores para la humedad de ambos cultivos utilizando un número en medio para mostrar el porcentaje de humedad, y alrededor un gráfico que muestra en que valor se encuentra la humedad dentro del rango de 0 a 100%. Debajo de cada valor de humedad se muestra el estado de la válvula correspondiente a cada cultivo. El indicador para las válvulas es tipo LED. Al estar apagadas se muestran en color blanco, y al encenderse se tornan color verde.

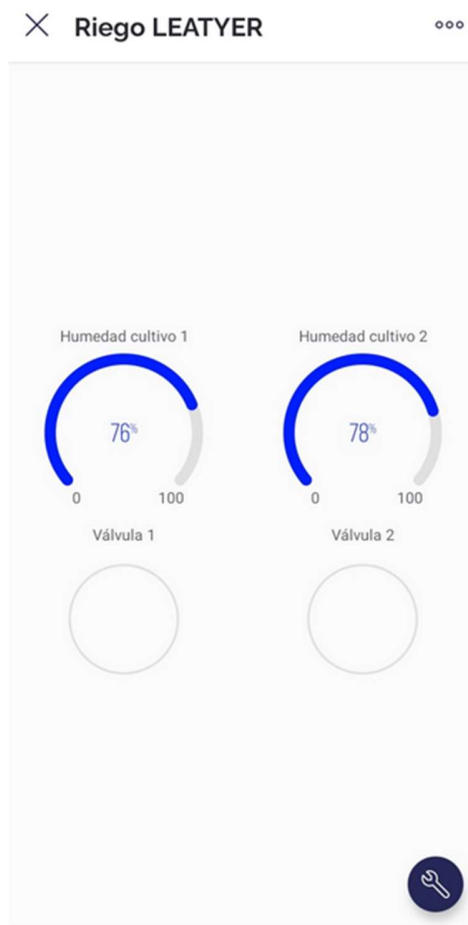


Figura 57. Visualización de indicadores de humedad de los dos cultivos.

En la pestaña de automatizaciones se muestran las funciones que permiten modificar los parámetros del riego y además obtener notificaciones de ambos sistemas. Estas funciones pueden activarse o desactivarse moviendo el switch que se muestra resaltado en rojo en la figura 59.



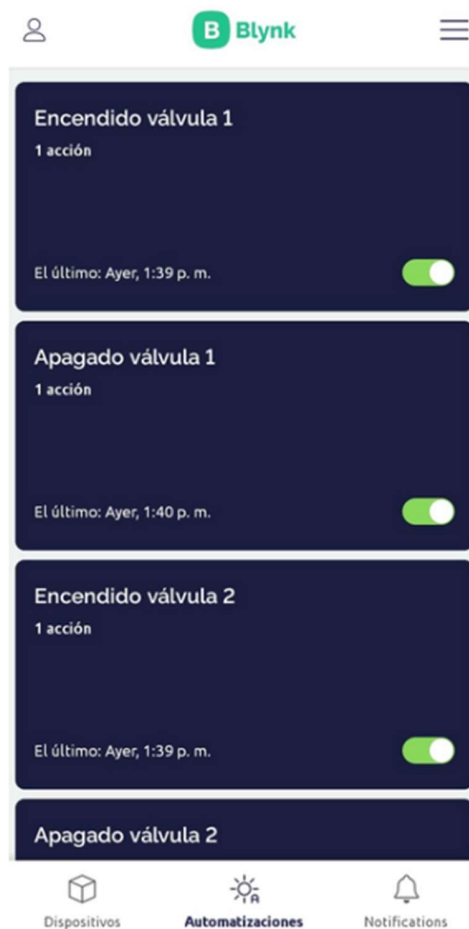


Figura 58. Funciones que permiten cambiar los parámetros del riego en aplicación Blynk.

Al ingresar a cada función se permite que el usuario modifique los parámetros establecidos, como se muestra en el ejemplo de la figura 60.

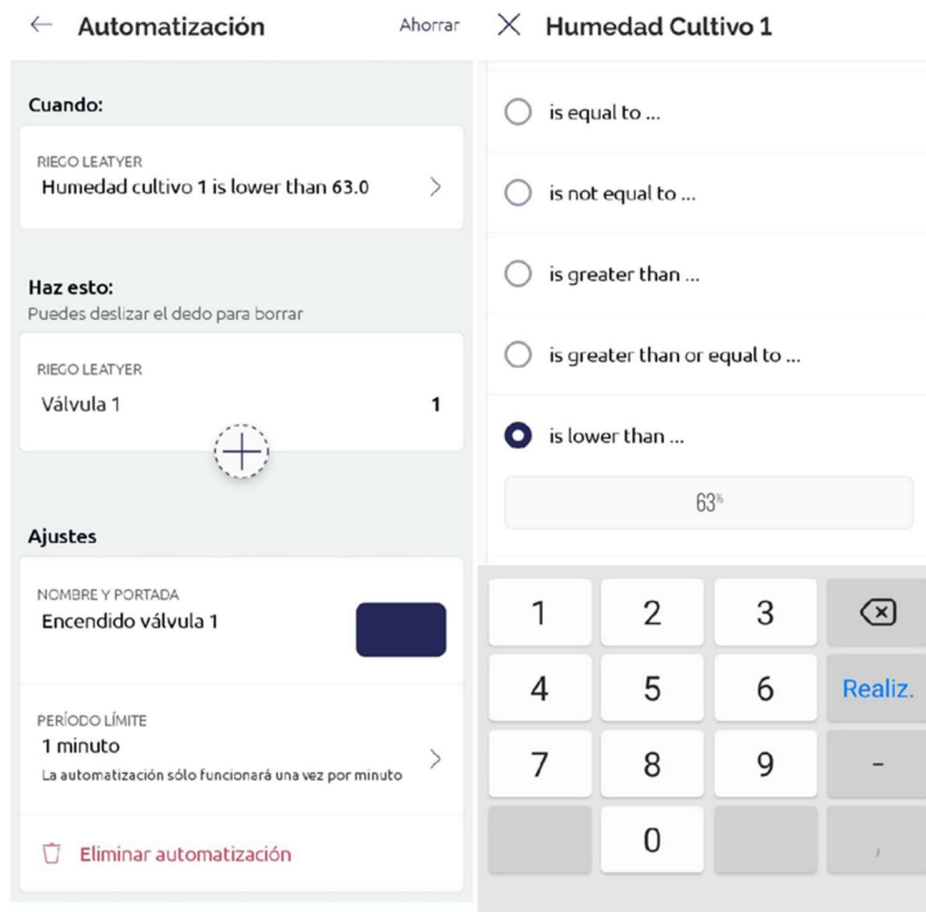


Figura 59. (a) Ingreso a la función de encendido para la válvula 1 (b) pestaña para modificación del parámetro por parte del usuario

El diseño de la interfaz permite que el usuario encuentre de forma organizada la información correspondiente a los dos sistemas que se implementarían, al estar cada uno en una ventana diferente bajo el título al cual corresponde la interfaz, un elemento gráfico que representa al sistema y un indicador que informa sobre el estado de conexión a la red wifi. A su vez, la visualización tanto gráfica como numérica de los valores obtenidos por los sensores es una ayuda visual precisa para que el usuario tenga conocimiento el estado de la humedad del suelo de los cultivos y el valor de pH del agua destinada al riego aun estando a distancia. Los indicadores del estado de las electroválvulas también permiten conocer el estado del riego de los cultivos y verificar que la apertura o cierre de las electroválvulas corresponda con el porcentaje

de humedad bajo el cual debe hacerse el riego para cada especie según los parámetros establecidos, los cuales también podrán ser ajustados sin necesidad de estar en el LEATYER, mientras que las notificaciones podrán indicar sobre anomalías en los sistemas lo cual permitirá atender oportunamente las problemáticas relacionadas al riego o el valor del pH en el agua previniendo así, daños mayores en los cultivos a causa de estrés hídrico o cambios en el pH del suelo los cuales afectarían la asimilación de nutrientes por parte de las plantas.

Para detalles adicionales en cuanto al funcionamiento, la totalidad de las automatizaciones e instrucciones del uso de la interfaz se encuentran en el manual de usuario, página 10, el cual se adjunta como **Anexo8\_Manual de usuario**.

#### **8.5.3 *Protocolo de pruebas en laboratorio***

Los resultados del protocolo de pruebas previos al montaje se adjuntan en el **Anexo9\_Resultados protocolo de pruebas**.

#### **8.5.4 *Preparación de camas de cultivo convencionales***

El terreno nivelado, donde posteriormente se instalaron las camas convencionales se muestra en la Figura 61. Debido al uso que se les da a las camas convencionales, y su poca disponibilidad en el momento de desarrollar el proyecto solo una cama convencional fue destinada como espacio para la etapa de evaluación del proyecto.



Figura 60. Camas convencionales para evaluación del proyecto.

#### 8.5.5 Instalación de camas elevadas

Los cajones y las bases de las camas elevadas fueron instalados de la misma forma que se estableció en el protocolo de pruebas. Esto se hizo en el terreno designado del LEATYER para las camas elevadas, el cual fue previamente nivelado con el fin de que la estructura no presente daños a futuro ocasionados por estar ubicada sobre un terreno irregular, lo cual puede afectar variables como la distribución del peso. Esto se muestra en la figura 62.



Figura 61. Construcción bases (a) y cajones (b) de camas elevadas junto con sistema de drenaje (c)

Tener el conocimiento de la ubicación de las bases, los pasos para el ensamblaje de los cajones y la ubicación de los subcomponentes como pernos o tornillos, permitió llevar a cabo un proceso con cantidad mínima de errores, sin falta o sobra en exceso de materiales para la construcción y el resultado fue una estructura estable que pudo ser ensamblada tal como se había planeado según el diseño.

Los cajones se rellenaron con suelo de tal forma que este tuviera una profundidad de aproximadamente 30 cm como se muestran en la Figura 63. Esto debido a que las especies de prueba, lechuga y rábano, no requieren de una profundidad mayor para su desarrollo.



*Figura 62. Camas de cultivo elevadas llenas de suelo.*

Tras un periodo de seis meses no se evidenciaron daños estructuras en los cajones o en las bases. Ya que las camas no solo estuvieron con suelo seco sino también con suelo saturado debido a la lluvia, se pudo evidenciar el correcto funcionamiento de la estructura bajo las condiciones a las cuales estaría sometida en el momento de hacer los cultivos.

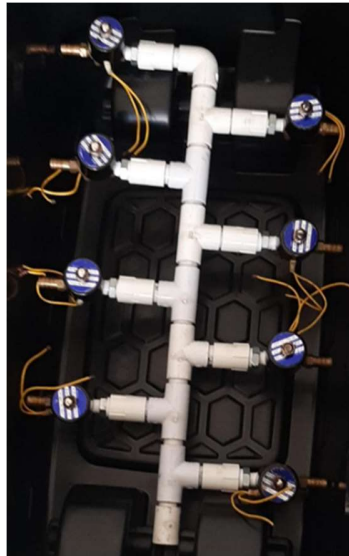
### **8.5.6 Instalación de sistema de riego automatizado**

Se construyó e instaló la caja de las electroválvulas como se había establecido en el diseño, en medio de las camas elevadas y de tal forma que no obstaculizara el paso peatonal que hay entre las camas elevadas y las convencionales. La ubicación de la caja se muestra en la figura 64.



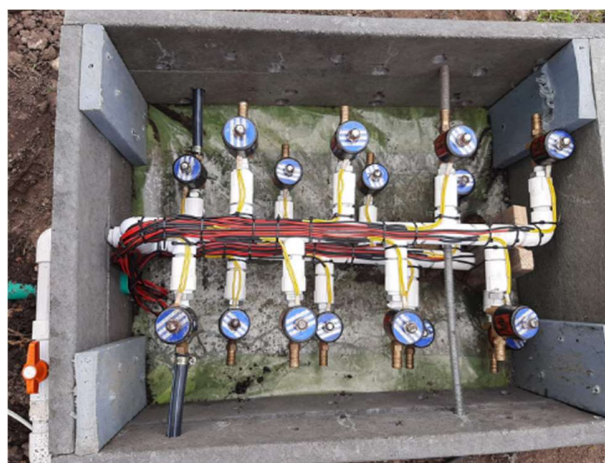
*Figura 63. Caja electroválvulas.*

Posteriormente se construyó y verificó el correcto funcionamiento de la tubería con las electroválvulas que se muestran en la figura 65. Se comprobó que esta estructura funcionaba correctamente ya que no presentaba fugas de agua.



*Figura 64.* Sistema de electroválvulas completo.

El cableado se hizo soldando los cables del diámetro seleccionado de los colores rojo y negro en cada una de estas. Para proteger las uniones se utilizó tubo termo encogible. Se resalta que, aunque solo se usaron 2 válvulas para el funcionamiento del riego de las camas elevadas, las otras 14 fueron conectadas para cuando se decidan poner en funcionamiento. Los cables fueron organizados en grupos de tal forma que se facilite identificar de que electroválvula proviene cada cable. Estos también fueron agrupados y se sujetaron a la tubería. Posteriormente se ubicaron las electroválvulas en la caja como se muestran en la figura 66



*Figura 65.* Ubicación de las electroválvulas dentro de la caja.



Se terminó la instalación de la tubería desde las electroválvulas hasta las camas elevadas de como se muestra en la figura 67 utilizando los subcomponentes seleccionados en el diseño detallado.



Figura 66. Conexión de subcomponentes electroválvula.

Para la instalación de los sensores estos fueron unidos con los cables seleccionados usando el código de color: blanco para VCC, negro para GND y verde para AOUT como se muestra en la Figura 68. cubriendo las uniones con termo encogible con el fin de asegurarlas, proteger los alambres de la humedad y asilarlos entre sí.

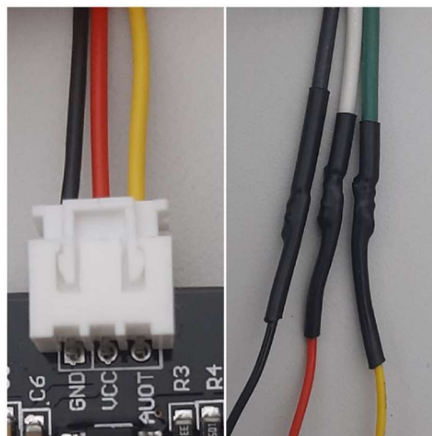


Figura 67. (a) Código de color para entradas del sensor (b) Código de color para unión entre cables del sensor y cables 3x18 AWG

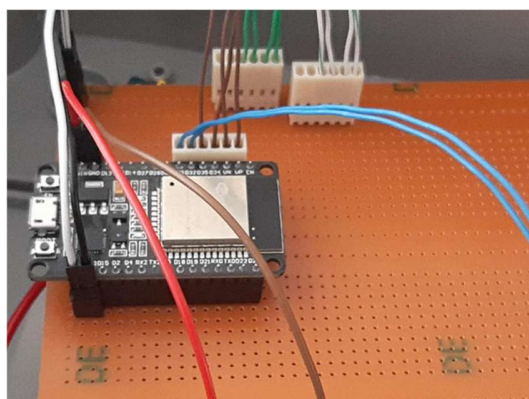


En la Figura 69 se muestra la construcción del sistema de tubería para cableado eléctrico de los sensores de humedad (a), luego se dejaron los sensores establecidos en las camas elevadas (b)



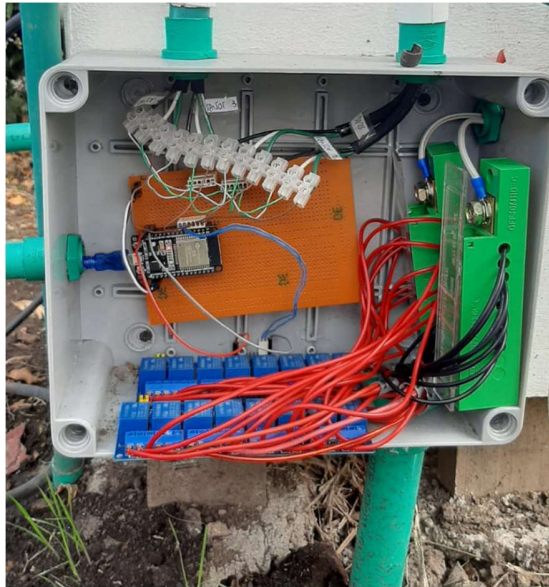
*Figura 68.* Sistema de tubería para el cableado eléctrico.

El controlador fue ubicado sobre la baquela como se estableció en el diseño detallado, adicionalmente se utilizaron conectores de pines GP para el cableado hacia los demás componentes del circuito se muestra en la figura 70. Estos pines permiten mover el cableado de su lugar de ser necesario, a diferencia de soldar los cables directamente en la baquela.



*Figura 69.* Conexión de controlador en baquela.

Los componentes del sistema electrónico fueron ubicados en la caja de paso. Los cables de las electroválvulas y sensores fueron etiquetados con el fin de lograr distinguir a qué componente pertenecen, y, por ende, dónde deben estar conectados en caso de ser necesario hacer modificaciones en el circuito en algún momento, como se muestra en la figura 71.



*Figura 70.* Instalación de componentes electrónicos dentro de la caja de paso.

#### **8.5.7 Implementación del sistema de riego automatizado en las camas elevadas**

El sistema de tubería desde las electroválvulas hasta las camas elevadas se muestra en la figura 72. El camino subterráneo que recorren las mangueras se encuentra resaltado en rojo.



*Figura 71.* Tubería desde la caja de las electroválvulas hasta las camas elevadas.

La ubicación de las mangueras micro porosas sobre las camas elevadas se muestra en la figura 73. Aunque era necesario tener es espacio de las camas libre de mangueras al momento de hacer el trasplante de las plántulas, de igual manera estas fueron ubicadas para así poder probar el funcionamiento del sistema en conjunto siguiendo el protocolo de pruebas y a su vez verificar la correcta distribución del agua a través del suelo teniendo en cuenta la distancia entre mangueras establecida en el diseño preliminar.



*Figura 72.* Ubicación de las mangueras microporosas.

Los resultados del protocolo de pruebas en el LEATYER para el riego automatizado se encuentran adjuntos en el **Anexo9\_Resultados protocolo de pruebas**. Al haber comprobado



el correcto funcionamiento del sistema, se retiraron las mangueras micro porosas mientras se hacía el trasplante. En la figura 74, se muestran las plántulas trasplantadas en las camas elevadas (rábano y lechuga respectivamente).



Figura 73. Plántulas de rábano y lechuga dentro de las camas elevadas.

En la figura 75, se muestran las plántulas trasplantadas en la cama convencional



Figura 74. Plántulas de rábano y lechuga en cama convencional.

Como se puede ver en la figura 76, luego del trasplante se volvieron a ubicar las mangueras micro porosas sobre las camas.



*Figura 75. Ubicación de mangueras micro porosas en los cultivos*

Al tener las plántulas en las camas elevadas se establecieron los parámetros del riego según los requerimientos de cada especie en la interfaz de usuario. Para el rábano la humedad establecida fue 63%, es decir, cuando el porcentaje leído sea menor a este valor el riego se activa, y al ser mayor se desactiva. Para la lechuga la humedad establecida fue de 70%.

Al haber configurado la interfaz de usuario se hizo la conexión del sistema a las fuentes de alimentación. Es importante resaltar que se hizo la instalación de una toma de corriente la cual se encuentra conectada directamente al inversor, es decir, es una fuente de 110V AC proveniente de energía solar. Sin embargo, para el desarrollo de este proyecto los componentes fueron conectados utilizando una extensión desde la casa de mantenimiento. Todos los enchufes

se ubicaron dentro de una caja plástica con el fin de brindar protección adicional frente a la lluvia y humedad. Tanto la toma de corriente como las conexiones a la extensión se muestran en la figura 77

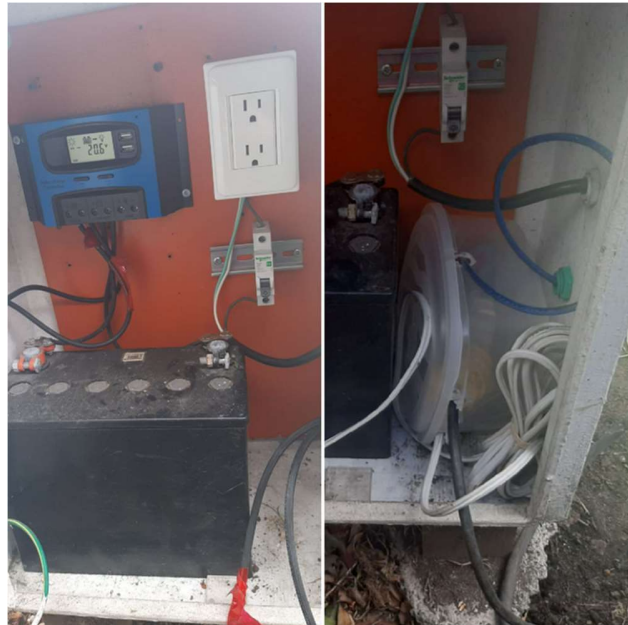


Figura 76. Fuentes de alimentación para sistema de riego automatizado: Toma eléctrica conectada a inversor (a), uso de extensión (b).

Al haber conectado el sistema se inició la implementación del riego automatizado en las camas elevadas. La demostración del funcionamiento de este sistema se puede observar en el siguiente enlace <https://www.youtube.com/watch?v=lweYXOWHAdU>. Debido a que la humedad de los cultivos se encontraba mayor al valor necesario para la activación del riego, para esta demostración se cambiaron los parámetros de activación y desactivación del riego de ambos cultivos. Ya que la humedad del cultivo 1 (rábano) se encontraba alrededor del 75%, se configuró para que el riego se encendiera cuando el valor de humedad fuera menor a 80% para iniciar el riego, luego el valor se volvió a configurar con 70% para detener el riego. Para el cultivo 2 (lechuga), ya que la humedad se encontraba alrededor de 85%, se configuró para que el riego



se encendiera cuando el valor de humedad fuera menor a 90%. Luego, el valor se volvió a configurar como 70% para detener el riego.

Para la fertilización de los cultivos en camas elevadas y convencionales, teniendo en cuenta que los fertilizantes seleccionados son gránulos hidrosolubles, se pesó en una gramera la cantidad establecida para cada cama, y esta cantidad fue diluida en un litro de agua. Luego, mediante un rociador se aplicó de forma foliar el fertilizante nutricerecer, y el fertilizante 9-12-36 directamente en el suelo.

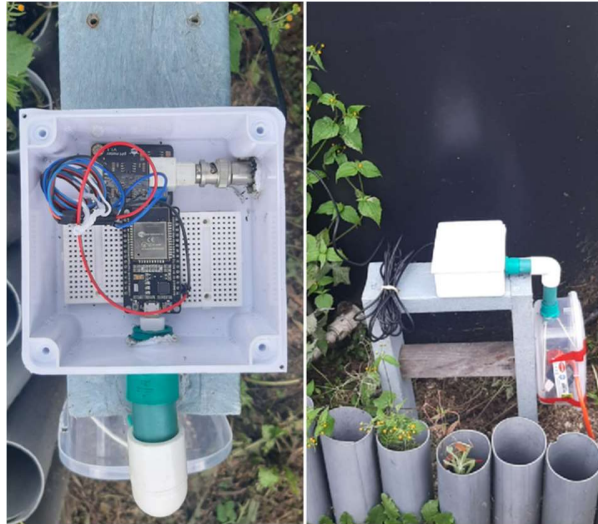
#### **8.5.8 Implementación del sistema de monitoreo de pH en el agua para riego**

La construcción del flotador junto con el sensor y su instalación en el tanque de agua seleccionado se muestra en la figura 78.



*Figura 77. Flotador para sensor de pH construido*

La caja de paso con el circuito, y su instalación en el terreno se muestran en la figura 79. Se espera que esta ubicación sea temporal, ya que, cuando los paneles solares vuelvan a estar en funcionamiento la caja se podrá ubicar junto con la bomba de agua.



*Figura 78.* Instalación de sensor dentro del tanque de agua.

Terminada la instalación y conexión a la fuente de alimentación, se desarrolló el protocolo de pruebas. Sus resultados se encuentran adjuntos en el Anexo9\_Resultados protocolo de pruebas. Al haber comprobado el correcto funcionamiento del sistema se inició la implementación del monitoreo de agua en el tanque.

Para más información en cuanto a los componentes de los sistemas de riego y monitoreo, su ubicación, operación, recomendaciones de cuidado y mantenimiento, y solución a problemas, dirigirse al manual de usuario adjunto como **Anexo8\_Manual de usuario**.

## **8.6 Evaluación del sistema**



### 8.6.1 Evaluación en plantas

A continuación, se presentan los resultados de los dos tipos de muestreo realizados en esta evaluación. El código con el cual se hallaron las gráficas y sus respectivos resultados se encuentran como **Anexo10\_EvaluaciónCamasElevadas**.

#### 8.6.1.1 Muestreo no destructivo

##### **Diámetro de las lechugas**

En la tabla 23 se muestran los datos obtenidos para la evaluación del diámetro de las plantas para el cultivo de lechuga en camas elevadas y convencionales durante un periodo de cuatro semanas.

Tabla 23

*Evaluación del diámetro de lechugas*

Camas elevadas		Cama convencional	
M	SD	M	SD
6,74	2,35	6,18	2,32
9,24	2,03	9,30	2,33
12,1	2,47	10	2,83
13	2,08	12,1	3,36
13,9	2,26	15,7	4,66

En la figura 80, se muestra la gráfica obtenida a partir de estos datos

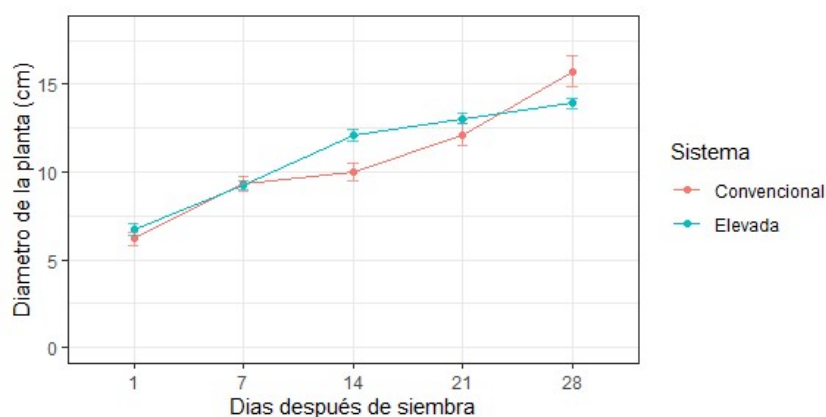


Figura 79. Evaluación diámetro de lechugas

A partir de estos resultados se puede observar que, durante la primera semana de evaluación, el aumento del diámetro para las plantas de ambas camas fue similar. Después de esa fecha se empieza a evidenciar la variación entre los resultados para cada cama.

En cuanto a las camas elevadas, la gráfica muestra un mayor crecimiento en el diámetro, y aunque la planta sigue creciendo, lo hace a una tasa menor después de las primeras dos semanas. Además, se puede observar que durante el periodo de evaluación no hubo mayor variación entre los valores para todas las plantas del cultivo, ya que la desviación se mantiene alrededor de 2 cm del valor promedio.

Por otra parte, para las camas convencionales, a partir del día 7 el aumento del tamaño fue mínimo, después del día 14, el promedio del diámetro empezó a aumentar. A partir del día 21, a medida que el diámetro aumentaba, la variación de los datos también lo hacía hasta llegar a una desviación de 4,66 cm en el último día de evaluación.

### Cantidad de hojas de lechuga

En la tabla 24 se muestran los datos obtenidos para la evaluación de la cantidad de hojas para cultivo de lechuga en camas elevadas y convencionales durante un periodo de cuatro semanas.

Tabla 24

Evaluación número de hojas en lechugas

Camas elevadas		Cama convencional	
M	SD	M	SD
5,52	0,86	5,55	1,15
6,44	1,04	6,09	1,57
9,15	0,88	8,84	2,48
11,1	1,12	11,8	3,21
13,6	1,37	15,1	5,16

En la figura 81 se muestra la gráfica obtenida a partir de estos datos.

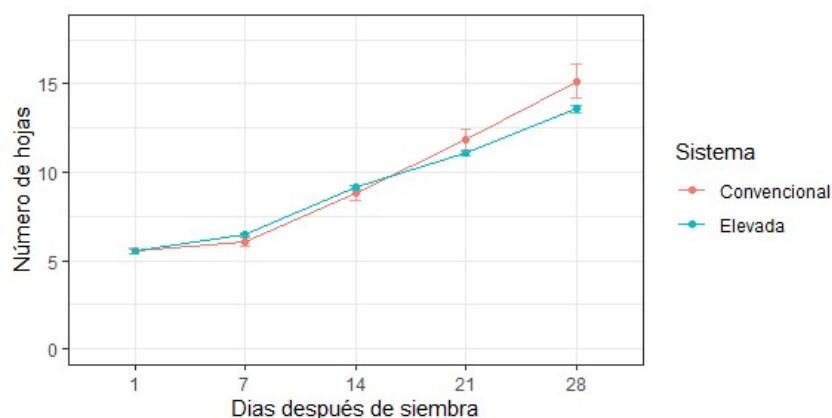


Figura 80. Evaluación número de hojas lechuga.

En las camas elevadas, durante las primeras dos semanas, se evidencia una cantidad similar de número de hojas a comparación de las camas convencionales, sin embargo, a partir de la tercera semana, la cama convencional experimenta un incremento superior en la cantidad de hojas hasta el final de la evaluación. Se resalta que para esta prueba se vuelve a observar la gran variación entre los datos en la cama convencional a medida que pasa el tiempo, donde se llega hasta una desviación de aproximadamente 5 hojas del valor promedio, mientras que esto no ocurre en las camas elevadas, donde la desviación se mantuvo alrededor de 1 hoja.

### Altura del rábano

En la tabla 25 se muestran los datos obtenidos para la evaluación de la altura de la planta para el cultivo de rábano en camas elevadas y convencionales durante un periodo de 20 días.

Tabla 25

Evaluación altura de los rábanos

Camas elevadas		Cama convencional	
M	SD	M	SD
4,94	0,71	4,57	0,76
6,8	1,09	6,45	1,17
6,81	1,44	6,9	1,53

En la figura 82 se muestran la gráfica obtenida a partir de los datos encontrados.

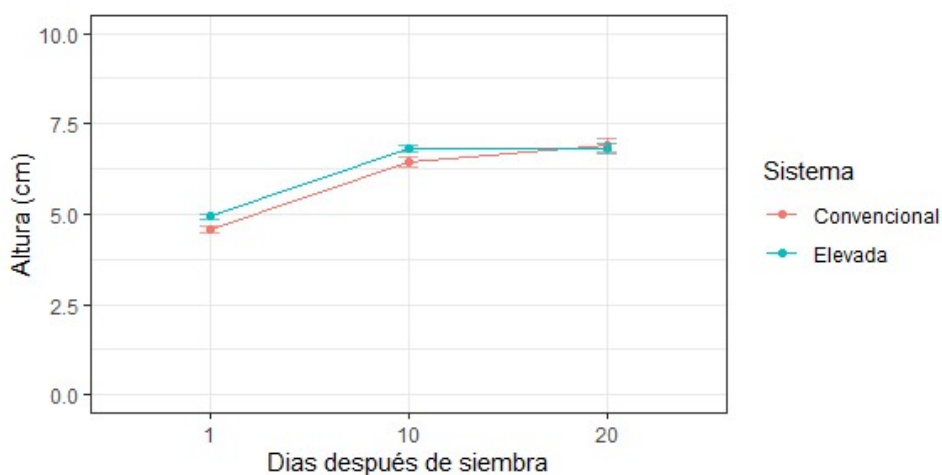


Figura 81. Evaluación altura rábanos.

Se muestra un incremento en la altura de las plantas los primeros 10 días en las camas elevadas y convencional, donde la altura en las camas elevadas es apenas 0,35 cm mayor que en la cama convencional. Para el día 20, ambos cultivos cuentan con una diferencia de altura de 0,09 cm, lo que indica que en los cultivos de cama convencional este valor siguió incrementando, mientras que en las camas elevadas se mantuvo igual. En esta gráfica no se evidencia mayor

variabilidad entre los datos para ambos tipos de camas ya que este valor se mantuvo alrededor de 1 cm.

### Hojas del rábano

En la tabla 26 se muestran los datos obtenidos para la evaluación de la cantidad de hojas en las plantas para el cultivo de rábano en camas elevadas y convencional durante un periodo de 20 días.

Tabla 26

Evaluación número de hojas en rábanos

Camas elevadas		Cama convencional	
M	SD	M	SD
4,68	0,741	4,13	0,63
5,25	1,07	4,98	1,14
5,92	1,23	6,68	1,30

En la figura 83, se muestra la gráfica obtenida a partir de estos datos.

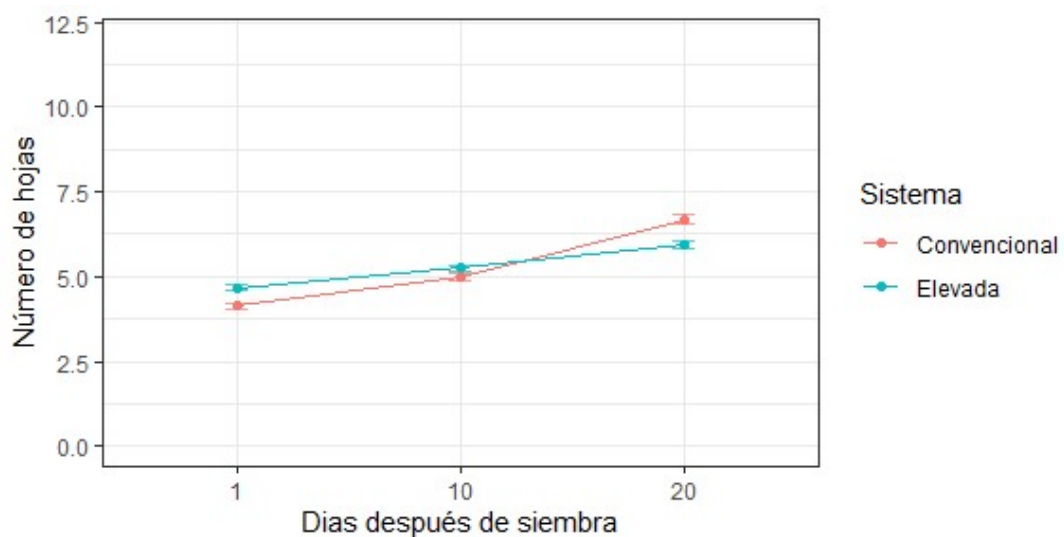


Figura 82. Evaluación número de hojas rábano

Como se evidencia en la figura 83, el número de hojas de rábano en las camas elevadas presenta un incremento lineal en su cantidad de hojas desde el día 1 hasta el día 20. Por otro lado, en la cama convencional el número de hojas aumentó hasta el día 10 y presentó un incremento mayor para el día 20, en el cual se obtuvo una diferencia de 0,8 cm a comparación de las camas elevadas. Para ambos cultivos la desviación fue baja ya que se mantuvo al redor de 1cm durante el periodo de evaluación.

#### **8.6.1.2 Muestreo destructivo**

En la tabla 27 se muestran los datos obtenidos para la evaluación del peso de las plantas para los cultivos de rábano y lechuga en camas elevadas y convencional en el momento de la cosecha.

*Tabla 27*

*Evaluación de peso en rábanos y lechugas*

<b>Especie</b>	<b>Camas elevadas</b>		<b>Cama convencional</b>	
	<b>M</b>	<b>SD</b>	<b>M</b>	<b>SD</b>
<b>Lechuga</b>	21,36	4,32	45,12	50,08
<b>Rábano</b>	41,59	8,49	34,98	17,70

En la figura 84, se muestra la gráfica obtenida a partir de estos datos

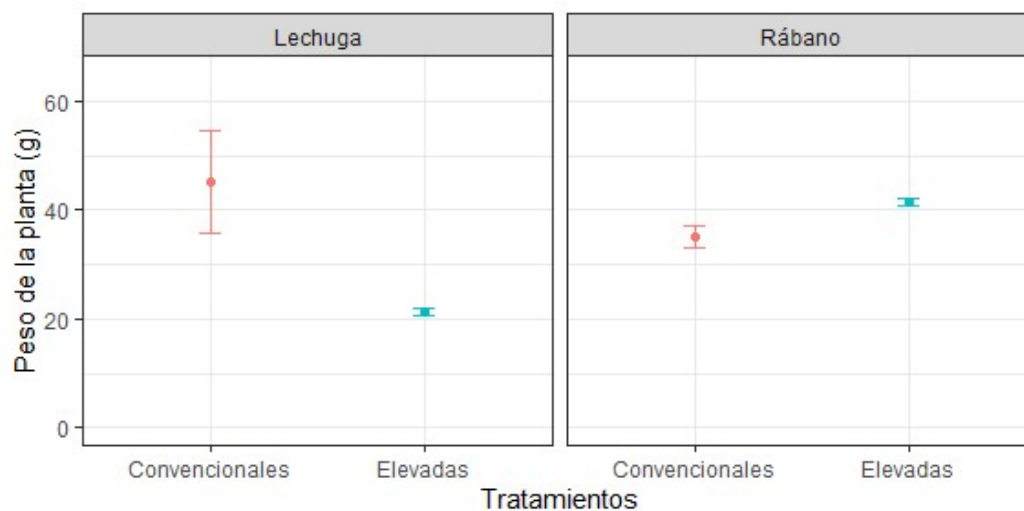


Figura 83. Evaluación peso de lechuga y rábano.

Al verificar estadísticamente que ambos grupos fueran diferentes mediante la prueba t-  
 dtudent, se encontró que ambos tratamientos obtuvieron p-valores menores a 0.05, lo que indica  
 que los dos tratamientos (convencional y elevadas) son estadísticamente diferentes para cada  
 especie.

Se evidencia en el cultivo de lechuga de la cama convencional que el promedio del valor  
 del peso fue mayor que en las camas elevadas, con una diferencia de 24 g, sin embargo, se  
 evidencia una mayor desviación de los datos que en las camas elevadas, con un valor de 50,08  
 g, demostrando que en la producción se obtuvo plantas de gran tamaño y a la vez plantas muy  
 pequeñas. Esto se conoce como heterogeneidad en el cultivo. Por otra parte, en las camas  
 elevadas aunque el promedio del peso fue menor, la variabilidad entre ellos también lo fue con  
 un valor de 4,32 g. Esto inidca que el cultivo tuvo mayor homogeneidad. Esta variación entre las

plantas se refleja en la figura 85 donde se muestra la comparación entre la planta más grande y la más pequeña de cada cultivo.



*Figura 84.* Comparación de tamaño máximo y mínimo de lechuga en cama convencional (a). Comparación de tamaño máximo y mínimo de lechuga en cama elevada (b)

Para el rábano se obtuvo un promedio mayor de peso en las camas elevadas con una diferencia de 6,61 g de la cama convencional. Al igual que en la lechuga, también se presenta mayor variabilidad en las plantas de la cama convencional, con un valor de desviación de 17,70 g, por lo que el cultivo de las camas elevadas nuevamente demuestra mayor homogeneidad como se refleja en la figura 86 donde se muestra la comparación entre la planta más grande y la más pequeña de cada cultivo.





*Figura 85.* Comparación de tamaño máximo y mínimo de rábano en cama convencional (a). Comparación de tamaño máximo y mínimo de rábano en cama elevada (b)

Para identificar los causantes del comportamiento de variabilidad entre los datos de la cama convencional y camas elevadas mostrado en las gráficas, se tuvieron presentes las principales diferencias entre ambas estructuras: la profundidad y el método de riego. Según Jaramillo, (2016), un cultivo de ciclo corto presenta heterogeneidad debido a un déficit de riego y falta de uniformidad en su aplicación. Esto ocurre durante las etapas iniciales y no se corrige a medida que avanza el desarrollo de las plantas. En la cama convencional, esto ocurre debido a que el riego se hace de forma manual, ya que no se tiene un control sobre la cantidad y la distribución del agua en el cultivo, a comparación de las camas elevadas, en donde la ubicación de las mangueras micro porosas con base en la textura del suelo garantizó su distribución uniforme de tal forma que todas las plantas obtuvieran la misma cantidad de agua, mientras que la automatización aseguró que su cantidad fuera adecuada para cada especie, lo que explica una mayor homogeneidad entre las plantas.

Por otra parte, teniendo en cuenta la profundidad que requieren las raíces de las especies cultivadas, y la profundidad de algunas áreas de las camas convencionales, se evidencia que esta no es suficiente para su correcto desarrollo. Ya que la distribución del suelo dentro de las camas convencionales varía, al crecer, las raíces de las plantas se verán obstaculizadas por una variación en la composición del suelo al acercarse al suelo propio del LEATYER, lo cual puede llegar a limitar el establecimiento de las raíces y por ende afectar la absorción de agua y nutrientes por parte de la planta (Abd-Elmabod et al., 2017). El resultado de esto puede observarse en la figura 87. En donde las áreas de las camas convencionales con menor profundidad presentan menor crecimiento en algunas de las plantas ubicadas allí. Esta área en las camas convencionales cuenta con una disminución en la profundidad debido a que en esos extremos no hay guaduas que contengan el suelo, por lo que, a causa de lluvia o vientos, este se desplazará hacia afuera.



*Figura 86. Relación entre profundidad y crecimiento de las plantas en cama convencional.*

Adicionalmente, en las plantas de la cama convencional se encontraron daños ocasionados por larvas de escarabajos, también conocidas como chizas, como se muestra en la figura 88.



*Figura 87. Afectaciones del bulbo del rábano por chizas.*

Esta especie se alimenta de las estructuras de la planta que crecen bajo el suelo, como es el caso de los bulbos de los rábanos o las raíces de la lechuga, lo cual retrasa el crecimiento de la planta o en ocasiones su muerte (Minagricultura, 2014). Debido a que los ataques de estos insectos son focalizados, se pueden considerar como otra de las razones por las cuales algunas de las plantas de ambas especies se desarrollaron más que otras generando así la heterogeneidad de los cultivos. Ya que no se evidenció esta problemática en las camas elevadas, se respalda la teoría encontrada en cuanto a la prevención de plagas en los cultivos gracias a la elevación de los cajones.

En cuanto al rendimiento de ambas especies en camas elevadas y convencional, se presentan los resultados en la tabla 28.

*Tabla 28*

*Rendimiento de rábano y lechuga*

<b>Especie</b>	<b>Camas elevadas</b>	<b>Cama convencional</b>
<b>Lechuga</b>	0,20 <i>kg/m<sup>2</sup></i>	0,15 <i>kg/m<sup>2</sup></i>
<b>Rábano</b>	1 <i>kg/m<sup>2</sup></i>	0,73 <i>kg/m<sup>2</sup></i>

Con los datos obtenidos se puede evidenciar un mayor rendimiento en las camas elevadas tanto para lechuga como para rábano, lo cual se puede asociar al arreglo de siembra utilizado con el cual se aumentó la densidad de cada cultivo, y al desarrollo correcto de las plantas gracias a los factores mencionados anteriormente: riego automatizado, profundidad de las camas y ausencia de chizas, lo cual es indicativo de que estas alcanzaron un alto peso de forma homogénea lo cual a su vez aumenta el rendimiento por metro cuadrado. En los cultivos de la cama convencional, se puede relacionar el menor rendimiento con la heterogeneidad observada, ya que la presencia de plantas que no se desarrollaron correctamente durante el periodo de evaluación, o que presentaron estructuras incompletas a la hora de la cosecha a causa de las chizas, son factores que reducen el peso de las plantas y por ende el rendimiento.

Es importante resaltar que, a pesar del rendimiento de la cama convencional en el cultivo de rábano, el peso real de las plantas que pueden ser consumidas es menor al obtenido, teniendo en cuenta que los rábanos que tienen el interior del bulbo expuesto, como se muestra en la figura 88, cuentan con mayor probabilidad de que este se encuentre contaminado por hongos o bacterias (Manzoor et al., 2021).

#### **8.6.2 Evaluación de riego**

Se identificó que los requerimientos hídricos para cada especie corresponden a 0,3L de agua al día por planta para la lechuga (Majid et al., 2021) y 0,1L de agua al día por planta para el rábano (Vanderbilt University, 2023). Se debe tener en cuenta que estos valores son aproximados y que pueden variar según diversos factores del lugar donde se encuentra el cultivo como temperatura, precipitaciones, tipo de suelo, entre otros. Teniendo en cuenta el número de plantas en cada cultivo, y los resultados obtenidos del volumen del riego manual y automatizado, se encontró el volumen de agua requerido por cada especie y el volumen que se aplicó en cada tipo de cama.

Para los cultivos de lechuga, teniendo en cuenta que la evaluación se hizo durante un periodo de 28 días, cada planta necesitaba de 8,4L para su desarrollo. Ya que en las camas elevadas había 54 plantas el riego debía ser de 453,6L, mientras que, en las camas convencionales, al haber 33 plantas se requería de 277,2L de agua. El volumen de agua aplicado mediante el riego automatizado fue de 417,04L, mientras que el riego aplicado manualmente fue de 88L, teniendo en cuenta que estos valores no contemplan el agua obtenida en los cultivos gracias a las precipitaciones durante el periodo de evaluación. En la tabla 29 se muestra la comparación los datos obtenidos.

*Tabla 29*

*Datos obtenidos de consumo de agua en las camas*

Camas elevadas		Cama convencional	
Requerimiento de agua (L)	Volumen aplicado (L)	Requerimiento de agua (L)	Volumen aplicado (L)
453,6	417,04	277,2	88

Para los cultivos de rábano, teniendo en cuenta que la evaluación se hizo durante un periodo de 20 días, cada planta necesitaba de 2L para su desarrollo. Ya que en las camas elevadas había 140 plantas el riego debía ser de 280L, mientras que, en la cama convencional, al haber 85 plantas se requería de 170L de agua. El volumen de agua aplicado mediante el riego automatizado fue de 281,2L, mientras que el riego aplicado manualmente fue de 68L, teniendo en cuenta que estos valores no contemplan el agua obtenida en los cultivos gracias a las precipitaciones durante el periodo de evaluación. En la 30 se muestra la comparación de los datos obtenidos.

*Tabla 30*

*Comparación datos de consumo hídrico vs requerimiento*

Camas elevadas		Cama convencional	
Requerimiento de agua (L)	Volumen aplicado (L)	Requerimiento de agua (L)	Volumen aplicado (L)
280	281,2	170	68

Según los resultados, se puede confirmar el déficit hídrico que se presentó en la cama convencional para ambas especies como se mencionó en la evaluación de las plantas, ya que estas obtuvieron 195,2L (en el caso de la lechuga) y 102L (en el caso del rábano) menos de lo requerido, lo cual corresponde a la aplicación del 31 y 40% del agua requerida, respectivamente. Adicionalmente, al ser riego manual, no se garantizó la distribución uniforme de este volumen, lo cual explica el poco desarrollo en algunos ejemplares debido a que probablemente obtuvieron una cantidad aún menor de agua, mientras que otros pudieron recibir una cantidad mayor permitiéndoles crecer más. En el caso de las camas elevadas, el volumen del riego fue más cercano al requerimiento hídrico, con una diferencia de 36,56L para el cultivo de lechuga lo cual corresponde a una aplicación del 92% del agua requerida y de 1,2L para el cultivo de rábano lo que corresponde a un volumen de 0,4% superior al requerido. Esta cercanía al valor del requerimiento, junto con el riego uniforme del agua dado por las mangueras micro porosas, explica la homogeneidad y el correcto desarrollo de los cultivos.

Con base en esto se demuestra la optimización del riego en las camas elevadas, ya que la automatización basada en el porcentaje en la humedad del suelo permitió hacer una irrigación según el requerimiento hídrico para cada especie, a diferencia del riego manual realizado en el LEATYER, con el cual no se tiene control sobre el volumen de agua utilizado o la uniformidad del riego, lo cual implica efectos negativos sobre el desarrollo de las plantas y el rendimiento de los cultivos, como se evidenció en este proyecto a causa de no aplicar un volumen suficiente de agua para las plantas. Adicionalmente, el sistema de riego automatizado tiene como ventaja la reducción en la mano de obra necesaria para el riego ya que no es necesario que alguien realice este trabajo.

## 9 Conclusiones

El levantamiento de información en cuanto a características ambientales y espaciales del LEATYER, requerimientos para el cultivo de hortalizas de clima frío y características físicas y mecánicas de diferentes materiales, permitió diseñar una estructura que será durable gracias a su resistencia a la intemperie y al peso de los cultivos mientras que brinda condiciones de espacio y suelo necesarias para el correcto desarrollo de diferentes especies. Adicionalmente, fue posible reutilizar materiales disponibles en el laboratorio con lo cual se siguió un proceso sostenible en el uso de algunos de los recursos que serían utilizados para la construcción del diseño planteado.

El diseño realizado para los sistemas de riego y monitoreo permite hacer uso de energías eléctricas renovables o convencionales aprovechando así la disponibilidad de estas en el LEATYER, garantizando que el funcionamiento del sistema no se verá interrumpido en caso de mal funcionamiento de alguna de estas fuentes. A su vez, los elementos seleccionados para su ubicación en el terreno garantizarán la durabilidad y calidad de los dispositivos electrónicos evitando su deterioro frente a condiciones ambientales lo cual permitirá que tanto sensores como actuadores funcionen correctamente de tal forma que se mantenga la eficiencia en la lectura de parámetros y del riego en los cultivos.

La implementación del sistema de riego automatizado utilizando tecnología IoT permitió que varios usuarios conocieran el estado de la humedad del suelo y riego en los cultivos sin importar su ubicación gracias al fácil acceso que se tiene a la información desde la aplicación móvil, también fue posible recibir alertas cuando los valores obtenidos mediante los sensores de humedad del suelo salieron de los rangos establecidos para así tomar las medidas necesarias con el fin de prevenir efectos adversos en los cultivos. Así mismo, la posibilidad de hacer el cambio de los parámetros en el riego estando a distancia permite controlar el sistema según se requiera sin necesidad de ir al lugar del cultivo, ahorrando así tiempo y costos que implican el desplazamiento hasta el LEATYER.

La implementación del sistema de monitoreo de pH en el agua mediante IoT permitió que los usuarios se mantuvieran informados en cuanto al estado de esta variable aun estando a distancia gracias a la interfaz, la cual también genera alertas en caso de que no se cumplan los parámetros establecidos por el decreto 1076 del 2015 para el uso de agua en el sector agrícola. Gracias a esto se pueden tomar las medidas necesarias de forma oportuna frente a la presencia de irregularidades y se elimina la necesidad de tomar muestras periódicas del agua para conocer el valor de su pH.

Las camas elevadas otorgaron a las especies cultivadas la profundidad adecuada para su desarrollo, además de protección contra insectos como las chizas previniendo los daños ocasionados en el cultivo debido a daños de las raíces o al ingreso de hongos o bacterias en las plantas. Además, el riego automatizado implementado en esta estructura demostró una mayor eficiencia a comparación del riego manual ya que este proporcionó la cantidad de agua necesaria para cada especie según su requerimiento hídrico, mientras que la ubicación de las mangueras micro porosas garantizó la distribución uniforme del agua lo que en conjunto permitió que los cultivos se desarrollaran de forma homogénea, contribuyendo a un mayor rendimiento a comparación del cultivo convencional en ambas especies obteniendo una diferencia de 50 g/m<sup>2</sup> para la lechuga y 270g/m<sup>2</sup> para el rábano.

La optimización del riego consistió en el uso de una mayor cantidad de agua mediante la automatización debido a que el riego manual realizado en el laboratorio no aportaba el volumen suficiente a las plantas según su requerimiento hídrico. El aumento en el consumo de este recurso por parte del sistema permitió proporcionar un valor de 92% del agua requerida al cultivo de lechugas, y un valor 0,4% superior al requerimiento hídrico del rábano, a diferencia de riego manual donde se proporcionó un 31% del agua requerida al cultivo de lechuga y 40% del agua requerida al cultivo de rábano.



El sistema de camas elevadas con automatización de riego y monitoreo de pH es un prototipo que va a permitir el desarrollo de múltiples cultivos de hortalizas de clima frío ya que su diseño es adaptable para diferentes especies gracias a la posibilidad de cambiar los parámetros de riego en la interfaz mientras que las camas elevadas cuentan con la profundidad necesaria para el desarrollo de diferentes tipos de hortalizas. Gracias a esto podrán realizarse futuras actividades académicas e investigativas del programa de bioingeniería en el LEATYER que impliquen el uso de cultivos en suelo, garantizando que estos se den de forma exitosa como se demostró en la evaluación del sistema, aportando a la resolución de la problemática planteada en el proyecto lo cual permitirá respaldar el cumplimiento del objetivo del laboratorio

## **10 Recomendaciones**

En caso de agregar componentes al sistema electrónico de la automatización de riego se debe tener en cuenta la capacidad máxima del controlador y la fuente a la que este debe estar conectado como se mencionó en el diseño preliminar del sistema.

Al hacer la implementación de las demás electroválvulas, se recomienda intercalar su encendido y apagado de tal forma que se reduzca el consumo de corriente en el mismo momento, teniendo en cuenta el límite de potencia de las fuentes de alimentación y la conexión de otros sistemas a las mismas fuentes en el LEATYER, esto con el fin de evitar inconvenientes en el funcionamiento de los sistemas o daños en los mismos, y también teniendo en cuenta la posibilidad de que a futuro se realicen más proyectos que también requieran de la disponibilidad de energía.

Se debe seguir la guía de mantenimiento, cuidado y recomendaciones del manual de usuario para así garantizar el correcto funcionamiento y durabilidad de las camas elevadas, sistema de riego automatizado y sistema de monitoreo de pH.

## 11 Bibliografía

- Abd-Elmabod, S. K., Jordán, A., Fleskens, L., Phillips, J. D., Muñoz-Rojas, M., van der Ploeg, M., Anaya-Romero, M., El-Ashry, S., & de la Rosa, D. (2017). Modeling Agricultural Suitability Along Soil Transects Under Current Conditions and Improved Scenario of Soil Factors. In *Soil Mapping and Process Modeling for Sustainable Land Use Management*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805200-6.00007-4>
- Abello, N. (2020). Los aportes de los modelos educativos en Bogotá d.c., en el desarrollo de la agricultura urbana y su contribución al sistema social, económico y ambiental en pro de la sostenibilidad (pp. 5–13). [http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/8148/MGU\\_tesis\\_au\\_2020\\_salazar\\_N.pdf?sequ](http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/8148/MGU_tesis_au_2020_salazar_N.pdf?sequ)
- Acosta, C. (2020). *El suelo, un ser vivo*. Narraciones de la ciencia. <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag79266/El%20suelo%20vivo.pdf>
- Alabama Cooperative Extension System. (2018). Essential Plant Nutrients. Retrieved from <https://www.aces.edu/blog/topics/farming/essential-plant-elements/>
- Alao, O, Izang, A, Oyinloye, A, Amusa, A, & Erihri, J, (2022). *Smart Solar Powered Irrigation System* [PDF]. IIETA.
- Alhassan, E. A., Olasehinde, D. A., Musonda, A., & Odeniyi, O. M. (2020). Tensile and flexural behaviour of steel materials used in the construction of crop processing machines. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 445(1), 012044. doi:10.1088/1755-1315/445/1/012044
- Alzate, O. M. F. (2019, agosto 8). ESP8266 esp01 datasheet. <http://codigoelectronica.com:8000>. <http://codigoelectronica.com/blog/esp8266-esp01-datasheet>
- Amazon. (2023). *3pcs analog capacitive soil moisture sensor V1.2 wide voltage corrosion resistant with cable for Arduino Raspberry Pi*. Amazon.es: Bricolaje y herramientas. <https://www.amazon.es/Capacitive-Moisture-Corrosion-Resistant-Raspberry/dp/B07FLR13FS>
- Amazon. (2023). *DC Converter with Battery Clip 12V 24V to 5V 8A USB Power Adapter Buck Regulator Charger, 4 Ports Automatically Identify shunt Charging, Suitable for iPhone Android Samsung Galaxy S10 s9 Plus*. <https://n9.cl/fixgz>

- Angadi, S. V., & Jackson, R. L. (2022). A critical review on the solenoid valve reliability, performance and remaining useful life including its industrial applications. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106231. doi:10.1016/j.engfailanal.2022.106231
- Angeles, F. A. (2019). *Sensor* (12th ed., Vol. 6, Ser. 21-22). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Araneda, M. (2022). Frutas Y Hortalizas (Verduras): Composición Y Propiedades. Retrieved from <https://www.edualimentaria.com/frutas-hortalizas-frutos-secos-composicion-propiedades>
- Arduino. (2022). Getting started with the Arduino IOT Cloud: Arduino documentation. Retrieved from <https://docs.arduino.cc/arduino-cloud/getting-started/iot-cloud-getting-started>
- Arnandha, Y., Satyarno, I., Awaludin, A., Irawati, I. S., Prasetya, Y., Prayitno, D. A., . . . Amalia, A. (2017). Physical and mechanical properties of WPC board from Sengon sawdust and recycled HDPE plastic. *Procedia Engineering*, 171, 695-704. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.412
- Ather, H. (2019). How to determine the modulus of rupture. Retrieved from <https://sciencing.com/determine-modulus-rupture-12046932.html>
- Autodesk. (2022). How to perform a static stress simulation with wood materials in Fusion 360. Retrieved from: <https://knowledge.autodesk.com/support/fusion-360/troubleshooting/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-to-perform-a-static-stress-simulation-with-wood-materials-in-Fusion-360.html>.
- Banco mundial. (2020). Población urbana (% del total) - Colombia | Data. Datos.bancomundial.org. Retrieved from <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=CO>.
- Bejar, J., Bernal, L., Villaroel, M., & Choque, M. (2022). Plan de monitoreo de agua y suelos - researchgate. [https://www.researchgate.net/profile/Bernal-Ludwing/publication/356441999\\_plan\\_de\\_monitoreo\\_de\\_agua\\_y\\_suelos\\_en\\_la\\_microcuenca\\_piuray-ccorimarca/links/619bde6061f0987720c588c4/plan-de-monitoreo-de-agua-y-suelos-en-la-microcuenca-piuray-ccorimarca.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bernal-Ludwing/publication/356441999_plan_de_monitoreo_de_agua_y_suelos_en_la_microcuenca_piuray-ccorimarca/links/619bde6061f0987720c588c4/plan-de-monitoreo-de-agua-y-suelos-en-la-microcuenca-piuray-ccorimarca.pdf)

- Benavides B., O. E., Barraza A., F. V., & Navia E., J. F. (2017). Efecto del riego por goteo y exudación sobre el rendimiento de hortalizas en clima frío. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 108. <https://doi.org/10.22267/rcia.173401.67>
- Bilbao Electronics. (2023). *Módulo Relé 5V, 8 canales con optoacoplador, Activación en Bajo Nivel*. Módulo Relé 5V, 8 canales con optoacoplador, activación en bajo nivel. <https://www.bilbaoelectronics.com/176/rele-5v-8-canales-optoacoplador-bajo-nivel>
- Binti, N. (2020). Analysis on Mechanical Properties of Waste High Density Polyethylene (HDPE) Plastic [PDF]. Tronoh: Universiti Teknologi Petronas.
- Blynk. (2023). Blynk IOT platform: For businesses and developers. Retrieved from <https://blynk.io/>
- Blynk. (2023). Pricing: Blynk IOT Platform. Retrieved from <https://blynk.io/pricing>
- Botland. (2023). *Dfrobot gravity - ph analog sensor/Meter Pro*. BOTLAND. <https://botland.store/gravity-temperature-sensors/17652-dfrobot-gravity-ph-analog-sensormeter-pro-v2-5904422346225.html>
- Cadena, D. C. (2019). Guía Didáctica para Diseño y Construcción de Estructuras de Guadúa (GaK) y otros Bambúes. Quito ; Red Internacional del Bambú y Ratán (INBAR).
- Casiopea. (2015). HDPE, Polietileno de Alta Densidad [PDF].
- Castro, A., & Olarte, J. (2022). Desarrollo de un prototipo de sistema acuapónico para producción de Lechuga Crespa *Lactuca sativa* y crecimiento de Trucha Arcoíris *Oncorhynchus mykiss* en la finca El papayo en el municipio de Cóbbita, Boyacá. Universidad El Bosque. <http://hdl.handle.net/20.500.12495/9886>
- Carrera, F. R. F., Chadrina, O., Velasco, J. M., Blacio, B. T., & Orellana, Y. D. V. G. (2019). Prototipo de un sistema de riego automatizado en árboles de cacao (*Theobroma cacao*) controlado vía internet con dispositivos móviles. *Avances: Investigacion En Ingenieria*, 16(2), 93–106. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7855018>

- Chethan, R., Damodharan, G., Elumalai, K., Eswaran, C., & Manjula, C. (2018). *Smart Irrigation System for Agricultural Field Using Labview and IOT* [PDF]. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.
- Chiroque, J., & Castaño, R. (October 28). Caracterizacion de la Lechuga (*Lactuca sativa*.L.) en la unidad guayabal. Retrieved from <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/caracterizacion-lechuga-lactuca-sativa-t44527.htm>
- Civil's Guide. (2021). What is the Young's modulus of steel? Retrieved from <https://civilsguide.com/what-is-the-youngs-modulus-of-steel/>
- Colegio Mexicano de Ingenieros Civiles A.C., P. (2018, October). Mecánica de Materiales. CMICAC. <https://cmicac.com/2018/10/27/mecanica-de-materiales/>
- Cortes, V y Vargas, M. (2021). Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y monitoreo de variables ambientales mediante lot en los cultivos urbanos de la fundación mujeres empresarias Maria Poussepin. Universidad Católica de Colombia.
- Cotswold Teak. (2021). Understanding the properties of Teak Wood. Retrieved from <https://cotswoldteak.com/blog/understanding-the-properties-of-teak-wood/>
- Cruz, S. (2021). Análisis y evaluación del sensor LIDAR HPS 3D160 para detección del entorno (thesis). Dpto de ingeniería de sistemas y automatica, Sevilla.
- Caya, M. V., Ballado, A. H., Arrogante, K. C., Biagtan, R. A., Cueto, P. G., & Sarmiento, B. G. (2018). Automated irrigation system with the integration of internet of things for agricultural applications. *AIP Conference Proceedings*. doi:10.1063/1.5080862
- Darmono, Ma'arif, F., Widodo, S., & Pamungkas, S. (2019). Analysis of mechanical properties of timber materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 1387(1), 012093. doi:10.1088/1742-6596/1387/1/012093
- Decreto 1076, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 26 de mayo de 2015.
- DeKorne, C. (2022). Beam Stress and Strain: A Lesson in Statics. *The Journal of Light Construction*.

- Eduard Sapuyes, Jesús Osorio, Caori Takeuchi, Mauricio Duarte, Wilson Erazo. (2018, abril 23). Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua angustifolia kunth de pitalito, huila. Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 11 no , 97–111.
- ESA. (2009). Guidelines for the Design of Standing Workstations [Ebook] (p. 1). Ergonomic Systems Associates Incorporated.
- Escobar, J. (2021) Comunicación personal [entrevista virtual]
- ESP-IDF programming guide v5.0.1 documentation. (2022). Espressif.com. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.0.1/esp32/api-guides/wifi.html>.
- ESP8266 Arduino interface. (2017, diciembre 13). ElectronicsHub. <https://www.electronicshub.org/esp8266-arduino-interface/>
- Espinosa, M. P. (2021). Normatividad de productos agroecológicos colombianos exportables (thesis).
- Espressif Systems. (2023). ESP32 Series Datasheet. Espressif Systems.
- Esquivel, S., & Miranda, C. (2022). Implementación de un módulo didáctico para la instalación, comprobación y funcionamiento de medidores de baja tensión para el laboratorio de la carrera de electromecánica extensión la maná (thesis). Universidad Tecnica de Cotopaxi, La Maná.
- European Environmental agency. (2021). Soil moisture deficit. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/ims/soil-moisture-deficit>
- FAO (2020) *La importancia de la agricultura en la actualidad*, FAO.org. Available at: <https://www.fao.org/3/a0015s/a0015s04.htm>
- FAO. (2020). Land use in agriculture by the numbers. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/en/c/1274219/>.
- García, A., Macias, E., Loor, J., & Vega, M. (2021). Evaluación de Efectos de Soluciones Nutritivas Como Alternativa de insumo en la producción de Rábano (*raphanus sativus*)

- con Sistema Hidropónico Bajo Ambiente protegido. *Ecuadorian Science Journal*, 5(3), 320–340. <https://doi.org/10.46480/esj.5.3.163>
- Gatiboni, L. (2022). Soils & Plant Nutrients. In *North Carolina Extension Gardener Handbook* (2nd ed.). Raleigh, North Carolina: NC State University.
- Gómez, M.I. 2004. Fertilización estratégica en el manejo eficiente de la variable nutricional de los cultivos. Seminario de Investigación. Curso Fertilidad de Suelo. UNAL. 41 p
- GSC. (2022). Elevated Planter Box, 2' x 8'. Retrieved from <https://www.gardeners.com/buy/planter-boxes-cedar-raised-garden/8610895.html>
- GSC. (2022). Vegtrug Patio Garden: Gardener's supply. Retrieved from <https://www.gardeners.com/buy/vegtrug-patio-garden/8609777.html>
- Guide: Soil Moisture Recommendations for Flowers, Plants and Vegetables. Acurite.com. (2018). Retrieved from <https://www.acurite.com/blog/soil-moisture-guide-for-plants-and-vegetables.html>.
- Gutierrez, 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. Bogotá; Universidad El Bosque.
- Hanna instruments. (2021). Instrumentación para la Agricultura (pp. 3–5). Retrieved from [https://www.chgrupo3.com/cat/hanna\\_Agricultura\\_2021.pdf](https://www.chgrupo3.com/cat/hanna_Agricultura_2021.pdf)
- Hance Construction. (2020). Butler building renovation and durability of steel. Retrieved from <https://www.hanceconstruction.com/news/blog/butler-building-renovation-and-durability-of-steel>
- Hernández-López, Y., Rivas-Pérez, R., & Feliu-Batlle, V. (2020). Control automático de la distribución de agua en sistemas de riego: revisión y retos. *RIELAC*, 41(2). Retrieved November 4, 2021, from <http://scielo.sld.cu/pdf/eac/v41n2/1815-5928-eac-41-02-80.pdf>



Hidalgo, J. (2019). Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de licenciado en educación secundaria en la especialidad de filosofía y religión.

Homecenter. (2023). *Adaptador 1/2 Pulgada Terminal Conduit 10 und*. Homecenter.com.co. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/74891/adaptador-1-2-pulgada-terminal-conduit-10-und/74891/>

Homecenter. (2022). Maderas y tableros. Retrieved from <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/landing/cat10586/Maderas-Tableros-y-Herrajes>

Hrisko, J. (2020). Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing. New York, NY; Maker Portal LLC.

Huanca, J., Butrón, S., & Supo, F. (2022). (tech.). *Evaluación y monitoreo de la calidad ambiental del agua en el proyecto sistema de riego Canal N, provincia de Melgar– Puno, Perú* (Vol. 19, pp. 3–4). Tacna, Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann,.

IGAC. (2015). Tan solo el 0,3 por ciento de todo el territorio colombiano corresponde a áreas urbanas: IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Retrieved 26 November 2021, from <https://igac.gov.co/es/noticias/tan-solo-el-03-por-ciento-de-todo-el-territorio-colombiano-corresponde-areas-urbanas-igac>.

Indiamart. (2023). *Capacitive soil moisture sensor v2.0*. indiamart.com. <https://www.indiamart.com/proddetail/capacitive-soil-moisture-sensor-v2-0-23185895855.html>

Jamshedji, B. (2022). *Water your garden with IOT*. DroneBot Workshop. <https://dronebotworkshop.com/soil-moisture/>

Jaramillo, J. (2016). *Modelo Tecnológico Para El Cultivo de La Lechuga Bajo Buenas Prácticas Agrícolas En El Oriente Antioqueño*. <https://doi.org/10.21930/978-958-8955-10-0>

- Jones, D. R., & Ashby, M. F. (2019). Elastic moduli. *Engineering Materials* 1, 31-47. doi:10.1016/b978-0-08-102051-7.00003-8
- Kapil, S. (2019). Urbanisation to cause huge loss of prime farmland: UNCCD. Downtoearth.org.in. Retrieved 26 November 2021, from <https://www.downtoearth.org.in/news/agriculture/urbanisation-to-cause-huge-loss-of-prime-farmland-unccd-66562.i>
- Kececi, E. F. (2019). Case Studies. In *Mechatronic Components* (pp. 229–233). Elsevier.
- Kennard, N., & Bamford, R. (2019). Urban Agriculture: Opportunities and Challenges for Sustainable Development. *Encyclopedia Of The UN Sustainable Development Goals*, 1-14. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-69626-3\\_102-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-69626-3_102-1)
- Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big Data*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
- La agricultura urbana en Colombia. PanoramaCultural.com.co. (2020). Retrieved from <https://panoramacultural.com.co/medio-ambiente/7309/la-agricultura-urbana-en-colombia>.
- Langemeyer, J., Lopez, C., Mendoza, A., & Villalba, G. (2021, March 1). *Urban agriculture - a necessary pathway towards urban resilience and global sustainability?*. *Landscape and Urban Planning*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204621000189#s000>.
- Last Minute Engineers. (2022, febrero 5). ESP32 Pinout reference. Last Minute Engineers. <https://lastminuteengineers.com/esp32-pinout-reference/>
- Lizarazo, P. (2021) Comunicación personal [entrevista virtual]
- MathWorks. (2023). ThingSpeak for IOT Projects. Retrieved from <https://thingspeak.com/>

- National Instruments Corp. (2023). ¿Qué es labview? Programación Gráfica Para Pruebas y medidas. Retrieved from <https://www.ni.com/es-co/shop/labview.html>
- Madepinos. (2022). Madera inmunizada en pino pátula. Retrieved from <https://www.madepinos.com.co/madera-inmunizada/>
- Maderplastic. (2022). Madera plástica. Retrieved from <https://maderplastic.com/>
- Mańkowski, P., Laskowska, A., & Zbieć, M. (2018). Determination of bending strength and modulus of elasticity in the tangential and radial directions of yellow pine (*Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson). *Annals of Warsaw University of Life Sciences, Forestry and Wood Technology*, 69-74.
- Mateos Matilla, D., Lozano Murciego, Á, Jiménez-Bravo, D. M., Sales Mendes, A., & Leithardt, V. R. (2022). Low-cost edge computing devices and novel user interfaces for monitoring pivot irrigation systems based on internet of things and Lorawan Technologies. *Biosystems Engineering*, 223, 14-29. doi:10.1016/j.biosystemseng.2021.07.010
- MATRA. (2021). Importancia de la Agricultura tecnificada en la región. [Matra.co.cr](https://www.matra.co.cr/content/importancia-de-la-agricultura-tecnificada-en-la-region/). Retrieved from <https://www.matra.co.cr/content/importancia-de-la-agricultura-tecnificada-en-la-region/>.
- Magdoff, F., & Van Es, H. (2021). Ch 22. Soils for Urban Farms, Gardens and Green Spaces. [sare.org](https://www.sare.org/publications/building-soils-for-better-crops/soils-for-urban-farms-gardens-and-green-spaces/). Retrieved from <https://www.sare.org/publications/building-soils-for-better-crops/soils-for-urban-farms-gardens-and-green-spaces/>.
- Majid, M., Khan, J. N., Ahmad Shah, Q. M., Masoodi, K. Z., Afroza, B., & Parvaze, S. (2021). Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L., var. longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agricultural Water Management*, 245, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106572>
- Manzoor, A., Bashir, M. A., Naveed, M. S., Cheema, K. L., & Cardarelli, M. (2021). Role of different abiotic factors in inducing pre-harvest physiological disorders in radish (*Raphanus sativus*). *Plants*, 10(10), 2003. <https://doi.org/10.3390/plants10102003>

- Méndez, O., & Zúñiga, M. (2022). Desarrollo de un microtúnel con ambiente controlado para el cultivo de agraz (*Vaccinium meridionale*), en el laboratorio de experimentación agrotécnica y de energías renovables (LEATYER) del programa de bioingeniería en la Universidad El Bosque, campus Chía. Bogotá; Universidad El Bosque.
- Meter group. (2022). The researcher's complete guide to soil moisture. Retrieved from <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/education-guides/researchers-complete-guide-soil-moisture>
- Miernicki, E., Lovell, S., & Wortman, S. (2018). Raised Beds for Vegetable Production in Urban Agriculture. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 3(1), 180002. <https://doi.org/10.2134/urbanag2018.06.0002>
- Minagricultura. (2014). Modelo tecnologico para el cultivo de lechuga en el oriente antioqueño. Agrosavia.co. [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13758/75472\\_65800.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13758/75472_65800.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Mobilian, C., & Craft, C. B. (2022). Wetland soils: Physical and chemical properties and biogeochemical processes. *Encyclopedia of Inland Waters*, 157-168. doi:10.1016/b978-0-12-819166-8.00049-9
- Molina, D.V., Muñoz, L.A. y Molina, A.N. (2019) *Agricultura urbana, bienestar subjetivo y actitudes ambientales en el colectivo Agr oarte. Estudio de caso en la comuna 13, Medellín*. Available at: <https://revistavirtual.ucn.edu.co/index.php/RevistaUCN/article/view/1039/148>
- Mora, I. (2020, marzo 18). Cálculos Nitrógeno, cantidad de fertilizante a aplicar Interpretacion de Analisis de suelos. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=bQ3aDtCFxKg>
- Mora, I. (2020, julio 1). Cómo hacer un Plan de Fertilización Completo? Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=PLevl9cMfO4&t=3s>

- Moreno-Maroto, J. M., & Alonso-Azcárate, J. (2022). Evaluation of the USDA soil texture triangle through Atterberg limits and an alternative classification system. *Applied Clay Science*, 229, 106689. doi:10.1016/j.clay.2022.106689
- Mouser Electronics, (2022). *Development boards: Past, present, and posterity*. Elektor. <https://www.elektormagazine.com/news/development-boards-past-present-and-posterity>
- Obaideen, K., Yousef, B. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IOT. *Energy Nexus*, 7, 100124. doi:10.1016/j.nexus.2022.100124
- Olayiwola, B. (2023). Solid waste disposal and their impacts on the soil. *Geotech4All*, pp. 1–1.
- OPS. (2022). High density polyethylene (HDPE). Retrieved from <https://osseoplastics.com/product/high-density-polyethylene-hdpe/>
- Ostos, C. A., & Vanegas, O. L. (2008). Diseño y construcción de un prototipo piloto para un sistema de supervisión y control semiautomático en la fertiirrigación de claveles en cultivos hidropónicos. Universidad de la salle, Bogotá.
- Parker, W. (2022, October 22). 7 main disadvantages of Pine Wood. Retrieved from <https://woodworkly.com/pine-wood-disadvantages/>
- Patel, K., Patel, S. (2016). *Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges* (Vol. 6, Issue 5). Faculty of Technology and Engineering-MSU.
- Perez, A., & Castro, C. (2014). Agricultura urbana y periurbana sin suelo, para veracruz, México. *Agroecología*, 9, 45–54.
- ProEmplas, comunicación personal. 2022.
- pH Sensor Accuracy. (2018). Retrieved from <https://m4knick.com/the-truth-about-ph-sensor-accuracy/>

- Pintuco. (2022). Pintura Impermeabilizante Madetec Vareta. Retrieved from <https://pintuco.com.co/productos/madetec-vareta/>
- Previsión meteorológica y clima mensual Chía, Colombia. Weather Atlas. Retrieved from <https://www.weather-atlas.com/es/colombia/chia-clima#rainfall>.
- Quarrington, J. (2022, October 18). *Plant Calculator*. ConCalculator. [https://concalculator.com/plant-calculator/#google\\_vignette](https://concalculator.com/plant-calculator/#google_vignette)
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas pH as a growth factor in plants. Core.ac.uk. Recuperado el 1 de noviembre de 2023, de <https://core.ac.uk/download/pdf/234019718.pdf>
- Rodrigo, J., Caballero, A., Salvati, L., & Senciales, J. (2022, March 2). *Sostenibilidad de los cultivos subtropicales: Claves para el manejo del suelo, el uso agrícola y la Ordenación del Territorio*. Revistas universidad de Granada. <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/22284>
- Rodriguez, M (2021) Comunicación personal [entrevista virtual]
- Rodriguez, M (2022) Comunicación personal [entrevista virtual]
- Rojas, M. (2019). Evaluación del desarrollo de la lechuga “lactuca sativa” en un sistema hidropónico recirculante aplicando dos soluciones nutritivas en base a microorganismos benéficos (MOBS) en el Cantón Paute-Azuay-Ecuador . Cuenca; Universidad Politécnica Salesiana.
- Ruiz A, J. C., Lozano O, D. A., & González M, J. S. (2021). Propiedades Físicas y mecánicas de la Madera Plástica para uso en estructura de atención y prevención de desastres de la “Esmic”. Ingeniare, (27), 31-39. doi:10.18041/1909-2458/ingeniare.27.6616

- Sela, G. Electrical conductivity of water and soil. Cropaia. Retrieved from <https://cropaia.com/blog/electrical-conductivity/>.
- Sharma, V. (2019). Soil moisture sensors for irrigation scheduling. Extension.umn.edu. Retrieved from <https://extension.umn.edu/irrigation/soil-moisture-sensors-irrigation-scheduling#neutron-probe-1869262>.
- Spira, N. (2021). What is the density of stainless steel? Retrieved from <https://www.kloecknermetals.com/blog/what-is-the-density-of-stainless-steel/>
- Silvestre, E. (2021). Interfaz de Usuario. Retrieved from <https://www.thebridge.tech/blog/interfaz-de-usuario>
- Soulis, K., Elmaloglou, S., & Dercas, N. (2015). Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. *Agricultural Water Management*, 148, 258-268. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.015>
- Stauffer, B., & Spuhler, D. (2020). Automatic Irrigation. Sswm.info. Retrieved from <https://sswm.info/sswm-university-course/module-4-sustainable-water-supply/further-resources-water-use/automatic-irrigation>.
- Suarez, N. (2022). Desarrollo de un prototipo funcional para el monitoreo y control de variables (humedad del suelo, pH del agua, temperatura del ambiente y luminosidad), asociadas al fertirriego del cultivo de tomate Cherry (*Solanum lycopersicum* var. Cerasiforme), de su etapa vegetativa, en Cota, Cundinamarca. Universidad El Bosque.
- Suconel. (2022). *Placa de Desarrollo IOT CH340 wi-fi nodemcu*. <https://suconel.com/product/placa-de-desarrollo-iot-nodemcu/>
- Swan Products LLC. (2022). How to install a Soaker Hose. Swan Hose. Recuperado de: <https://swanhose.com/blogs/soaker-hoses/how-to-install-a-soaker-hose>

- Tadesse, W., & Fidalgo Fonseca, T. (2022). Pinus patula plantations in Africa: An overview of its silvicultural traits and use under SDG. Conifers - Recent Advances. doi:10.5772/intechopen.104889
- Tangent. (2022). Everything to know about high-density polyethylene HDPE sheets. Retrieved March 4, 2023, from <https://tangentmaterials.com/everything-to-know-about-high-density-polyethylene-sheets/>
- Teak + Table. (2021). 6 irresistible reasons to buy teak outdoor furniture. Retrieved from <https://www.teakandtable.com/blogs/teak-furniture/6-irresistible-reasons-to-buy-teak-outdoor-furniture>
- Teja, R. (2021, febrero 17). Getting started with ESP32. ElectronicsHub. <https://www.electronicshub.org/getting-started-with-esp32/>
- Universidad El Bosque. (2018). Instalaciones Chía - Universidad El Bosque. Www.youtube.com. Instalaciones Chía - Universidad El Bosque
- University of Massachusetts Amherst. (2022). Water Quality for Crop Production. Retrieved from <https://aq.umass.edu/greenhouse-floriculture/greenhouse-best-management-practices-bmp-manual/water-quality-for-crop>
- Upadhyay, S., & Raghubanshi, A. (2020). Determinants of Soil Carbon Dynamics in urban ecosystems. *Urban Ecology*, 299-314. doi:10.1016/b978-0-12-820730-7.00016-1
- USA Garden Company. (2021). *Elevated garden boxes*. USA Garden Company. <http://www.usagardencompany.com/elevated-garden-boxes.html>
- US FUSION & Specialty Construction. (2022). How long does HDPE pipe last? and other frequently asked questions. Retrieved from <https://usfusion.com/blog/how-long-does-hdpe-pipe-last-and-other-faqs/>



- USU. (2019). Agricultural uses of water. Extension.usu.edu. Retrieved from <https://extension.usu.edu/waterquality/learnabouteurfacewater/usesofwater/agriculture>.
- Vanderbilt University. (2023). Radish. Vanderbilt University Medical Center. <https://www.vumc.org/cbmcs/radish>
- VegTrug. (2022.). Wall hugger vegtrug. Retrieved from <https://www.vegtrug.com/shop/classic-vegtrugs/wall-hugger-vegtrug/>
- Vera, J. R. (2020). Automatización de la válvula de control con actuador electra hidráulico para la mejora de precisión del área de filtración, ptar santa clara sedapal 2020” (thesis). Universidad Nacional Tecnológica, Lima Sur.
- Victoria State Government. (2021). What is soil?. Agriculture Victoria. Retrieved from <https://agriculture.vic.gov.au/farm-management/soil/what-is-soil>.
- Villa Ramírez, G. A., Giraldo Valencia, B., Orrego Cardona, M. L., Díaz López, L. M., Jaramillo Álvarez, B. E., & García Hinstroza, H. E. (2019). Evaluación comparativa de lechuga (*Lactuca sativa* L.) “Verónica” bajo condiciones controladas en dos métodos de producción. *Encuentro SENNOVA Del Oriente Antioqueño*, 4(1), 36–46. Recuperado de <https://revistas.sena.edu.co/index.php/Encuentro/article/view/2055>
- Water Science School. (2018). Irrigation methods: A quick look. Retrieved from <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/irrigation-methods-quick-look#overview>
- Wesco, 2022. Comunicación personal
- White, G. (2020). How can I weatherproof my steel fabrications? Retrieved from <https://blog.glwengineering.co.uk/how-can-i-weatherproofmysteelfabrications>
- Wokwi. (2023). *ESP32-dht22.ino* . <https://wokwi.com/projects/322410731508073042>

Xingsheng. (2023). *2W-025-08-normally open water solenoid valve*. solenoidvalvefactory.com.  
<https://www.solenoidvalvefactory.com/product/xsw-2w-solenoid-valve-normally-closed/2w-025-08-normally-open-water-solenoid-valve.html>