

Desarrollo de un Prototipo de Vehículo Móvil para el Monitoreo de la Humedad en Cultivos de  
Pimiento.

Nicolás Lizcano Pinzón

Juan Pablo Cortes Ulloa

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yennifer Yuliana Ríos Díaz

Ingeniera Mecatrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Este proyecto está dedicado a mis padres, Gloria y Rubén, cuyo sacrificio y apoyo incondicional han sido fundamentales, especialmente en los momentos más difíciles. A mi hermana, familia y amigos, por su constante apoyo y paciencia, que me han permitido culminar mi carrera. A todos aquellos que me han guiado y aconsejado, ayudándome a crecer tanto personal como profesionalmente.

*Nicolás Lizcano Pinzón*

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este camino. A mi madre y a mi abuela, gracias por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado. Su amor, sacrificio y constante aliento me han dado la fuerza para seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes. A mis amigos, por su comprensión, apoyo y paciencia a lo largo de este proceso. Su compañía y palabras de ánimo han sido fundamentales para mantenerme motivado y enfocado. Este trabajo de grado es un reflejo del esfuerzo y el apoyo de todos ustedes. ¡Gracias por ser parte de este viaje conmigo!

*Juan Pablo Cortés Ulloa*

### **Agradecimientos**

A Dios, por ser nuestra guía y otorgarnos sabiduría, fortaleza y perseverancia en la búsqueda de nuestras metas.

A la Universidad Industrial de Santander y a sus docentes, por su orientación y conocimientos compartidos durante nuestra formación.

A nuestros amigos, por las experiencias inolvidables vividas juntos.

A nuestra directora de proyecto, Yennifer Yuliana Ríos Díaz, por motivarnos a alcanzar la excelencia y por su invaluable apoyo y conocimientos.

¡Gracias a todos!

*Nicolás y Juan Pablo*

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Planteamiento de problema.....	12
2. Objetivos de la investigación .....	14
2.1 Objetivo general .....	14
2.2 Objetivos específicos .....	14
3. Justificación .....	15
4. Marco teórico.....	17
4.1 Tipos de Mediciones de Humedad Utilizados .....	17
4.2 Antecedentes .....	19
5. Desarrollo del proyecto.....	21
5.1. Empatizar .....	23
5.2. Definir. ....	30
5.3. Idear.....	33
5.4. Prototipar.....	43
5.5. Evaluar .....	63
Conclusiones.....	72
Recomendaciones .....	74
Referencias bibliográficas.....	76

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Fases de Design Thinking.....	21
<b>Figura 2.</b> Invernadero de pimiento etapa crecimiento vegetativo .....	26
<b>Figura 3.</b> Crecimiento completo de planta de pimiento .....	27
<b>Figura 4.</b> Cultivos de pimiento luego de la recolecta de frutos.....	28
<b>Figura 5.</b> Distancia entre surcos terreno plano.....	28
<b>Figura 6.</b> Nave de pimientos .....	29
<b>Figura 7.</b> Diseño de concepto del prototipo .....	42
<b>Figura 8.</b> Diseño de estructura de chasis desarmable con su extrusión .....	44
<b>Figura 9.</b> Diseño de la base de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica.	45
<b>Figura 10.</b> Diseño de la tapa de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica	46
<b>Figura 11.</b> Diseño de los laterales de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica .....	47
<b>Figura 12.</b> Diseño de la pared frontal de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica.....	47
<b>Figura 13.</b> Diseño de la pared trasera de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica.....	48
<b>Figura 14.</b> Diseño de los soportes de motor en el CAD Fusión 360 en vista isométrica.	49
<b>Figura 15.</b> Diseño de la pared trasera de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica.....	50
<b>Figura 16.</b> Diseño del sistema de inserción en el CAD Fusión 360 en vista isométrica..	50
<b>Figura 17.</b> Corte laser de las piezas en acrílico.....	51
<b>Figura 18.</b> Impresión 3d de las piezas en PLA .....	52
<b>Figura 19.</b> Esquema de montaje del prototipo .....	52
<b>Figura 20.</b> Montaje de soportes de motor con el controlador Lm298N.....	53
<b>Figura 21.</b> Montaje de Arduino Uno, sensor Shield V5 y el servomotor Mg945 .....	54
<b>Figura 22.</b> Montaje de la cremallera con el sensor de humedad en la pared acrílica de la guía.....	54

<b>Figura 23.</b> Montaje de servomotor Sg90 y sensor ultrasónico a la tapa en acrílica.....	55
<b>Figura 24.</b> Montaje completo con las conexiones correspondientes.....	55
<b>Figura 25.</b> Diagrama de flujo modo autónomo .....	57
<b>Figura 26.</b> Diagrama de flujo modo manual .....	58
<b>Figura 27.</b> Interfaz de la aplicación.....	58
<b>Figura 28.</b> Diseño preliminar del prototipo de invernadero vista isométrica.....	61
<b>Figura 29.</b> Diseño preliminar del prototipo de invernadero en vista superior .....	62
<b>Figura 30.</b> Disposición Final del Prototipo de Invernadero .....	62
<b>Figura 31.</b> Prueba de recorrido manual.....	64
<b>Figura 32.</b> Prueba de recorrido autónomo.....	65
<b>Figura 33.</b> Prueba en terreno irregular. ....	66
<b>Figura 34.</b> Prueba de recolección de datos.....	67

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Características dimensionales del invernadero .....	24
<b>Tabla 2.</b> Tabla comparativa del tipo de almacón .....	34
<b>Tabla 3.</b> Tabla Propiedades de material de la estructura.....	35
<b>Tabla 4.</b> Tabla de comparación del tipo de motor.....	36
<b>Tabla 5.</b> Tabla de comparación de baterías.....	37
<b>Tabla 6.</b> Tabla de comparación del sistema de inserción.....	39
<b>Tabla 7.</b> Tabla de comparación de las plataformas de control .....	40
<b>Tabla 8.</b> Costos totales del proyecto.....	68
<b>Tabla 9.</b> Costos totales subsistema estructural y de transmisión.....	69
<b>Tabla 10.</b> Costos totales subsistema eléctrico y electrónico .....	69
<b>Tabla 11.</b> Costos totales recursos humanos.....	70
<b>Tabla 12.</b> Costos totales Gastos adicionales.....	70

## **Lista de Apéndices**

**Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS**

**Apéndice A.** Cálculo del mecanismo Piñón-cremallera

**Apéndice B.** Código del prototipo

**Apéndice C.** Conexiones a detalle del prototipo

**Apéndice D.** Construcción a detalle del prototipo de invernadero

**Apéndice E.** Entrevista al agricultor

**Apéndice F.** Planos del prototipo

**Apéndices G.** Programación a detalle de la aplicación

**Apéndices H.** Selección de los componentes del prototipo

## Resumen

**Título:** Desarrolló de un prototipo de vehículo móvil para el monitoreo de la humedad en cultivos de pimiento.<sup>1</sup>

**Autores:** Nicolas Lizcano Pinzón y Juan Pablo Cortés Ulloa\*\*

**Palabras Clave:** Automatización, vehículo autónomo, monitoreo de humedad, Sensores, Simulación de cultivo.

**Descripción:** El proyecto surge como una innovación frente a la demanda de tecnología en la agricultura de precisión en Colombia Por lo que el presente proyecto se centró en el desarrollo, construcción y evaluación de un prototipo de vehículo móvil autónomo diseñado para monitorear la humedad en cultivos de pimiento. Con el objetivo principal de desarrollar un prototipo que minimice los gastos asociados al uso común de seguimiento de la humedad en cultivos, promoviendo una agricultura más sostenible en entornos regulados. Se llevaron a cabo pruebas para evaluar la precisión de las mediciones de humedad, la eficacia de la trayectoria de desplazamiento y la capacidad del vehículo para navegar de manera autónoma en el espacio confinado del invernadero. Los resultados mostraron que, teniendo en cuenta el protocolo de pruebas realizado, el equipo funcionó de manera adecuada y eficiente en el monitoreo de la humedad en el cultivo simulado de pimiento. Además, se analizaron los datos recopilados para determinar la consistencia de las mediciones y la cobertura efectiva del área de cultivo.

---

<sup>1</sup> Desarrolló de un prototipo de vehículo móvil para el monitoreo de la humedad en cultivos de pimiento.

\*\* Nicolás Lizcano Pinzón y Juan Pablo Cortés Ulloa

**Abstract**

**Title:** Development of a mobile vehicle prototype for monitoring humidity in pepper crops.<sup>2</sup>

**Authors:** Nicolas Lizcano pinzón & Juan Pablo Cortés Ulloa\*\*

**Keywords:** Automation, Autonomous vehicle, Humidity monitoring, Sensors, Crop simulation.

**Description:** The project emerges as an innovation in response to the demand for technology in precision agriculture in Colombia. Therefore, this project focused on the development, construction, and evaluation of an autonomous mobile vehicle prototype designed to monitor humidity in pepper crops. The main objective was to develop a prototype that minimizes expenses associated with common methods of humidity monitoring in crops, promoting more sustainable agriculture in controlled environments. Tests were conducted to evaluate the accuracy of humidity measurements, the effectiveness of the movement trajectory, and the vehicle's ability to navigate autonomously in the confined space of the greenhouse. The results showed that, considering the testing protocol implemented, the equipment functioned adequately and efficiently in monitoring humidity in the simulated pepper crop. Additionally, the collected data was analyzed to determine the consistency of measurements and effective coverage of the cultivation area.

---

<sup>2</sup> Development of a mobile vehicle prototype for monitoring humidity in pepper crops

\*\* Nicolás Lizcano pinzón & Juan Pablo Cortés Ulloa

## **Introducción**

La agricultura de precisión ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, impulsada por la necesidad de optimizar recursos y mejorar la eficiencia en la producción de alimentos (González-Dugo, 2016). En este contexto, el desarrollo de tecnologías autónomas para el monitoreo y gestión de cultivos se ha vuelto determinante para enfrentar los desafíos de la agricultura moderna (Sánchez-Gimeno & Martínez de la Casa, 2018). Por esta razón, el diseño y construcción de un prototipo de vehículo autónomo para el monitoreo de humedad en cultivos de pimiento representa un avance significativo en la aplicación de la robótica a la agricultura de invernadero (López-Granados y otros, 2019).

Este proyecto surge de la necesidad de desarrollar un sistema eficiente para el control de la humedad en cultivos sensibles como el pimiento, donde el manejo adecuado del agua es fundamental para la calidad y el rendimiento de la cosecha (Navarro-Hellín y otros, 2015). El vehículo autónomo propuesto tiene el potencial de impulsar la forma en que se monitorean y gestionan los cultivos en Colombia.

En este documento se detalla un análisis de los fundamentos teóricos detrás del diseño y operación de vehículos autónomos en entornos agrícolas, los antecedentes relevantes en el campo de la robótica agrícola, y la metodología propuesta para el desarrollo y prueba del prototipo (Gómez-Castro y otros, 2018). Se abordarán diversos aspectos, desde el diseño mecánico y la selección de sensores hasta la programación de los algoritmos de navegación y la implementación del sistema de monitoreo de humedad.

Este proyecto busca explorar cómo la integración de tecnologías robóticas y de sensores puede transformar la agricultura de precisión. La innovación en robótica y automatización puede ofrecer soluciones a los desafíos actuales en la producción agrícola (Rodríguez & Pérez, 2017).

Así se exploró cómo la robótica ofrece soluciones innovadoras a los desafíos actuales de diversos sectores tecnológicos, contribuyendo así al avance de la ciencia y la innovación (Martínez y otros, 2016). El objetivo es diseñar y construir un robot móvil capaz de operar de manera efectiva en terrenos complejos, abriendo nuevas posibilidades para la exploración, la inspección y el rescate en diferentes entornos.

## 1. Planteamiento de problema

En la actualidad, la automatización en el campo agrícola ha experimentado un crecimiento constante, convirtiéndose en una de las evoluciones más significativas de los últimos tiempos a nivel mundial. En este contexto, es fundamental desarrollar proyectos que permitan un mejor control de las actividades agrícolas. Para abordar desafíos relacionados con la humedad del suelo dentro de cultivos de invernadero, que afecta directamente al crecimiento de las plantas, es esencial entender que la problemática de la humedad del suelo no se limita solo a la escasez de agua, sino también al exceso de agua, que trae consecuencias drásticas a los cultivos. Un claro ejemplo de esto ocurre en los cultivos de tomate, pepino y pimiento, donde el agua acumulada en las plantas tiende a descomponerlas debido a un mal drenaje (Ortiz y otros, 2021). Al obtener información en tiempo real sobre el estado de los cultivos, es posible mejorar el uso de recursos, prevenir y controlar enfermedades y plagas de manera eficiente.

Actualmente, la mayoría de los invernaderos utilizan tecnología basada en sensores estáticos para el monitoreo de variables ambientales (Pérez, J. y otros, 2019), lo que representa altos costos de infraestructura y mantenimiento. Además, al ser equipos fijos, su cobertura es limitada y pueden presentar fallas. La implementación de un vehículo de monitoreo con sensores ofrece ventajas en términos de flexibilidad y economía, debido a que este reduce los costos de cableado e instalación comparados con soluciones cableadas.

Asimismo, la introducción de un sistema de prototipo móvil autónomo destinado a supervisar y mantener los niveles de humedad en las plantas no solo es una contribución significativa a la preservación del entorno, sino que también está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (Organización de las Naciones Unidas). Específicamente,

contribuye al ODS número 2: Hambre Cero, al optimizar el uso de recursos y prevenir enfermedades, lo que resulta en una producción agrícola más eficiente y sustentable (Objetivos de Desarrollo Sostenible 2, 2023). Además, este proyecto también se alinea con el ODS número 15: Vida de Ecosistemas Terrestres, ya que la introducción de tecnologías automatizadas y el monitoreo preciso de la humedad del suelo ayudan a reducir el consumo de agua y el uso innecesario de productos químicos, promoviendo así una gestión más efectiva de los recursos naturales y minimizando el impacto negativo en el ecosistema (Objetivos de Desarrollo Sostenible 15, 2023).

Como se expuso anteriormente, la implementación de un vehículo de monitoreo para la humedad es vital para un sostenimiento más adecuado de las plantas, mejorando así su calidad, reduciendo notoriamente los costos de la tecnología de sensores estáticos y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

A partir de lo anterior, se plantea la siguiente pregunta ¿Cómo afecta la implementación exitosa de un prototipo de vehículo móvil automatizado para el monitoreo eficiente de la humedad en cultivos de pimiento en la reducción de los costos operativos del proceso?

## **2. Objetivos de la investigación**

### **2.1 Objetivo general**

Desarrollar un prototipo de vehículo móvil autónomo que permita el monitoreo de la humedad en cultivos de pimiento con el propósito de reducir los costos operativos y promover la sostenibilidad económica.

### **2.2 Objetivos específicos**

Identificar los parámetros de mayor importancia en el monitoreo de cultivos de pimiento.

Diseñar un prototipo de vehículo móvil autónomo que permita el monitoreo de la humedad en plantas de pimiento.

Evaluar las estrategias para la comunicación y control del prototipo de vehículo móvil, centrándose en la creación de un lenguaje de programación que permita la interacción y control adecuado de las acciones del prototipo.

Analizar el funcionamiento del prototipo para el monitoreo de humedad de un prototipo de invernadero para cultivos de pimiento, con énfasis en la reducción de costos de producción.

### 3. Justificación

El desarrollo de un prototipo de vehículo móvil diseñado para monitorear la humedad en cultivos de pimiento se justifica principalmente por su potencial para reducir los costos a largo plazo en un invernadero. Al automatizar el monitoreo y gestión de la humedad, se mejora el uso de recursos hídricos y la eficiencia en la producción agrícola, lo que resulta en una disminución de los costos operativos y un aumento en la sostenibilidad del cultivo (Shamshiri y otros, 2018).

En primer lugar, este proyecto representa un avance significativo en el uso de la robótica para mejorar los procesos de producción agrícola. Un vehículo móvil automatizado recoge datos de humedad del suelo de forma más eficiente, precisa y constante, lo cual es determinante para mantener la salud y la productividad de los cultivos de pimiento (Duckett y otros, 2018).

Además, este tipo de plataforma robótica tiene potencial para aplicarse en múltiples contextos agrícolas, adaptándose a varios cultivos y entornos. Su capacidad de navegación autónoma en terrenos irregulares lo hace adecuado para operar en campos de difícil acceso, ampliando las posibilidades de monitoreo y recopilación de datos en áreas que tradicionalmente han sido un reto (Bechar & Vigneault, 2016).

Desde una perspectiva de diseño y desarrollo, la creación de este prototipo de vehículo móvil presenta desafíos en las áreas de mecánica, electrónica y programación. La necesidad de integrar sensores, sistemas de control y algoritmos de navegación eficientes impulsando la innovación y el avance del conocimiento en estas disciplinas, beneficiando así el campo de la robótica aplicada a la agricultura (Siciliano & Khatib, 2016).

Por último, al proporcionar una plataforma tangible para que estudiantes e investigadores exploren y experimenten con conceptos avanzados de robótica y automatización agrícola, por lo que se fomentó el desarrollo de nuevas soluciones y se contribuye al avance del conocimiento en

este campo (Arkin, 2009). Adicionalmente, la implementación de este prototipo puede tener un impacto social y ambiental positivo, al mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos de producción de pimiento (Gutiérrez y otros, 2020).

Estas razones resaltan la importancia y relevancia del desarrollo de un prototipo de vehículo móvil para el monitoreo de la humedad en cultivos de pimiento, destacando su potencial para impulsar el campo de la robótica agrícola y ofrecer soluciones prácticas y eficientes para mejorar la productividad y sostenibilidad de los sistemas de cultivo.

### **Alcances y especificaciones**

El prototipo vehicular de monitoreo debe tener la capacidad de desplazarse de forma autónoma por el área del prototipo del invernadero que simule el cultivo de pimiento para tomar mediciones en diferentes puntos y poder comunicar inalámbricamente estos datos, también que sea resistente a la humedad del ambiente, y unas dimensiones aproximadas de 15 cm x 10 cm x 15 cm.

#### **4. Marco teórico**

El pimentón es una especie dulce del género *Capsicum*, que pertenece a la familia de las solanáceas. Su origen botánico se sitúa en Sur América, específicamente entre Perú y Brasil (Bojacá & Monsalve, 2012). En Colombia, la producción de pimentón se concentra principalmente en los departamentos de Valle del Cauca, Santander, Huila y Antioquia, siendo el departamento de Valle del Cauca el de mayor producción con 9.286 toneladas, seguido por Norte de Santander, Santander y Antioquia. El promedio nacional de rendimiento es de 24,38 toneladas por hectárea (DANE, 2015). Esto destaca la importancia de mejorar el monitoreo de esta planta.

Antes de realizar un análisis detallado sobre el cultivo del pimentón, se debe conocer el proceso de producción. Al igual que en muchos cultivos, el proceso comienza con la siembra en un semillero, que proporciona la semilla necesaria para que crezca y se desarrolle durante aproximadamente 40 días. Posteriormente, las plantas se trasplantan a otro sitio con suelos fertilizados que cumplen con las características requeridas para la germinación y desarrollo del fruto.

El cultivo de pimientos bajo condiciones de humedad controlada requiere una serie de pasos fundamentales para asegurar un desarrollo adecuado de las plantas. Primero, se debe establecer un ambiente apropiado mediante el control de la humedad relativa en el área de cultivo. La humedad relativa ideal para el cultivo de pimientos varía según las etapas de crecimiento, pero generalmente se recomienda mantenerla entre el 50% y el 70% (DANE, 2015). Para lograr esto, se debe contar con un sistema de monitoreo y control de la humedad en tiempo real.

##### **4.1 Tipos de Mediciones de Humedad Utilizados**

Uno de los principales sistemas de medición y control en invernaderos incluye los robots móviles para monitoreo y las sondas de humedad, que son:

#### ***4.1.1 Sondas de Humedad***

Las sondas de humedad son instrumentos de medición que permiten determinar el contenido volumétrico de agua en el suelo. Consisten en un tubo que se entierra en el suelo y cuenta con sensores a diferentes profundidades para medir las características del suelo, con el fin de evaluar la humedad en distintos puntos del sistema radicular del cultivo (Martín, 2017).

Las sondas de humedad tradicionales ofrecen ventajas como monitoreo constante, fácil instalación y la posibilidad de obtener mediciones puntuales en ubicaciones específicas. Sin embargo, presentan limitaciones en términos de medición alternante, ya que requieren la distribución de múltiples sondas a lo largo del área de cultivo para obtener una visión general de la humedad.

#### ***4.1.2 Prototipos Robóticos Móviles***

Los prototipos robóticos móviles son dispositivos o sistemas diseñados para realizar mediciones o tareas de forma autónoma a lo largo del área de cultivo. Estos dispositivos suelen estar equipados con sensores de humedad del suelo y otros sensores complementarios, además de sistemas de navegación y comunicación para recopilar datos en áreas específicas del cultivo (Gonzalez-de-Santos y otros, 2017).

Entre las principales ventajas de los prototipos robóticos móviles se encuentra su capacidad para cubrir áreas extensas de cultivo de manera autónoma, proporcionando una visión general del estado hídrico del suelo. Esto resulta especialmente útil en cultivos de gran escala o terrenos irregulares, donde la distribución de sensores fijos puede ser insuficiente o ineficiente (Andújar y otros., 2019).

La movilidad de estos sistemas también permite la recolección de datos en puntos clave del cultivo, como áreas con pendientes o sectores con variabilidad significativa, lo que ayuda a identificar patrones y distribuciones de humedad más representativas.

## 4.2 Antecedentes

Para orientar el desarrollo del proyecto, se recopiló información relevante de investigaciones previas relacionadas con el tema. Se destaca el proyecto de Alvarado, que propone el estudio, diseño y construcción de un robot esférico para el monitoreo remoto de cultivos de palma de aceite. Este proyecto busca abordar la problemática de las enfermedades que afectan el punto de crecimiento de las plantas, que pueden llevar a su muerte. Los expertos indican que, al detectar la enfermedad a tiempo, una simple poda del área afectada junto con un control químico puede ser suficiente para su manejo. Para enfrentar esta problemática, se diseñó un robot esférico capaz de realizar monitoreo remoto de las plantaciones, desarrollado en cuatro etapas: la selección de una arquitectura de locomoción adecuada, la obtención del modelo matemático para simular el comportamiento del robot y diseñar un sistema de control que garantice la estabilidad y el movimiento guiado del robot, y finalmente, la construcción y validación del prototipo. (Alvarado, 2020)

Galarza Altamirano desarrolló un prototipo electrónico para el monitoreo de variables críticas en el crecimiento de cultivos aeropónicos, como temperatura, pH y conductividad eléctrica. Este prototipo fue evaluado bajo condiciones controladas que imitan las usadas en los cultivos aeropónicos. El proyecto se organizó en varias etapas: una revisión de la literatura relacionada con las generalidades de los cultivos aeropónicos para contextualizar la investigación, la descripción de la metodología de diseño del prototipo, y la realización de pruebas para verificar el funcionamiento del prototipo y discutir los resultados de las mediciones (Galarza Altamirano, 2021).

Suárez Camacho desarrolló un prototipo funcional para el monitoreo y control de variables como la humedad del suelo, pH del agua, temperatura del ambiente y luminosidad, asociadas al

fertirriego del cultivo de tomate cherry en su etapa vegetativa en Cota, Cundinamarca. Este sistema incluye alarmas que informan sobre irregularidades en los valores de los sensores, orientado a pequeños agricultores (Suárez Camacho, 2023).

En conclusión, el monitoreo de la humedad mediante prototipos de vehículos móviles representa una mejora significativa respecto al proceso manual, demostrando que la implementación de estos dispositivos reduce los costos de monitoreo del cultivo.

## 5. Desarrollo del proyecto

Este capítulo describe la aplicación de la metodología Design Thinking en el desarrollo del robot vehículo móvil para el monitoreo de humedad. Se detallan las cinco etapas del proceso: Empatizar, Definir, Idear, Prototipar y Evaluar. Como se ve en la Figura 1.

*Figura 1. Fases de Design Thinking*



*Nota.* Tomado de: <https://fusiona.cl/blog/ux/5-esenciales-del-design-thinking/>

**Empatizar:** En esta primera etapa de diseño, se sumerge en el contexto del usuario y del entorno donde operará el robot. Se realizan entrevistas con agricultores, observaciones de campo en invernaderos y análisis de las condiciones del terreno. Esta fase implica recopilar datos sobre las necesidades específicas de monitoreo de humedad en cultivos de pimiento, los desafíos del terreno y las expectativas de los usuarios en cuanto a la operación y mantenimiento del robot. La empatía desarrollada en esta etapa sienta las bases para un diseño verdaderamente centrado en el usuario.

**Definir:** Tras la recopilación de información, se sintetizan los hallazgos para definir claramente el problema central. En este caso, se identifica la necesidad de un robot capaz de navegar eficientemente en terrenos irregulares de invernaderos, evitar obstáculos y realizar mediciones precisas de humedad del suelo. Se establecen los objetivos específicos del proyecto, como la capacidad de superar desniveles, la autonomía de operación y la precisión de las mediciones. Lo cual permite enfocar los esfuerzos de diseño en los aspectos relevantes para el usuario final.

**Idear:** Con una comprensión clara del problema, se generaron soluciones potenciales, utilizando técnicas de brainstorming y pensamiento lateral para conceptualizar diferentes configuraciones del robot, sistemas de locomoción, métodos de detección de obstáculos y estrategias de medición de humedad. En esta fase, se fomenta la creatividad, permitiendo la exploración de ideas innovadoras que puedan aportar valor añadido al diseño final y que se alineen con los objetivos del proyecto.

**Prototipar:** En esta etapa, las ideas establecidas se materializan en prototipos físicos o digitales. Se desarrollan versiones preliminares del chasis, se prueban diferentes ubicaciones de los motores y se implementan los sistemas de sensores y control. Los prototipos evolucionan desde simples maquetas hasta modelos funcionales que permiten probar aspectos específicos del diseño. Esta fase es iterativa, con cada prototipo proporcionando información valiosa para refinar el diseño. Se utilizan técnicas de prototipado rápido, como la impresión 3D, para acelerar el proceso de iteración.

**Evaluar:** La etapa final implica la prueba de los prototipos en condiciones que simulan el entorno real de operación. Se evaluó la capacidad del robot para navegar en terrenos irregulares,

evitar obstáculos y realizar mediciones de humedad. También, los resultados de estas evaluaciones se utilizan para identificar áreas de mejora y realizar ajustes en el diseño. Este proceso de evaluación se repitió hasta que el robot cumpla satisfactoriamente con todos los objetivos establecidos.

## **5.1. Empatizar**

En esta etapa inicial, se llevó a cabo un proceso de investigación y recopilación de información en el entorno de cultivo de pimiento. La metodología empleada se centró en tres aspectos fundamentales: entrevistas con los agricultores, un análisis del terreno y la caracterización de las condiciones del cultivo.

Durante las entrevistas, se identificaron las problemáticas que enfrentan los agricultores en el monitoreo de la humedad, lo que permitió una comprensión de sus necesidades y expectativas. Paralelamente, se realizó un estudio del terreno, observando las características del suelo, la disposición de los surcos y los obstáculos presentes en el invernadero. Esta información se complementó con una caracterización de las condiciones ambientales y las prácticas de cultivo para el pimiento. Este enfoque permitió una empatía con el usuario final y el contexto operativo, sentando las bases para un diseño adaptado a las necesidades del agricultor y las exigencias del entorno del cultivo. Con este propósito, se llevó a cabo una visita técnica a un invernadero especializado en la producción de pimiento. La entrevista se puede ver a detalle en el Apéndice E.

### **5.1.1. Características del invernadero de pimientos**

Los cultivos de pimiento del invernadero estudiado presentaron una disposición específica que afecta directamente al diseño del vehículo móvil.

**Tabla 1.** Características dimensionales del invernadero

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Largo de invernadero</b>	50	m
<b>Ancho de invernadero</b>	30	m
<b>Distancias entre surcos</b>	1,2	m
<b>Numero de hileras</b>	40	Unidades
<b>Distancia entre planta</b>	0,35	m

*Nota.* En la Tabla 1 se presentan las dimensiones del invernadero visitado y los parámetros dimensionales críticos para el cultivo adecuado de pimientos.

Los datos que se observan en la Tabla 1 proporcionan una visión de la estructura física del invernadero y la disposición espacial del cultivo, elementos fundamentales para el diseño del prototipo de invernadero.

La información recopilada durante la visita técnica proporciono una base sólida para establecer los requerimientos dimensionales del prototipo de vehículo móvil. Esto asegura su compatibilidad con el entorno de cultivo y su capacidad para navegar eficazmente entre los surcos sin comprometer la integridad de las plantas.

### **5.1.2. Proceso de Producción del Pimiento en Invernadero**

El ciclo de producción del pimiento en invernadero abarca aproximadamente dos meses desde la siembra hasta la cosecha inicial, seguido de un período de producción continua. Este proceso se caracteriza por varias etapas que requieren un manejo cuidadoso para mejorar el rendimiento y la calidad del cultivo.

### *5.1.2.1 Preparación y Siembra*

El ciclo comienza con la preparación del sustrato y la siembra de las semillas. Se utilizan bandejas de germinación con celdas individuales, llenadas con un sustrato estéril y rico en nutrientes. Las semillas se plantan a una profundidad de aproximadamente 0,5-1 cm y se mantienen en condiciones de alta humedad en esta etapa, entre 70%-80%, y temperatura controlada, generalmente entre 25-28°C (Smith & Johnson, 2023). Se implementa una bolsa de plástico que este alrededor de la planta, esto para evitar que el sol de en otras partes y la planta tenga un crecimiento más uniforme.

### *5.1.2.2 Germinación y Crecimiento vegetativo*

La germinación ocurre típicamente en 7-10 días. Durante este período, es importante mantener una humedad constante y una iluminación adecuada. Durante las siguientes 3-4 semanas, las plantas experimentan un rápido crecimiento vegetativo, como se observa en la Figura 2. En esta fase, se mantiene un régimen de riego y fertilización adecuado para promover un desarrollo robusto. La mejor temperatura para el crecimiento vegetativo se mantiene entre 20-25°C durante el día y 16-18°C durante la noche y tiene que mantenerse en un porcentaje de humedad del suelo de 60%-70% (Martínez-Ruiz y otros, 2024).

**Figura 2.** Invernadero de pimiento etapa crecimiento vegetativo

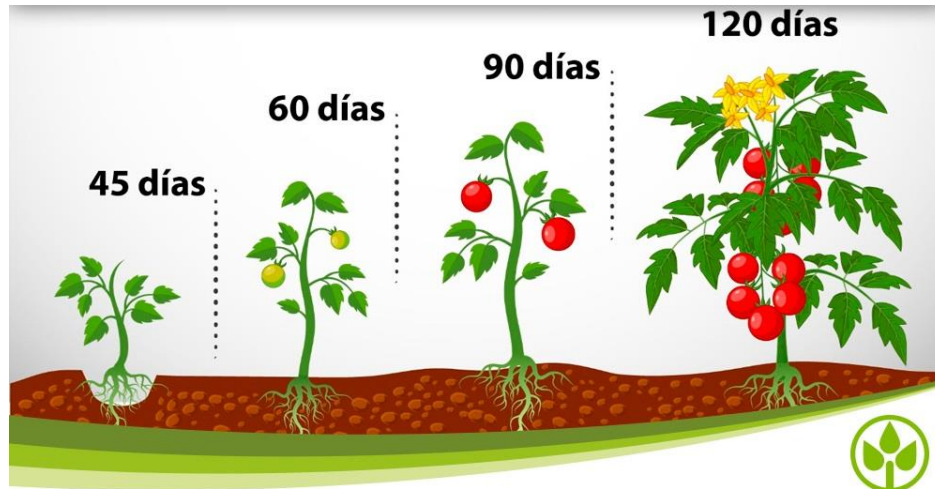


*Nota.* Foto en vereda fuente finca de Luis Alberto Camacho.

### 5.1.2.3 Floración y desarrollo del fruto.

Considerando el análisis de los agricultores, se conoce que los frutos se desarrollan durante las siguientes 2-3 semanas. La primera cosecha suele realizarse aproximadamente 60-70 días después del trasplante, dependiendo de la variedad y las condiciones de cultivo. Los pimientos se cosechan cuando alcanzan su tamaño completo y el color deseado, ya sea verde o en su estado de madurez completa. En el desarrollo del fruto, es recomendable mantener un porcentaje de humedad del suelo de 50%-60%. En la Figura 3 se ilustra el proceso de crecimiento que tiene un pimiento a través del tiempo.

**Figura 3.** Crecimiento completo de planta de pimiento



*Nota.* Imagen tomada de <https://agroenzymas.com/blog.html>

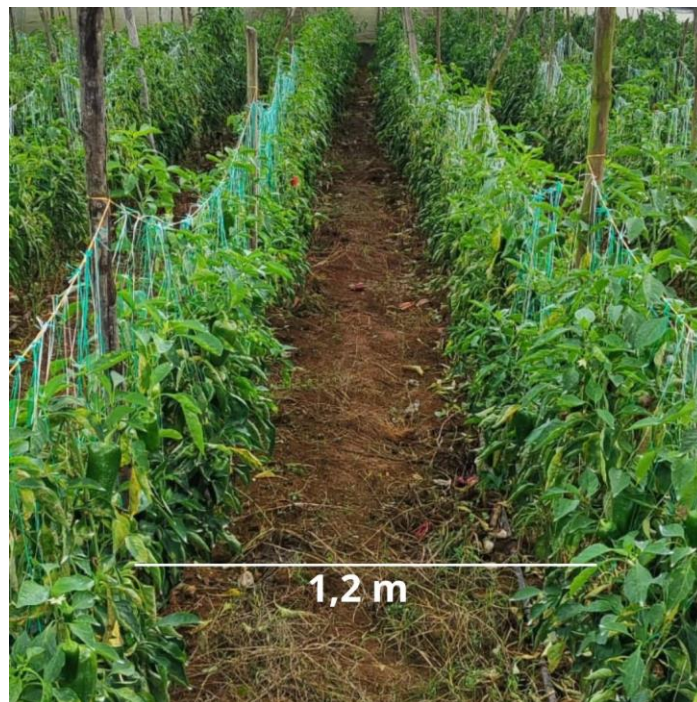
Después de la cosecha de los pimientos, los cultivos se someten a una serie de prácticas para preparar el terreno para la siguiente temporada de cultivo. Inicialmente, se eliminan los restos de plantas y frutos para prevenir la proliferación de plagas y enfermedades. Luego, se lleva a cabo un análisis del suelo para evaluar la necesidad de enmiendas y fertilización. En algunos casos, se implementan técnicas de rotación de cultivos para mejorar la salud del suelo y reducir la incidencia de patógenos específicos. Además, el suelo es labrado para mejorar su estructura y facilitar la incorporación de materia orgánica, lo que favorece la fertilidad del terreno para futuras siembras (López & Pérez, 2019). En la Figura 4. se observa los cultivos de pimiento luego de la recolecta de frutos.

**Figura 4.** Cultivos de pimiento luego de la recolecta de frutos



*Nota.* Foto en vereda fuente finca de Luis Alberto Camacho.

**Figura 5.** Distancia entre surcos terreno plano



*Nota.* Foto en vereda fuente finca de Luis Alberto Camacho.

**Figura 6.** Nave de pimientos



*Nota.* Foto en vereda fuente finca de Luis Alberto Camacho.

Durante todo el ciclo de producción, el monitoreo constante de la humedad del suelo es importante para mantener condiciones adecuadas de crecimiento. El sistema de riego por goteo se realiza mediante una cinta con orificios cada 10 cm. Estas gotean 1 litro cada 30 minutos, con una frecuencia de riego cada día y medio y una duración de 10 minutos por sesión. La distancia entre cada surco es de 1,2 metros, como se observa en la Figura 5. Este sistema es fundamental para mantener estos niveles de humedad. También el control de plagas es importante para que el ciclo de producción sea el mejor posible. Para esto, se hace una nave según las medidas del invernadero y se rodea de un material anti-plagas, como se ve en la Figura 6.

Este proceso de producción subraya la importancia de un monitoreo preciso y continuo de las condiciones ambientales, especialmente la humedad del suelo, justificando así el desarrollo de un prototipo de vehículo móvil para el monitoreo de humedad en cultivos de pimiento.

La producción de pimiento en invernadero es un proceso que requiere una planificación y una ejecución cuidadosa de diversas actividades a lo largo del ciclo de cultivo. Desde la siembra

hasta la cosecha, cada etapa demanda atención específica y tiempos de intervención oportunos para el crecimiento y la productividad de las plantas. El manejo adecuado de tareas como el trasplante, el colgado y amarrado, el deschupado y deshojado, así como el control de malezas y plagas, es fundamental para garantizar un desarrollo saludable del cultivo y producir frutos de alta calidad. La implementación de un sistema de monitoreo de humedad, como el propuesto en este proyecto, es una herramienta para mejorar la precisión en el riego, contribuyendo a una producción eficiente y sostenible de pimientos en entornos de invernaderos controlados.

## **5.2. Definir.**

En esta etapa de proceso de diseño, se procedió a sintetizar y analizar la información recopilada durante la fase de empatía. El objetivo principal fue definir el problema central y establecer los parámetros del proyecto. En un análisis de los datos obtenidos, se identificó la necesidad de desarrollar un robot capaz de navegar de manera eficiente en terrenos irregulares característicos de los invernaderos de pimiento, sortear obstáculos, medir la humedad del suelo y comunicarse a través de Bluetooth. Este proceso de definición permitió establecer requerimientos específicos del proyecto, abordando las posibles soluciones técnicas para estos desafíos y cumpliendo con las necesidades Planteadas por el agricultor y las condiciones específicas del entorno de cultivo.

Durante la evaluación del terreno y las condiciones de operación, se identificaron varios factores que influyen en el diseño y funcionamiento del prototipo. Estas condiciones observadas se enumeran en la siguiente lista:

- 1. Irregularidad del terreno.** Se detectó que la superficie de los surcos no es completamente plana, presentando ligeras elevaciones de 20 a 30 grados de inclinación cerca de las plantas. Estas variaciones en el relieve afectan la movilidad y estabilidad del prototipo.

**2. Presencia de obstáculos.** Se identificaron diversos obstáculos potenciales en las rutas de operación del prototipo, como ramas, pimentones, rocas, lo que requiere una estrategia de navegación adaptativa.

**3. Variabilidad en las rutas.** Debido a que la disposición de los surcos puede cambiar con cada terreno, no existe una ruta predefinida para el prototipo, por lo que deberá adaptarse a cada invernadero.

**4. La compactación variable del suelo.** El terreno mantiene una cierta firmeza por donde transita el personal logrando que sea más compacto, evitando hundimientos y facilitando las labores agrícolas; en las áreas donde se plantan cultivos, se evidencio que el nivel de firmeza es más blando y permeable que permita una mejor distribución del agua en el suelo, asegurando una absorción de las raíces de las plantas y promoviendo su crecimiento saludable.

**5. Exposición a elementos.** Los componentes electrónicos del prototipo están expuestos a condiciones ambientales variables que pueden afectar su funcionamiento y durabilidad. Específicamente, el polvo y la tierra presentes en el entorno que pueden encontrarse en diferentes estados ya sea húmedos o secos. Estos factores ambientales representan desafíos significativos para la durabilidad de los componentes, debido a que ingresan a las partes sensibles y causando daños e interfiriendo con las conexiones eléctricas.

Con las condiciones mencionadas, se plantean varias soluciones para hacer frente a los desafíos que representa cada una de ellas en el diseño. Teniendo en cuenta la problemática expuesta se presentan las siguientes alternativas:

**1. Para solucionar la condición de irregularidad del terreno.** Es importante seleccionar motores de alta potencia y llantas con un agarre que permitan al robot desplazarse adecuadamente. Estos componentes maximizan la estabilidad, maniobrabilidad y controlabilidad del robot en diferentes superficies. Los motores potentes proporcionaron la fuerza necesaria para superar obstáculos y terrenos difíciles, mientras que las llantas con buen agarre aseguraron un contacto seguro con el suelo, reduciendo el riesgo de deslizamientos y mejorando la tracción. Al elegir cuidadosamente estos componentes, se garantizó un desplazamiento fluido y seguro del robot, incluso en condiciones adversas del terreno.

**2. Para solucionar la condición de evasión de obstáculos con una navegación adaptativa.** Se utilizaron sensores de proximidad que permitieron al robot detectar y evitar automáticamente los obstáculos en su entorno. Estos sensores proporcionaron información en tiempo real sobre la distancia y la ubicación de los objetos cercanos, lo que permitió al robot tomar decisiones rápidas y ajustar su trayectoria para evitar colisiones.

**3. Para solucionar la ausencia de una ruta predefinida debido a la variabilidad en la disposición de los surcos en cada terreno.** Se implementó una comunicación vía Bluetooth para el control manual del prototipo. Esto permitió que un operador pudiera tener el control directo sobre el robot, ajustando su trayectoria de acuerdo con las condiciones específicas del terreno y la disposición de los surcos en cada invernadero. Además, para el control automático se programa la ruta predefinida dentro del invernadero. Lo que aseguró una navegación automática y precisa a lo largo de los surcos. De esta manera, el prototipo pudo funcionar tanto en modo automático, como en modo manual, donde el operador tenía el control directo a través de la comunicación vía Bluetooth.

**4. Para solucionar el desafío de la variabilidad en la firmeza del suelo y garantizar la realización de mediciones de humedad de manera móvil.** Se implementó un mecanismo de inserción controlado por un servomotor de potencia adecuada. Este mecanismo permitió enterrar el sensor de humedad sin dificultad en suelos de diversa consistencia, desde los más sueltos hasta los ligeramente compactos.

**5. Para solucionar el problema de que los componentes pudieran verse expuestos a condiciones ambientales.** Se decidió diseñar la carcasa del prototipo de manera que contuviera todos los componentes eléctricos en su interior, actuando como una caja protectora, asegurando que los componentes estuvieran resguardados de la humedad, polvo y otros elementos externos. Se utilizaron materiales resistentes a la intemperie, para evitar la entrada de agua o partículas de suciedad. Además, de poder desarmarse cuando sea necesario para realizar mantenimiento.

### **5.3. Idear**

En esta fase del proceso de diseño, con las condiciones identificados y las posibles soluciones del proyecto anteriormente mencionadas, se realizó una sesión de generación de ideas. Utilizando técnicas de brainstorming, en las cuales se conceptualizan diversas configuraciones para el prototipo, incluyendo diferentes sistemas de potencia, disposición del diseño, estrategias de medición de humedad y sistemas de procesamiento y transmisión de datos.

Para esto se establecen los principales sistemas para efectuar la selección, los cuales se presentan a continuación.

- Sistema estructural
- Sistema potencia
- Sistema de medición de humedad

- Sistema de procesamiento y transmisión de datos

### 5.3.1. Sistema estructural

**5.3.1.1 Tipo de armazón.** En la Tabla 2 se compara cada uno de los diferentes diseños, resaltando las ventajas y desventajas asociadas a su diseño y construcción.

**Tabla 2.** Tabla comparativa del tipo de armazón

Diseño	Ventajas	Desventajas
<b>Diseño de caja desarmable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Completamente sellada, pero desarmable</li> <li>• Alta protección de componentes</li> <li>• Resistente a ambientes hostiles</li> <li>• Fácil de diseñar</li> <li>• Fácil de limpiar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede ser más pesado</li> <li>• Posible dificultad en disipación de calor</li> <li>• Acceso limitado a componentes internos.</li> </ul>
<b>Diseño chasis modular</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil cambio de piezas.</li> <li>• Mejor distribución del espacio.</li> <li>• Buena disipación de calor</li> <li>• Fácil diseño</li> <li>• Es más liviano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Componentes descubiertos al medio ambiente.</li> <li>• Difícil ensamble llantas.</li> <li>• Sección inferior golpea las plantas del cultivo.</li> <li>• Estéticamente no tan bonito.</li> <li>• Sistema frágil</li> </ul>

**5.3.1.2 Tipo de material.** Para el material de la estructura, se seleccionó el material que proporcionará rigidez a la estructura, capaz de soportar las adversidades del entorno hostil donde estará trabajando. en la Tabla 3, se presentan algunos materiales para la fabricación.

**Tabla 3.** *Tabla Propiedades de material de la estructura*

<b>Material</b>	<b>Propiedades</b>
<b>Abs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente para piezas mecánicas y estructurales.</li> <li>• Buena resistencia a impactos y fatiga.</li> <li>• Requiere una temperatura de impresión más alta.</li> <li>• Costo relativo Alto</li> <li>• Buena resistencia al impacto</li> <li>• No biodegradable</li> <li>• Su módulo de elasticidad es de 1,7 GPa</li> <li>• Su densidad es de 1.01 g/m</li> </ul>
<b>Pla</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de imprimir y con buen acabado superficial.</li> <li>• Ecológico y biodegradable.</li> <li>• Menor resistencia a altas temperaturas.</li> <li>• Costo relativo medio</li> <li>• La resistencia al impacto es moderada</li> </ul>
<b>Acrílico (Pmma)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente claridad óptica.</li> <li>• Buena resistencia a la intemperie.</li> <li>• No es adecuado para impresión 3D, pero excelente para mecanizado.</li> <li>• Costo relativo medio</li> </ul>

Para el sistema estructural se consideró las diversas condiciones ambientales presentes en los invernaderos y la necesidad de proteger los componentes electrónicos, por lo tanto, se optó por un diseño de caja desarmable. Esta elección proporciona protección contra la humedad, el polvo y

otros factores ambientales que pueden afectar el funcionamiento del robot, a la vez que permite un fácil acceso para mantenimiento y modificaciones.

En cuanto a los materiales, se optó por una combinación estratégica de PLA y acrílico para mejorar el diseño, su costo y la funcionalidad del robot. El PLA se seleccionó para fabricar componentes que requieren un alto nivel de detalle y precisión, aprovechando su capacidad de impresión 3D, la cual permite crear piezas complejas con un buen acabado superficial, ideales para elementos como soportes y mecanismos. Por otro lado, se eligió el acrílico para la estructura, y así proteger el interior del prototipo con sus componentes electrónicos, debido a su resistencia a la intemperie y su facilidad de mecanizado. Además, su transparencia permite una fácil inspección visual sin necesidad de desmontarlo.

### 5.3.2. Sistema de potencia

5.3.2.1 *Tipo de motor.* En la Tabla 4 se presentan las ventajas y desventajas de las dos alternativas de motores que utilizan una fuente de alimentación de baterías (DC).

**Tabla 4.** Tabla de comparación del tipo de motor

Tipo de motor	Ventajas	Desventajas
<b>Motor con escobillas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy comerciales.</li> <li>• Más económicos.</li> <li>• Fácil mantenimiento (principalmente cambio de escobillas).</li> <li>• No requiere control electrónico para su funcionamiento.</li> <li>• El cambio de dirección se logra alternando la polaridad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vida útil limitada.</li> <li>• Mayor fricción generada.</li> <li>• Necesitan más mantenimiento.</li> <li>• Energía perdida como calor.</li> <li>• Baja eficiencia.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta confiabilidad.</li> </ul>	
<b>Motor Brushless</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor eficiencia.</li> <li>• Menor fricción.</li> <li>• Mantenimiento reducido.</li> <li>• Menor pérdida de energía en forma de calor.</li> <li>• Vida útil prolongada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más costosos.</li> <li>• Necesitan un control electrónico para funcionar.</li> </ul>

*5.3.2.2 Tipo de batería.* En cualquier vehículo eléctrico, uno de los componentes necesarios como fuente de energía, es decir, las baterías. Estas determinan tanto la autonomía como el costo del prototipo, los cuales dependen directamente del tipo y tamaño de las baterías. En la Tabla 5, se especifican las características principales de las opciones disponibles para la selección de la batería.

**Tabla 5.** Tabla de comparación de baterías

<b>Baterías</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Ion-Litio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta Densidad Energética.</li> <li>• Peso Ligero.</li> <li>• Larga Vida Útil.</li> <li>• Carga Rápida.</li> <li>• Tensión de salida estable durante la descarga.</li> <li>• Eficiencia alta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad a Temperaturas Extremas.</li> <li>• Riesgo de Sobrecarga y Sobre descarga.</li> <li>• Inestabilidad Química.</li> </ul>
<b>Plomo-ácido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo.</li> <li>• Altas tolerancias de sobrecarga.</li> <li>• Robusta y duradera.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy pesadas y voluminosas</li> <li>• Riesgo de sobrecalentamiento durante la recarga</li> <li>• Bajos ciclos de vida.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplia gama de tamaños y capacidades.</li> </ul>	
<b>Alcalinas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy comerciales.</li> <li>• Más económicos.</li> <li>• Larga vida de almacenamiento.</li> <li>• Facilidad de uso.</li> <li>• Seguridad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No Recargables.</li> <li>• Bajo Rendimiento en Aplicaciones de Alta Demanda.</li> <li>• Pueden ser más pesadas en comparación con otras baterías con la misma capacidad.</li> <li>• Baja Densidad Energética</li> <li>• Impacto Ambiental</li> </ul>

Para los motores se optó por los motores con escobillas debido a su menor costo y simplicidad en el control electrónico. Además, estos motores son ideales para prototipos, debido que facilitan ajustes rápidos y económicos durante su desarrollo. Y porque permite una fácil integración y modificación, en la etapa inicial cuando se realizan múltiples iteraciones con el prototipo.

Como fuente de energía, se seleccionaron baterías de ion-litio, ampliamente utilizadas en robots móviles debido a su excelente relación peso-potencia. Estas baterías recargables ofrecen una alta densidad energética, permitiendo una operación prolongada del robot sin comprometer su movilidad, además, se pueden recargar rápidamente.

### ***5.3.3. Sistema de medición de humedad***

*5.3.3.1 Sistema de inserción.* En la Tabla 6, se presentan las ventajas y desventajas de las opciones de los sistemas de inserción, cuya función principal es desplazar el sensor de humedad hasta introducirlo en el suelo y así poder medir la humedad. El objetivo de este proceso es

garantizar que el sensor esté en contacto directo con el suelo, permitiendo obtener datos exactos sobre la humedad.

**Tabla 6.** Tabla de comparación del sistema de inserción

<b>Sistema de inserción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Brazo robótico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta precisión en el posicionamiento del sensor.</li> <li>• Flexible y adaptable a diferentes tipos de terreno.</li> <li>• Capaz de realizar múltiples tareas además de la inserción del sensor.</li> <li>• Amplia gama de movimiento y control.</li> <li>• Requiere menos intervención manual una vez programado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo.</li> <li>• Complejidad en el control y programación.</li> <li>• Mayor mantenimiento.</li> <li>• Más susceptible a fallos mecánicos complejos.</li> </ul>
<b>Piñón-Cremallera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño sencillo y robusto.</li> <li>• Fácil de implementar y mantener.</li> <li>• Menor costo en comparación con el brazo robótico.</li> <li>• Buena durabilidad y resistencia.</li> <li>• Movimientos rápidos y precisos en línea recta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos adaptable a diferentes terrenos.</li> <li>• Limitada flexibilidad en el movimiento.</li> <li>• Puede requerir calibración frecuente.</li> <li>• Menor precisión en terrenos irregulares.</li> </ul>
<b>Tornillo de Avance</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta precisión en el movimiento lineal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad limitada.</li> <li>• Mantenimiento de la rosca.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño compacto y eficiente.</li> <li>• Buena relación costo-beneficio.</li> <li>• Bajo mantenimiento.</li> <li>• Fuerte y fiable bajo cargas constantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos flexible en comparación con el brazo robótico.</li> <li>• Requiere una instalación más precisa.</li> </ul>
--	---	---

Para el sistema de inserción, se usó el sistema de piñón-cremallera para insertar el sensor debido a su diseño sencillo y robusto. Se consideró que este sistema es ideal para prototipos debido a que se implementa rápida y económicamente. Además, permite movimientos lineales precisos, asegurando que el sensor de humedad se introduzca de manera exacta y consistente en el suelo.

#### *5.3.4. Sistema de procesamiento y transmisión de datos*

*5.3.4.1 Plataforma de control.* En la Tabla 7 se presentan las ventajas y desventajas de las opciones de plataformas de control, cuya función principal es controlar sus acciones.

**Tabla 7.** *Tabla de comparación de las plataformas de control*

<b>Plataforma de control</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Arduino</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de usar para principiantes.</li> <li>• Gran cantidad de shields y módulos disponibles.</li> <li>• Bajo costo.</li> <li>• Consumo de energía muy bajo.</li> <li>• Buen soporte para proyectos de control y sensores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de procesamiento limitada.</li> <li>• No tiene sistema operativo.</li> <li>• Memoria limitada.</li> <li>• Menos opciones de conectividad integrada.</li> </ul>

<b>Raspberry Pi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de procesamiento superior.</li> <li>• Sistema operativo completo (Linux).</li> <li>• Soporta múltiples lenguajes de programación.</li> <li>• Capacidad de conectividad (Wi-Fi, Bluetooth) integrada en modelos recientes.</li> <li>• Soporta aplicaciones más complejas (multimedia, servidor web, etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor consumo de energía.</li> <li>• Más caro que Arduino.</li> <li>• Más complejo para principiantes.</li> <li>• Mayor riesgo de corrupción de la tarjeta SD.</li> <li>• Requiere más tiempo para el arranque debido al sistema operativo.</li> </ul>
---------------------	---	---

Para el sistema de procesamiento y transmisión de datos, se usó la plataforma Arduino debido a su bajo costo, menor consumo de energía y la amplia disponibilidad de componentes en el mercado.

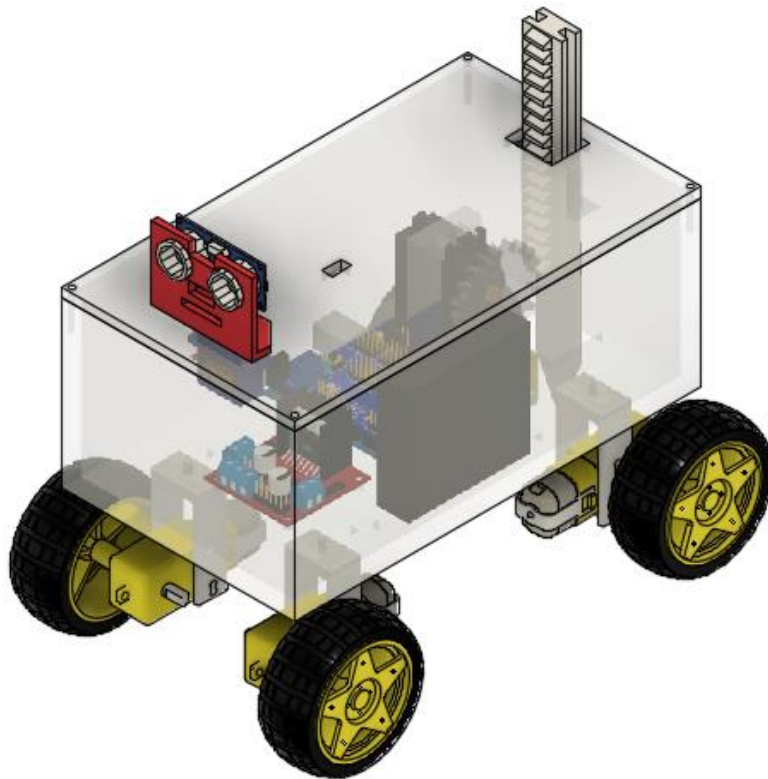
El en Apéndice H muestra la información y características de cada componente evaluado para el diseño del prototipo. Luego se elaboró una lista general de los componentes seleccionados.

- 1 interruptor ON/OFF
- 4 motorreductores con sus ruedas
- 1 sensor de ultrasonido HC-SR04
- 1 modulo Sensor de humedad HL-69
- 1 placa de extensión sensor shield v5
- 1 motor driver L298N

- 1 Arduino uno
- 1 modulo bluetooth HC-05
- 1 servomotor Mg945
- 1 servomotor Sg90
- 1 batería ion litio

En la Figura 7 se ilustra el diseño conceptual del prototipo, el cual se presenta como un vehículo móvil, con una estructura de caja desarmable, fácil de ensamblar, limpiar y mantener. Asimismo, se ha diseñado y construido utilizando componentes estándar y de bajo costo disponibles en el mercado, localizados en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

*Figura 7. Diseño de concepto del prototipo*



## 5.4. Prototipar

En esta fase, se especifica los componentes requeridos para cada sistema. Además, se implementará el diseño asistido por computadora (CAD) mediante la plataforma Fusión 360, seleccionada por su compatibilidad con tecnologías de impresión 3D, para facilitar la generación de modelos precisos y sus planos técnicos detallados para cada subsistema.

Considerando que el objetivo es desarrollar un prototipo, se prioriza la economía en el modelado y selección componentes, permitiendo así múltiples iteraciones sin afectar significativamente el presupuesto del proyecto principal.

A continuación, se presentan los sistemas principales del vehículo móvil de monitoreo de humedad en cultivos de pimiento, considerados en la fase de ideación. Los cuales son: Sistema estructural, Sistema potencia, Sistema de medición de humedad y Sistema de procesamiento y transmisión de datos.

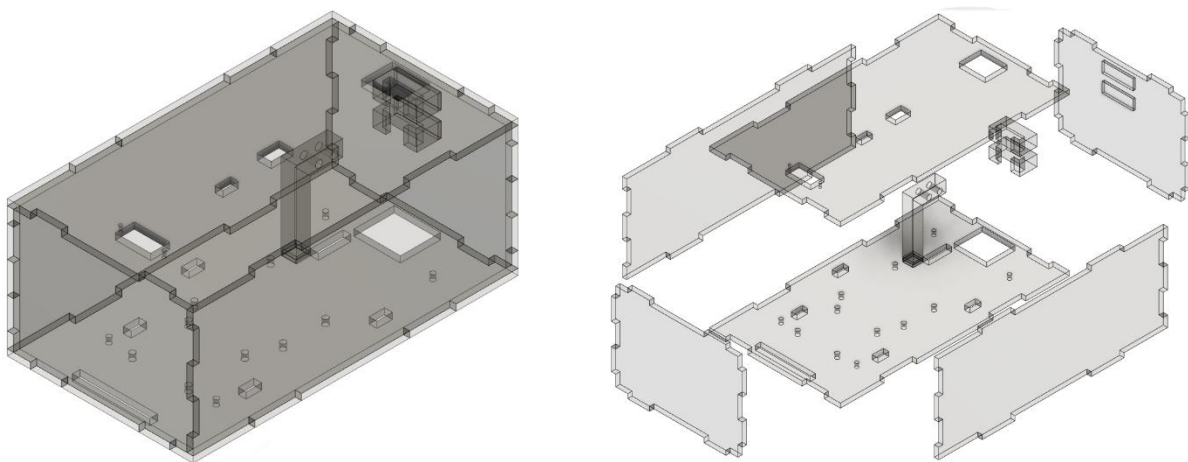
**5.4.1. Diseño del prototipo.** Para el desarrollo del prototipo, se dio prioridad a la economía y la facilidad de sustitución, de manera que se puedan realizar pruebas sin comprometer demasiado el tiempo o el presupuesto del proyecto principal. En busca de cumplir con este objetivo, se seleccionaron materiales económicos y adecuados para las condiciones de trabajo previstas en la fase de ideación. El chasis, con diseño de caja desarmable, se construyó utilizando acrílico de 4mm de espesor debido a su costo accesible y funcionalidad. Los soportes se fabricaron mediante impresión 3D con PLA, permitiendo una mayor precisión y personalización de las piezas. Esto asegura una estructura robusta, fácil de ensamblar y modificar según las necesidades del proyecto. Después de definir los materiales, se inició el diseño de los distintos componentes de la plataforma móvil.

#### 5.4.1.1. Estructura de chasis desarmable

Para la fabricación del chasis, se decidió utilizar acrílico debido a sus características destacadas, identificadas en la fase de ideación. Estas incluyen su resistencia a las condiciones ambientales, facilidad de mecanizado y transparencia, lo que permite una inspección visual eficaz. Para cumplir con los requisitos de maniobrabilidad y precisión, el vehículo móvil debe tener un diseño reducido para moverse fácilmente y con mejor maniobrabilidad entre las filas de plantas, considerando la medida de los surcos por donde pasa la gente. Un chasis compacto es esencial para acceder a áreas de difícil alcance sin dañar las plantas circundantes.

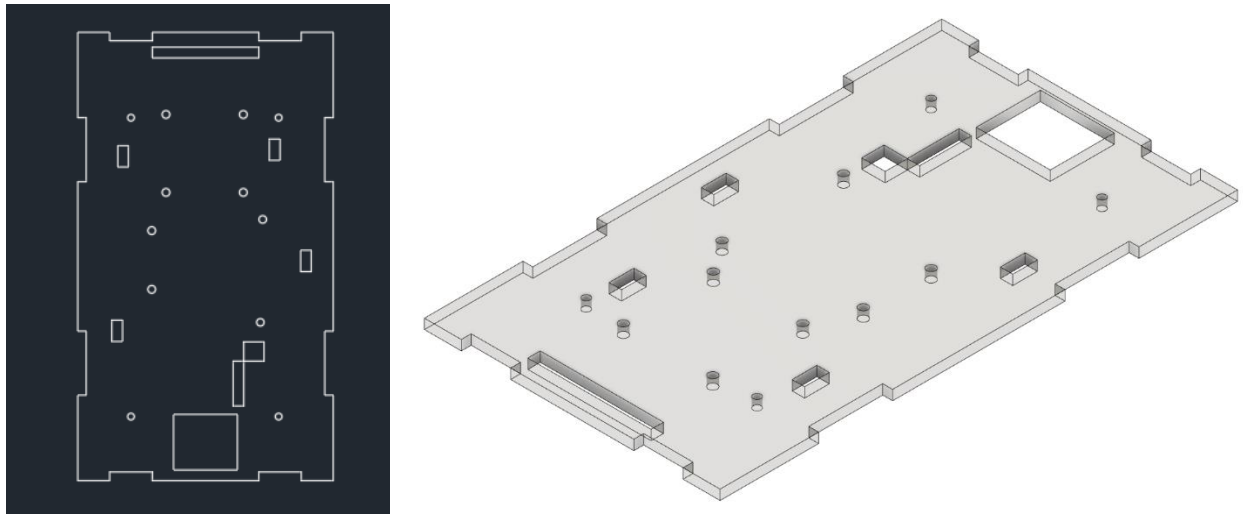
Además, se decidió mantener el grosor de las placas de 4mm ahorrando tiempo en el mecanizado con la cortadora láser, asegurando cortes precisos y un montaje eficiente. Y también considerando que la longitud de los tornillos para los componentes electrónicos tiene un mínimo de 10mm, lo que garantiza que las tuercas se puedan atornillar correctamente, proporcionando una estructura robusta y funcional para la plataforma móvil.

**Figura 8.** Diseño de estructura de chasis desarmable con su extrusión



El diseño del prototipo de robot móvil se realizó con la intención de que todas las partes se acoplen como una estructura modular, logrando facilidad en el montaje, como se muestra en la Figura 8. A continuación, se muestran los diseños hechos en acrílico.

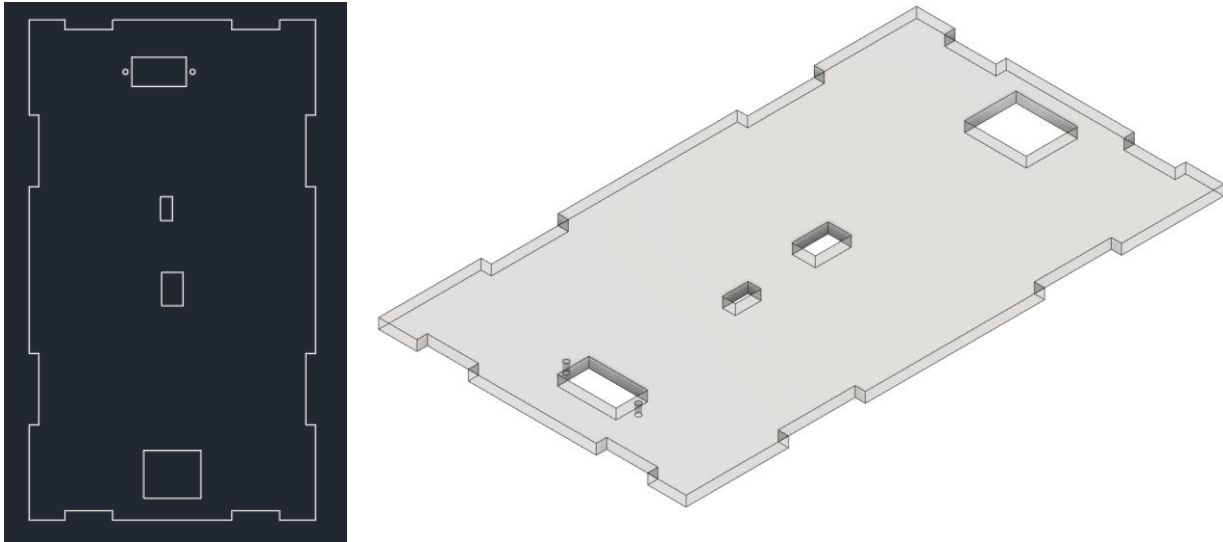
**Figura 9.** Diseño de la base de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica



En el diseño de la base mostrada en la Figura 9, se realizó un cálculo dimensional para garantizar una correcta disposición de todos los componentes. La configuración incluye cuatro perforaciones precisas para el ajuste de los soportes de los motores, cuatro puntos de anclaje para la fijación segura del Arduino uno, y otros cuatro para el montaje del controlador L298N.

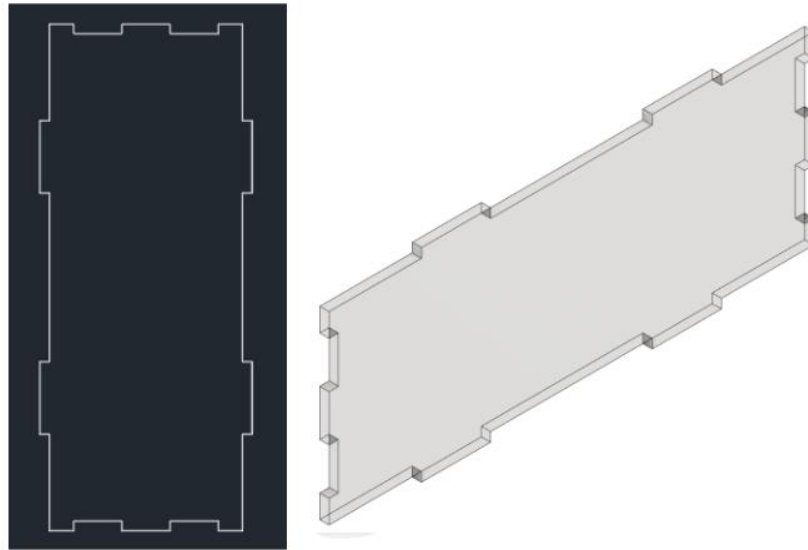
Además, se incorporaron cuatro aberturas estratégicamente ubicadas para facilitar el enrutamiento de los cables desde los motores hacia el L298N, asegurando una buena distribución del cableado. Finalmente, se hicieron unos orificios específicos para integrar el sistema de inserción, asegurando la integridad estructural y funcional del prototipo.

**Figura 10.** *Diseño de la tapa de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica*

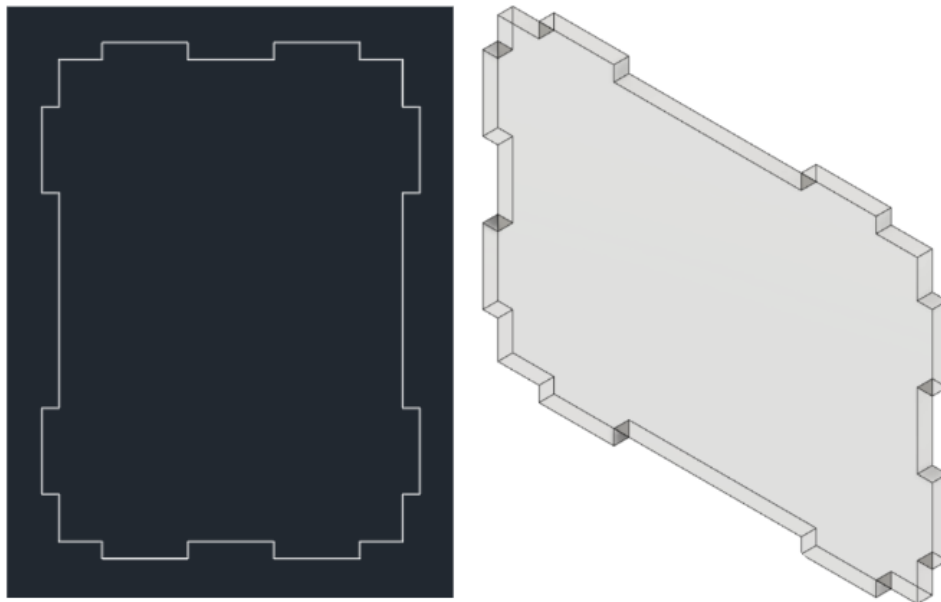


En el diseño de la tapa mostrada en la Figura 10, se realizó un cálculo dimensional para garantizar las medidas de todos los orificios. La configuración incluye una perforación para el ajuste del servomotor, un orificio para el interruptor, y otro más grande que hace parte del sistema de inserción. Además, se incorporaron una abertura para facilitar el enrutamiento de los cables del sensor ultrasónico.

**Figura 11.** *Diseño de los laterales de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica*

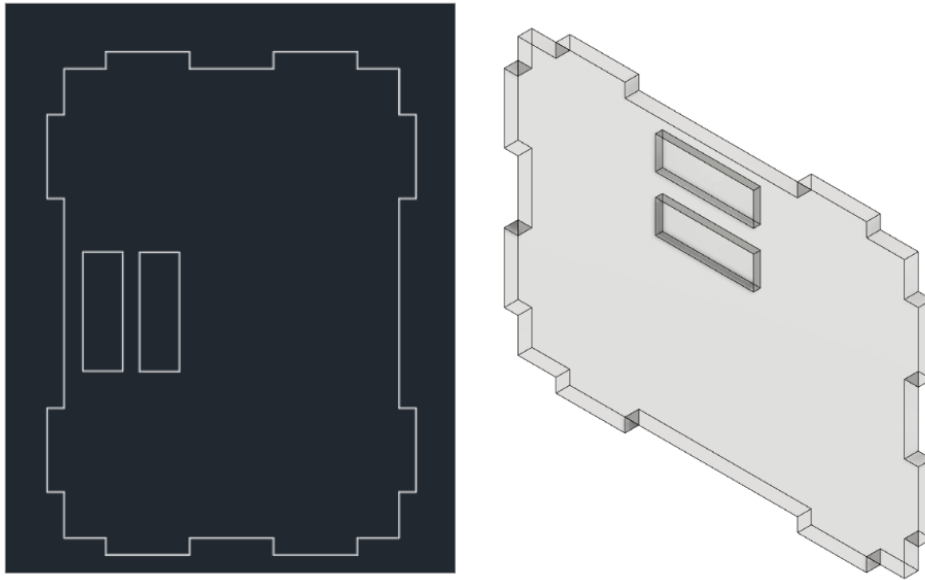


**Figura 12.** *Diseño de la pared frontal de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica*



En el diseño de los laterales y la pared frontal mostradas en las Figuras 11 y 12, solo se realizó un cálculo dimensional para garantizar la medida requerida para el acople a la estructura general, pero sin orificios.

**Figura 13.** Diseño de la pared trasera de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica



En el diseño de la pared trasera mostrada en la Figura 13, también se realizó un cálculo dimensional para garantizar la mejor ubicación de los orificios para fijar las guías necesarias en el sistema de inserción.

#### *5.4.1.2. Soportes y componentes para el sistema de inserción.*

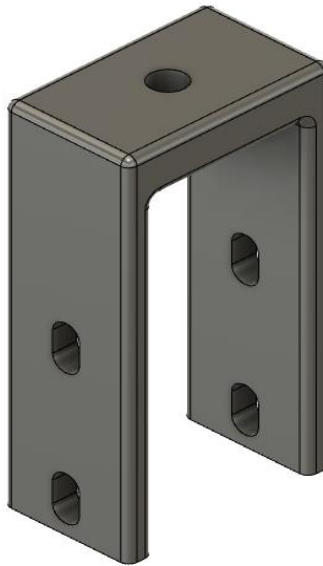
Para los soportes se optó por imprimir los soportes con filamento de PLA usando tecnología 3D, dado que permite precisión en la fabricación de las piezas. Además, las características del filamento garantizan la solidez requerida sin incrementar considerablemente el peso de la plataforma.

#### **Soportes de motor.**

El diseño de la base anteriormente mencionada presenta cuatro orificios que permiten fijar los soportes de los motores mediante tornillos y tuercas, garantizando su sujeción a la placa acrílica mediante un orificio en la parte superior de 6 mm de espesor. Además, el espacio en la pieza se

ajusta al ancho del motor, diseñado con precisión usando las medidas tomadas con ayuda de un pie de rey. Esta distancia también se refleja en las ranuras laterales de la placa acrílica donde se ajustan los soportes. Además, los laterales de la pieza tienen orificios para pasar un tornillo que atraviesa el motor, asegurándolo firmemente al soporte para evitar movimientos. Esta sección de la pieza tiene un espesor de 3 mm. Como se muestra en la Figura 14.

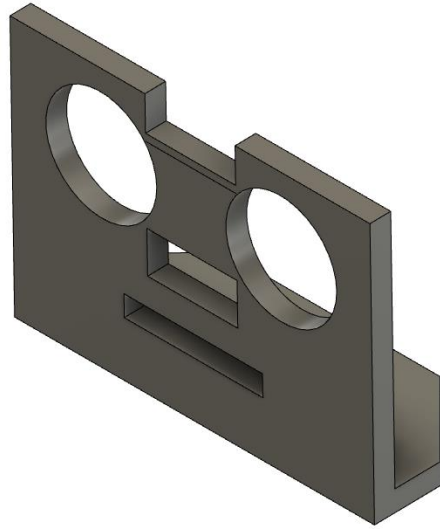
**Figura 14.** *Diseño de los soportes de motor en el CAD Fusión 360 en vista isométrica*



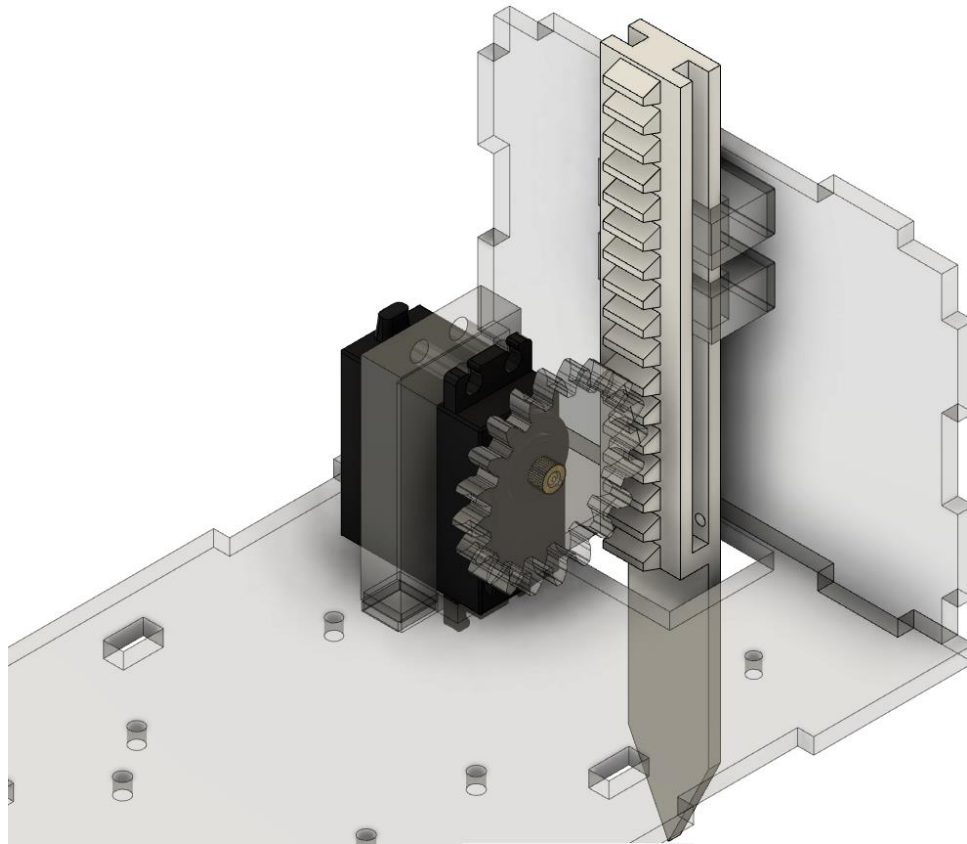
#### **Soporte de sensor de ultrasónico.**

Para el diseño de los soportes de ultrasonido, se utilizó un espesor uniforme de 3 mm en toda la pieza. Y al igual que con los soportes de motor, se tomaron las medidas de un sensor de ultrasonido para hacer los orificios en el diseño permitiendo acomodar el receptor y el transmisor en los orificios redondos, garantizando que la pieza encaje bien. Además, el soporte cuenta con varios orificios adicionales que se utilizaron para fijar al servomotor SG90.

*Figura 15. Diseño de la pared trasera de la estructura en el CAD Fusión 360 en vista isométrica*



*Figura 16. Diseño del sistema de inserción en el CAD Fusión 360 en vista isométrica*



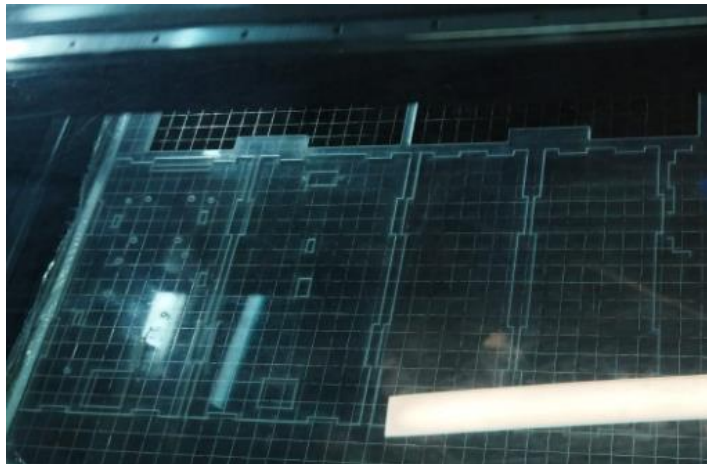
El sistema de inserción mostrado en la Figura 16, cuenta con un piñón acoplado al servomotor Mg 945 (el cual esta atornillado a un soporte en acrílico), el cual le proporciona la fuerza a la cremallera. Esta cremallera, que sigue una guía fijada (Dos guías en acrílico, pegadas a la pared) a la pared mencionada anteriormente, tiene dos orificios que permiten atornillar el sensor de humedad. Los cálculos para hacer este mecanismo piñón-cremallera se pueden ver en el Apéndice A.

En el Apéndice F se visualizan los planos a detalle de las partes y componentes que se imprimieron en 3d y se cortaron con láser.

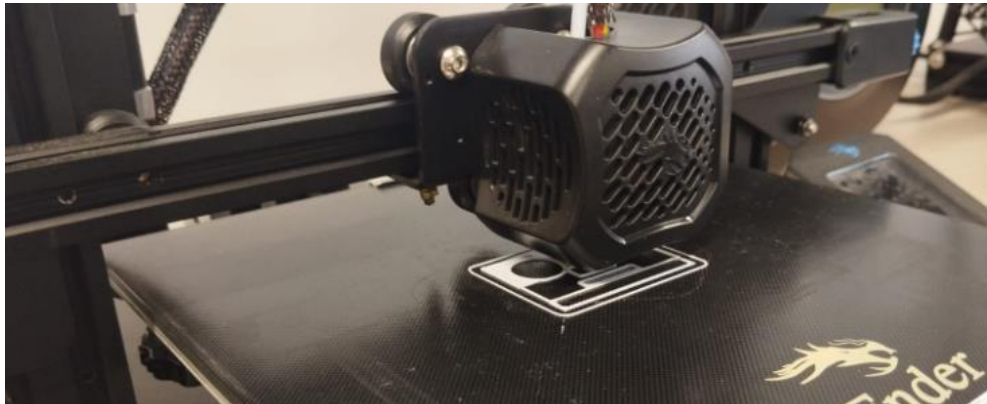
#### ***5.4.2. Construcción del prototipo***

Luego de diseñar las piezas, se procedió a su fabricación utilizando impresión 3D para las piezas que lo necesitaron y corte láser para los componentes en acrílico, mostradas en las Figuras 17 y 18. Este proceso se realizó en el laboratorio de diseño con la asistencia del auxiliar de diseño.

***Figura 17. Corte laser de las piezas en acrílico***

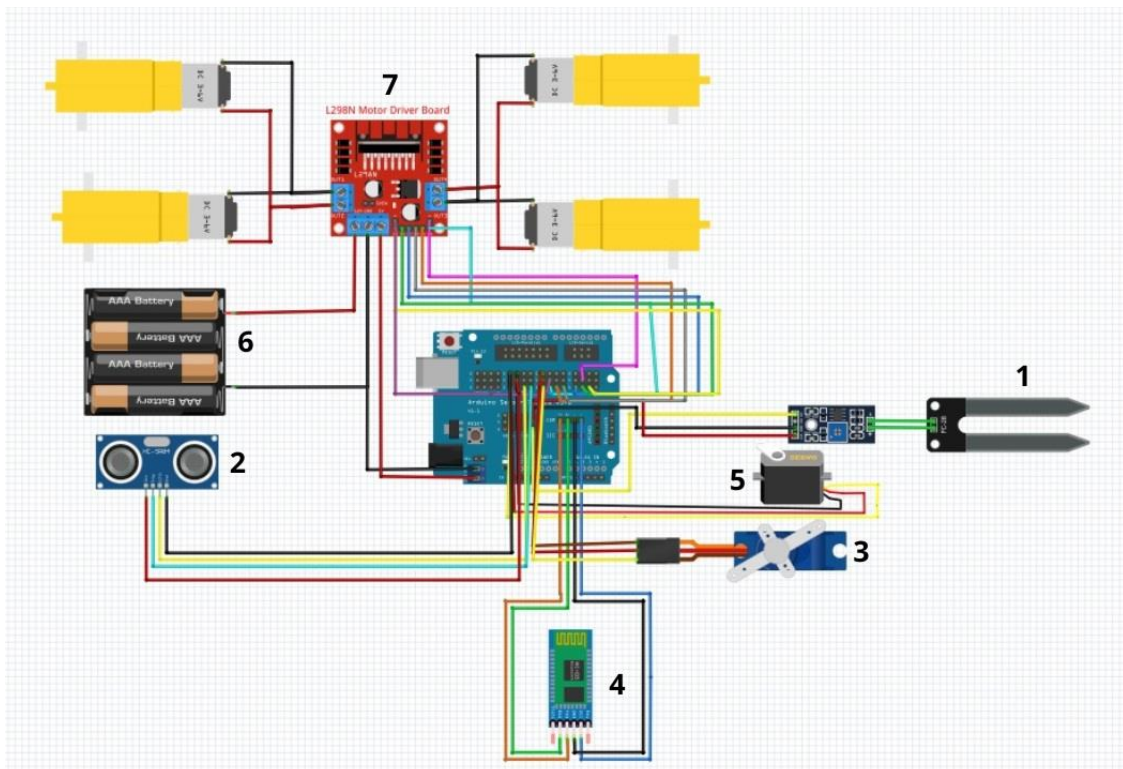


**Figura 18.** Impresión 3d de las piezas en PLA



Justo después de definidas y adquiridas las piezas del prototipo, se procede con el ensamblaje siguiendo el esquema de montaje detallado a continuación en la Figura 19.

**Figura 19.** Esquema de montaje del prototipo



Las conexiones de GND (cable negro) y VCC (cable rojo) están todas conectadas al sensor shield V5, compartiendo la conexión con el Arduino. El esquema presentado detalla las conexiones

básicas necesarias para el ensamblaje del sistema. Asimismo, se observan las conexiones del sensor de humedad con el LM393 (1), el sensor de ultrasonido (2), el servomotor SG90 (3), el módulo Bluetooth HC-05 (4), el servomotor MG945 (5), la batería de litio (6) y el controlador L298N (7). Las conexiones se pueden ver más a detalle en el Apéndice C.

### ***5.4.3. Montaje del prototipo***

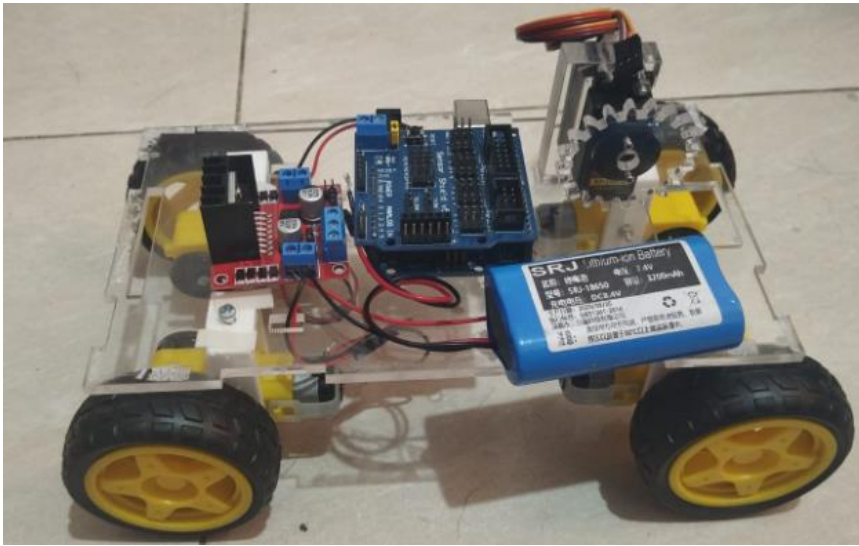
En primer lugar, se fijaron los soportes de motor en la base de acrílico. Después, se posicionaron los motores en los soportes y se aseguraron con tornillos y tuercas para mantenerlos estables. Luego, se instalaron las llantas en los ejes de los motores y se conectaron al controlador Lm298N, como se muestra en la Figura 20.

***Figura 20. Montaje de soportes de motor con el controlador Lm298N***



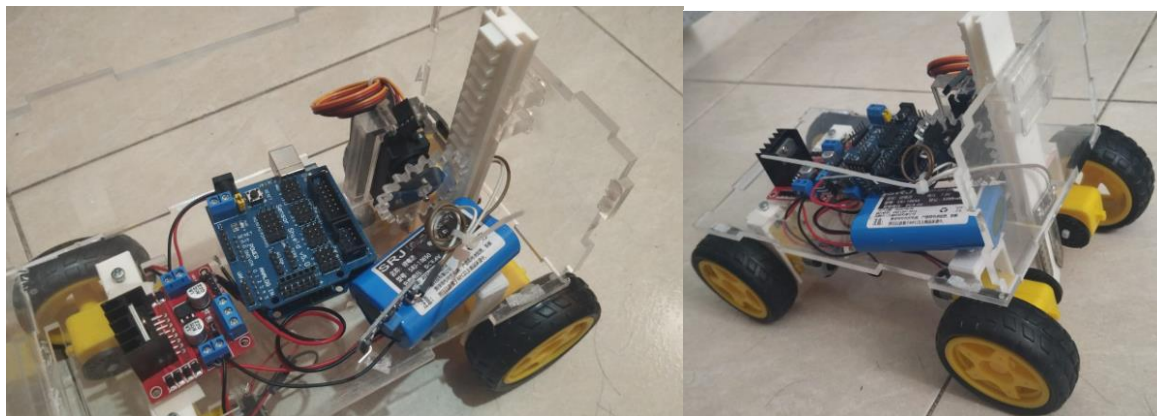
Una vez instalados los motores, el controlador de motor L298N y las ruedas, se procede a montar la placa Arduino UNO con el sensor shield V5 los cuales se fijaron a la base de acrílico utilizando tornillos de 15 mm con sus tuercas y también se instaló el servomotor Mg945 con su piñón, y el soporte de acrílico correspondiente para fijarlo, como se observa en la Figura 21.

**Figura 21.** Montaje de Arduino Uno, sensor Shield V5 y el servomotor Mg945

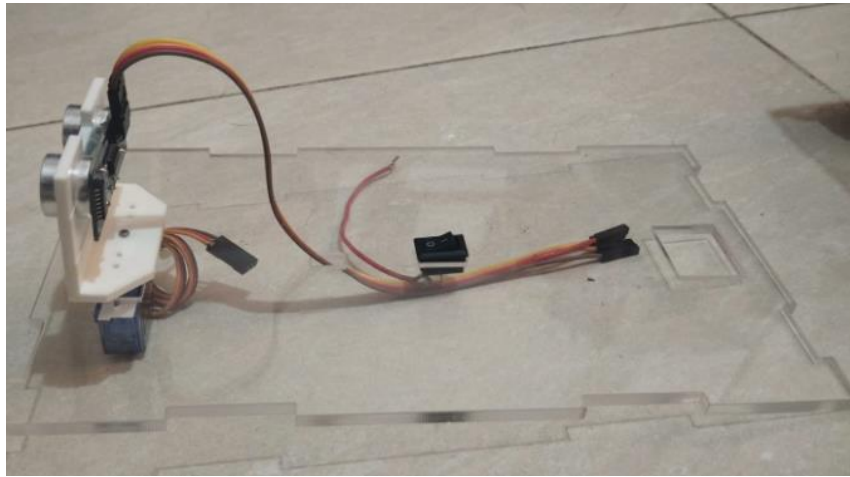


Posteriormente, se fija la pared de la guía a la base. Luego, se instala la cremallera, esta se atornilla previamente el sensor de humedad. Como se aprecia en la Figura 22.

**Figura 22.** Montaje de la cremallera con el sensor de humedad en la pared acrílica de la guía

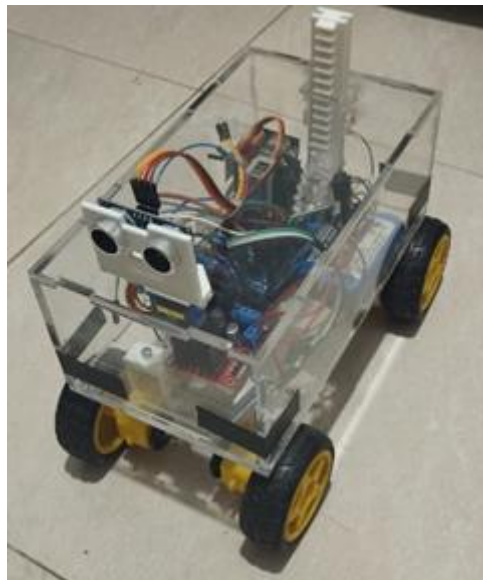


**Figura 23.** Montaje de servomotor Sg90 y sensor ultrasónico a la tapa en acrílica



En la Figura 23 se presenta la tapa fija al servomotor SG-90, el cual esta atornillado al soporte que sostiene el sensor de ultrasonido, además, del interruptor que se conecta a la batería.

**Figura 24.** Montaje completo con las conexiones correspondientes



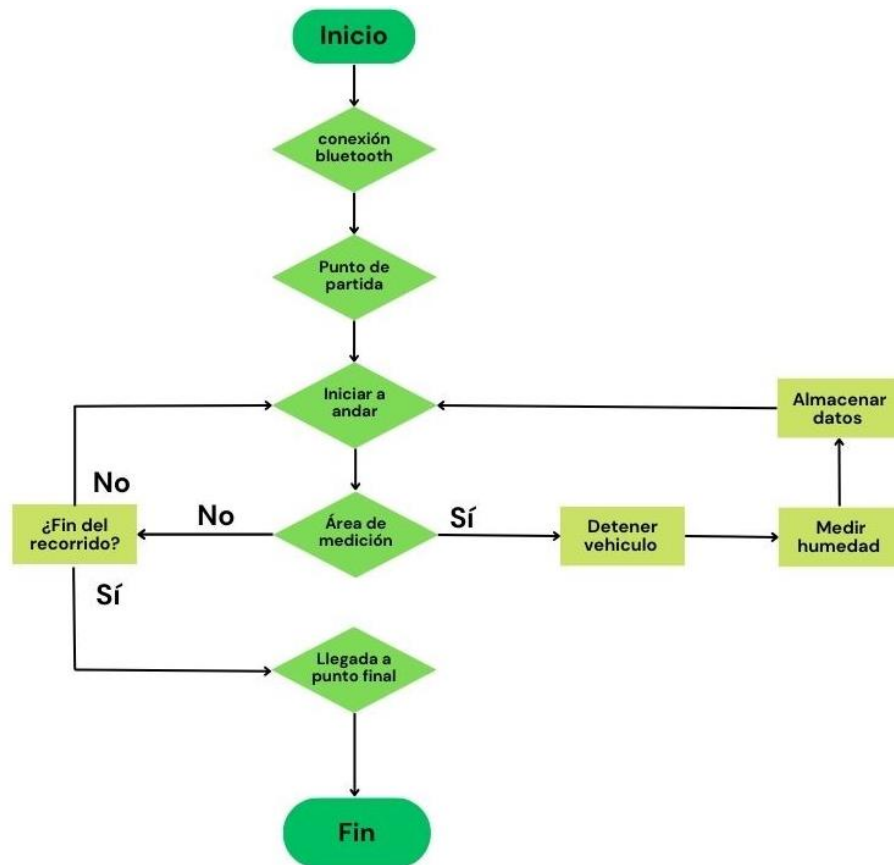
Para último, la Figura 24 presenta el montaje del prototipo en su estado final de ensamblaje. En el que se aprecia la unión de los componentes descritos con sus respectivas conexiones.

#### *5.4.4 Diseño y programación del funcionamiento del prototipo*

El prototipo de vehículo móvil para el monitoreo de humedad en cultivos de pimiento está diseñado para operar en dos modos principales: autónomo y manual. El sistema incorpora sensores de humedad, un sistema de inserción y un módulo de comunicación inalámbrica para transmitir datos a dispositivos móviles o computadoras.

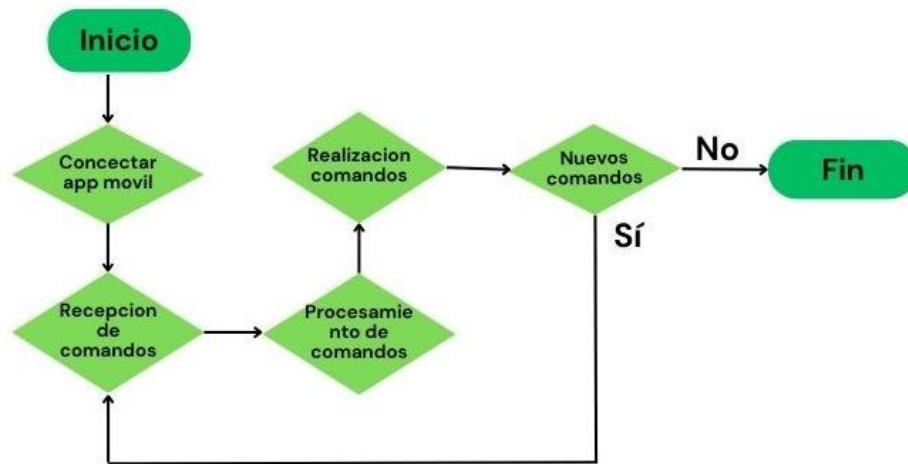
##### *5.4.4.1 Modo autónomo*

En este modo, el vehículo sigue un recorrido predeterminado basado en las dimensiones del invernadero. El proceso comienza al colocar el vehículo en un punto de partida, desde donde inicia su trayecto siguiendo una ruta preestablecida. Durante este recorrido, el vehículo se detiene en áreas predeterminadas para medir la humedad del suelo, recopilando los datos para el monitoreo del cultivo. Una vez completado el circuito y realizadas todas las mediciones programadas, el vehículo llega a un punto final designado. Al alcanzar este destino, el vehículo concluye su operación, desactivando todas sus funciones hasta el próximo ciclo de trabajo, como se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 25. Este enfoque automatizado garantiza una cobertura sistemática del invernadero y la recolección de datos de humedad en puntos estratégicos del cultivo de pimiento.

**Figura 25.** Diagrama de flujo modo autónomo

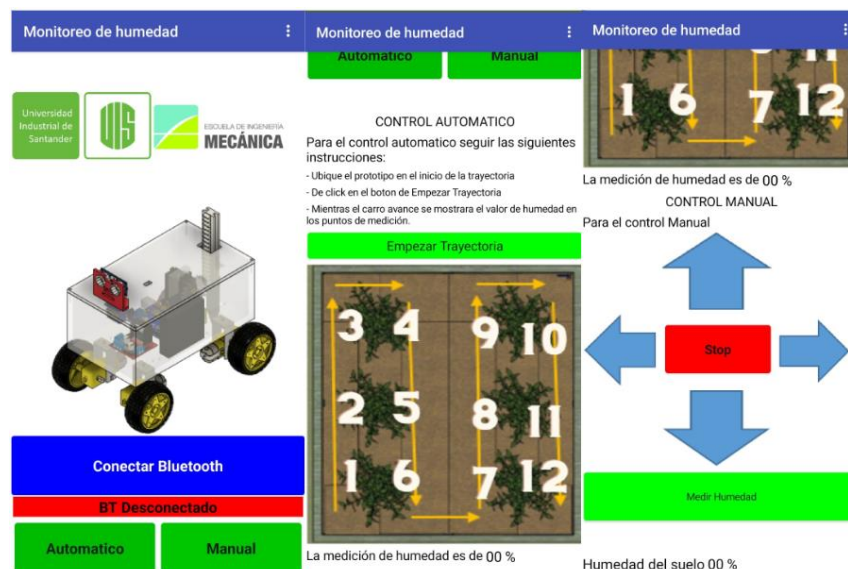
#### 5.4.4.2 Modo manual

El modo manual ofrece un control preciso y flexible del vehículo a través de una aplicación móvil. En esta modalidad, el operador dirige remotamente el dispositivo, permitiendo una navegación libre y personalizada por todo el invernadero. Esta funcionalidad es útil para hacer mediciones de humedad en puntos de interés específicos, adaptándose a necesidades puntuales o áreas con atención especial.

**Figura 26.** Diagrama de flujo modo manual

#### 5.4.4.5 Aplicativo móvil del proyecto.

La aplicación desarrollada para controlar el prototipo de vehículo móvil es una interfaz sencilla y accesible desarrollada en MIT App Inventor, como se muestra en la Figura 27. Esta interfaz está diseñada para facilitar la conexión y el manejo del vehículo, permitiendo a los usuarios operar automático y manualmente. La programación de la aplicación se puede ver más a detalle en el Apéndice G.

**Figura 27.** Interfaz de la aplicación

La interfaz de la aplicación se compone de los siguientes elementos:

**Logos Institucionales:** En la parte superior, se encuentran los logotipos de la Universidad Industrial de Santander y de la Escuela de Ingeniería Mecánica, indicando la afiliación institucional del proyecto.

**Visualización del Vehículo:** La sección central de la interfaz muestra una representación gráfica del prototipo de vehículo móvil. Este gráfico proporciona una vista detallada de los componentes del vehículo, incluyendo las llantas, motores, y el módulo de control.

**Botón de Conexión Bluetooth:** Debajo de la visualización del vehículo, se encuentra el botón Conectar Bluetooth. Este botón permite al usuario establecer una conexión inalámbrica entre la aplicación y el vehículo móvil, para transmitir comandos desde la aplicación al vehículo, facilitando su control remoto. Además, se puede visualizar si la conexión Bluetooth está conectada (verde) o desconectada (roja).

**Modos de Operación:** En la parte inferior de la interfaz, se presentan dos botones grandes y de fácil acceso:

- **Automático:** Al pulsar este botón, el vehículo móvil opera de manera autónoma, siguiendo un conjunto de instrucciones preprogramadas para el monitoreo de la humedad en los cultivos de pimientos. Este modo se utiliza para realizar mediciones de manera constante y sin intervención humana.
- **Manual:** Al pulsar este botón, al usuario puede controlar directamente el movimiento del vehículo utilizando la aplicación. Este modo es útil para realizar ajustes específicos o intervenciones inmediatas en el invernadero.

#### ***5.4.4.6 Funcionamiento general de la aplicación***

La aplicación se conecta al vehículo móvil mediante Bluetooth. Una vez establecida la conexión, el usuario elige entre los modos de operación automático o manual. En el modo automático, el vehículo sigue un algoritmo predefinido para recorrer las filas de cultivos y medir la humedad del suelo utilizando sensores integrados. Los datos recolectados se muestran en la aplicación.

En el modo manual, el usuario puede manejar el vehículo utilizando los controles de la aplicación, permitiendo una intervención directa en tiempo real. Este modo es útil para situaciones en las que se requiere un control específico del vehículo.

### ***5.4.5 Diseño construcción e implementación de prototipo invernadero***

#### ***5.4.5.1. Desarrollo y Especificaciones del Prototipo de Invernadero***

Para simular las condiciones de un invernadero real, se realizó una visita de campo a un invernadero en funcionamiento. Durante esta visita, se analizaron y registraron las medidas y condiciones necesarias para el cultivo adecuado de pimientos.

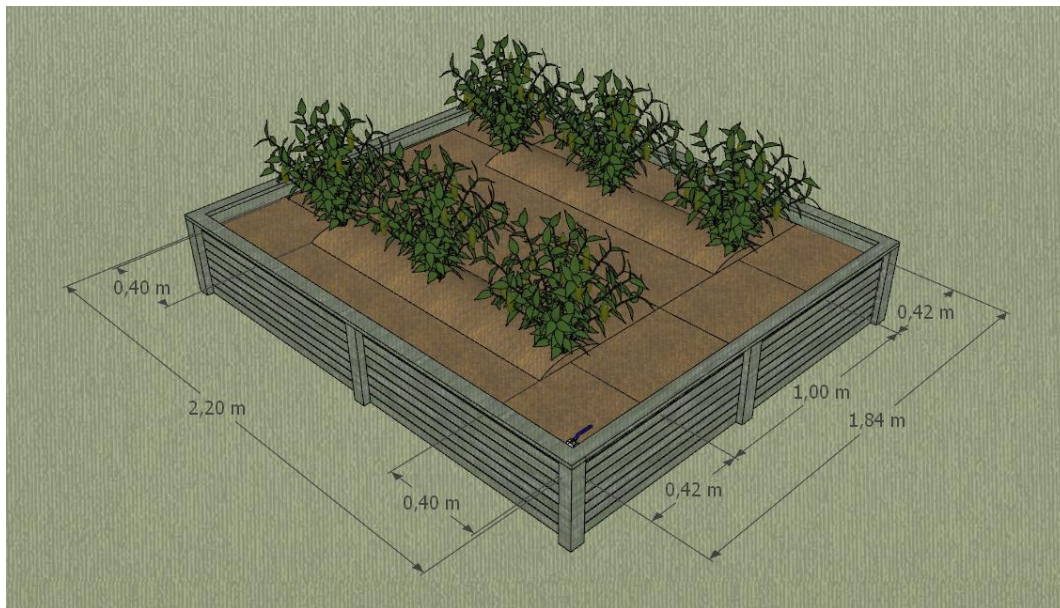
Se observó que la separación recomendada entre plantas es de 35 cm, lo cual proporciona un espacio adecuado para el desarrollo del sistema radicular. La distancia entre líneas de plantas de pimiento oscilaba entre 1.0 y 1.20 metros. Esta separación se establece principalmente para facilitar el tránsito de los trabajadores durante la cosecha. En nuestro prototipo, se optó por una distancia de 1 metro entre líneas, considerada suficiente para simular las condiciones reales.

Durante la visita, se recolectaron 10 plantas de pimiento que habían completado su ciclo de fructificación. Aunque estas plantas ya no producían frutos, resultaron útiles para simular las condiciones del invernadero en nuestro prototipo.

En cuanto al sustrato, se utilizó tierra rica en materia orgánica, arenosa y bien drenada, replicando las condiciones adecuadas para el cultivo de pimientos.

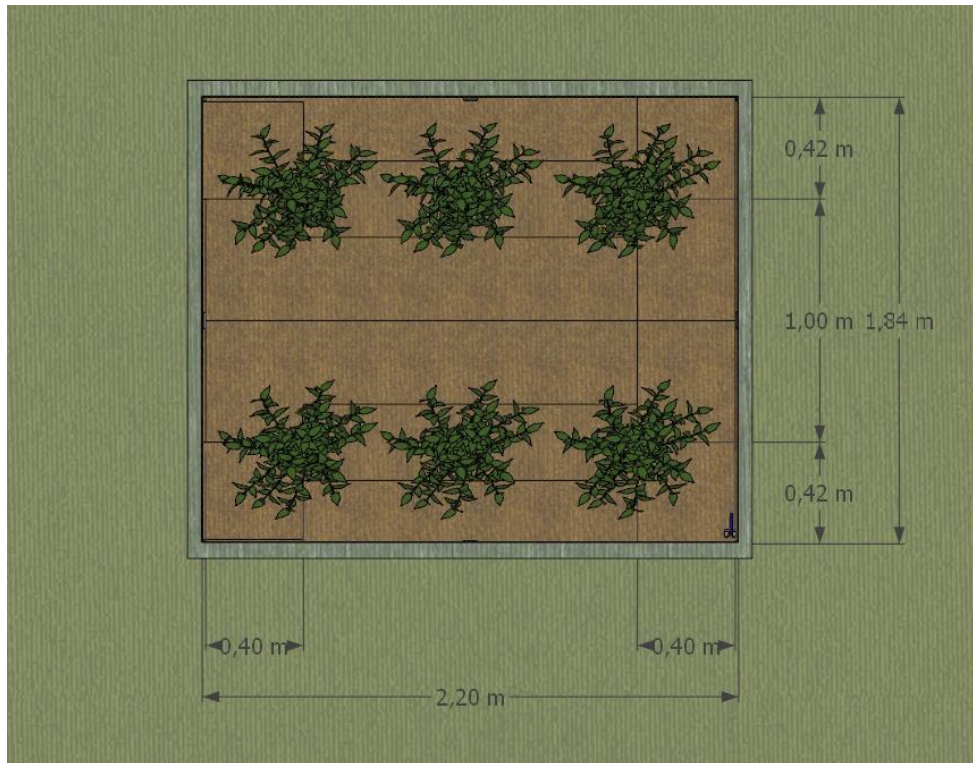
Las dimensiones finales del prototipo de invernadero se establecieron en 1.8 metros de ancho por 2.2 metros de largo. Estas medidas se determinaron basándose en las observaciones realizadas durante la visita al invernadero real, buscando la mejor simulación posible. El largo se determinó considerando el espacio necesario para albergar 5 plantas por línea. Como se muestra en las Figuras 28 y 29.

**Figura 28.** Diseño preliminar del prototipo de invernadero vista isométrica



*Nota.* Diseño hecho en SketchUp

**Figura 29.** Diseño preliminar del prototipo de invernadero en vista superior



*Nota.* Diseño hecho en SketchUp.

**Figura 30.** Disposición Final del Prototipo de Invernadero



El proceso y construcción del prototipo de invernadero se ve a detalle en el Apéndice D.

## **5.5. Evaluar**

### *5.5.1. Evaluación del Prototipo móvil.*

El proceso de evaluación es una fase importante dentro del marco de Design Thinking, debido a que permite analizar y valorar el rendimiento del prototipo, identificar posibles mejoras y validar la solución propuesta. En este proyecto, la evaluación del vehículo móvil tiene como objetivo realizar pruebas de desempeño bajo diferentes condiciones, asegurando su eficacia y fiabilidad. A continuación, se detallan las actividades y criterios de evaluación.

- Verificar la funcionalidad del vehículo móvil en el entorno del invernadero.
- Asegurar la durabilidad y resistencia del vehículo bajo condiciones de operación variadas.
- Evaluar la precisión y fiabilidad del sistema de monitoreo de humedad.

La evaluación del vehículo móvil se hizo mediante pruebas diseñadas para medir su rendimiento y capacidad en diferentes escenarios las cuales incluyen:

#### *5.5.1.1 Prueba de Recorrido Manual o control remoto*

El objetivo de esta prueba es observar la capacidad del vehículo para moverse de manera manual a lo largo del invernadero sincrónicamente con las ordenes emitidas por la aplicación. Para esto el vehículo recorre una ruta predefinida en el invernadero controlado por el usuario, el cual observa el desempeño, registrando cualquier interrupción, como se muestra en la Figura 31.

**Figura 31.** Prueba de recorrido manual



La respuesta del automóvil miniatura a las señales del control fue sobresaliente, mostrando movimientos fluidos que reflejaron una buena sincronización entre el emisor y el receptor del sistema.

#### *5.5.1.2 Prueba de Recorrido Automático*

El objetivo de esta prueba es observar la capacidad del vehículo para moverse de manera autónoma lo largo del invernadero sin salirse de su recorrido. Para esto el vehículo debe seguir la trayectoria predefinida en el invernadero sin detenerse y sin daños, registrando correctamente los datos de humedad y sin la intervención de alguien para su movimiento, como se muestra en la Figura 32.

**Figura 32.** Prueba de recorrido autónomo.



La respuesta del vehículo autónomo a las señales de control, presento movimientos fluidos y precisos. Además, se reflejó adecuadamente la sincronización entre el emisor y el receptor del sistema, lo que permitió al vehículo navegar de manera autónoma y apropiada durante las pruebas iniciales de recorrido.

#### 5.5.1.3 Prueba en terreno irregular

El objetivo de esta prueba es evaluar la capacidad del vehículo autónomo para operar en un terreno más irregular, simulando condiciones menos controladas que las del invernadero. Para ello, el vehículo se desplazó por un terreno con diversas irregularidades, como desniveles y obstáculos menores. Durante la prueba, se observó que el vehículo mantenía su trayectoria sin desviaciones significativas durante el recorrido sin intervención humana, ni daños, como se muestra en la Figura 33.

**Figura 33.** Prueba en terreno irregular.



El robot móvil demostró su capacidad para navegar en superficies desniveladas. Además, durante el recorrido mantuvo su trayectoria sin desviaciones significativas.

#### *5.5.1.4 Prueba de recolección de datos de humedad*

El objetivo de esta prueba es evaluar la precisión y consistencia del vehículo autónomo en la recolección de datos de humedad del suelo en diferentes puntos del invernadero. Para ello, el vehículo siguió una ruta predefinida y registro los niveles de humedad en intervalos regulares, como se muestra en la Figura 34.

*Figura 34. Prueba de recolección de datos.*



El vehículo autónomo pasó la prueba de recolección de datos de humedad. Debido que los datos registrados por el vehículo fueron precisos y consistentes. Esto demuestra la fiabilidad del sistema de monitoreo de humedad

### *5.5.2 Evaluación de los Costos del Proyecto*

En las siguientes tablas, se presentan los costos relacionados con el desarrollo del prototipo de vehículo móvil para el monitoreo de humedad en cultivos de pimiento. Estas tablas detallan los costos asociados con el subsistema estructural y transmisión, sistema eléctrico y electrónico, recursos humanos y gastos adicionales que se hayan hecho, y se presentaron los costos totales del proyecto.

**Tabla 8.** Costos totales del proyecto.

<b>Costos del proyecto</b>	
<b>ITEM</b>	<b>VALOR</b>
<b>Subsistema estructural y transmisión</b>	\$427.900
<b>Subsistema eléctrico y electrónico</b>	\$273.000
<b>Recursos humanos</b>	\$13' 000.000
<b>Gastos adicionales</b>	\$340.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$14'590.900</b>

*Nota.* En la Tabla 8 se presentan los Precios totales de todo el proyecto separados en subsistemas y gastos adicionales

En la Tabla 8 se resumen de los costos asociados al proyecto. Se divide en cuatro categorías principales:

- Subsistema estructural y transmisión: Incluye todos los componentes físicos y mecánicos necesarios para construir la estructura y el sistema de transmisión del vehículo móvil.
- Subsistema eléctrico y electrónico: Contempla los componentes eléctricos y electrónicos que permiten el funcionamiento del vehículo, incluyendo sensores, microcontroladores y motores.
- Recursos humanos: Se refiere a los costos asociados con el trabajo del personal involucrado en el proyecto.
- Gastos adicionales: Otros costos no incluidos en las categorías anteriores, como herramientas y materiales adicionales.

**Tabla 9.** Costos totales subsistema estructural y de transmisión

<b>Subsistema estructural y transmisión</b>	
<b>ITEM</b>	<b>VALOR (COP)</b>
<b>Lamina De Acrílico Transparente - 120cm X90cm X 4mm</b>	\$ 167.900
<b>Recortes laser</b>	\$ 30.000
<b>Tablas de invernadero (4 tablas)</b>	\$120.000
<b>Impresión 3D</b>	\$ 90.000
<b>4 llantas Arduino</b>	\$ 20.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 427.900</b>

*Nota.* En la Tabla 9 se presentan los Precios totales de la parte estructural de todo el proyecto.

**Tabla 10.** Costos totales subsistema eléctrico y electrónico

<b>Sistema eléctrico y electrónico</b>	
<b>ITEM</b>	<b>VALOR (COP)</b>
<b>Arduino UNO</b>	\$ 60.000
<b>Sensor Shield V5</b>	\$ 18.000
<b>4 motorreductores Arduino</b>	\$ 36.000
<b>Batería de litio</b>	\$ 50.000
<b>Modulo bluetooth hc-05</b>	\$ 18.000
<b>Sensor de humedad HL-69 con Lm393</b>	\$ 7.000
<b>Servomotor SG90</b>	\$ 11.000
<b>Servomotor MG945</b>	\$ 35.000
<b>Hc-sr04 Ultrasonido Sensor</b>	\$ 14.300
<b>45 Jumpers</b>	\$ 13.500
<b>Interruptor de encendido y apagado</b>	\$ 200
<b>Modulo L298n Puente H</b>	\$ 13.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 276.000</b>

*Nota.* En la Tabla 10 se presentan los Precios totales de la parte eléctrica y electrónica de todo el proyecto.

**Tabla 11.** Costos totales recursos humanos

<b>Recursos humanos</b>			
<b>ITEM</b>	<b>HORAS</b>	<b>VALOR/ HORA</b>	<b>VALOR (COP)</b>
<b>Yuliana Ríos</b>	20	\$350.000	\$7.000.000
<b>Juan Pablo Cortés Ulloa</b>	100	\$30.000	\$3.000.000
<b>Nicolás Lizcano Pinzón</b>	100	\$30.000	\$3.000.000
<b>TOTAL</b>			\$13.000.000

*Nota.* En la Tabla 11 se presentan los Precios totales de la parte recursos humanos de todo el proyecto.

**Tabla 12.** Costos totales Gastos adicionales

<b>Gastos adicionales</b>	
<b>ITEM</b>	<b>VALOR (COP)</b>
<b>Herramientas de manufactura</b>	\$ 45.000
<b>Internet</b>	\$ 75.000
<b>Papelería (papel, cinta, tijeras...)</b>	\$15.000
<b>14 tornillos y tuercas</b>	\$ 5.000
<b>Imprevistos</b>	\$ 200.000
<b>TOTAL</b>	\$ 340.000

*Nota.* En la Tabla 12 se presentan los Precios totales de la parte gastos adicionales de todo el proyecto.

En el análisis de costos revela una ventaja en términos económicos en comparación con los sistemas de sensores estáticos convencionales. La implementación de este prototipo móvil representa una inversión inicial moderada que se compensa rápidamente por su capacidad de cubrir

extensas áreas de cultivo con un solo dispositivo, por lo que estos sensores estáticos requieren de múltiples unidades para tener una cobertura comparable, lo que incrementa bastante el costo del sistema, además que los componentes electrónicos del vehículo autónomo son bastante económicos haciendo rentable el mantenimiento, como se observa en la Tabla 10.

### **Conclusiones.**

Para definir los parámetros, se realizó una revisión de la literatura, recopilando información importante para el monitoreo del cultivo del pimiento, después se visitó el invernadero en la vereda La fuente en la finca de Luis Alberto Camacho en la cual, se observó las condiciones del terreno, las características del suelo, la compactación del suelo, la disposición y uniformidad de los surcos. Además, se realizó una entrevista al agricultor para comprender las practicas actuales de medición en cultivos de pimiento. Gracias a esto se concluyó que el área del cultivo se destaca por el suelo compacto, capacidad de absorción del agua, y que el cultivo presenta elevaciones en algunas partes del terreno, además de separación entre surcos para mayor movilidad del prototipo.

El proceso de desarrollo del prototipo se caracterizó por un enfoque metódico, priorizando la economía y la flexibilidad. Inicialmente, se realizó una cuidadosa selección de materiales, optando por acrílico de 4mm para el chasis y PLA para los soportes impresos en 3D, equilibrando así costo y funcionalidad. Adicionalmente, se centró en diseñar componentes adaptables, que luego sean fabricados mediante corte láser e impresión 3D. Este método de producción permitió precisión, para observar su incorporación y realizar ajustes rápidos si se necesitaba. Luego, el proceso culminó con el ensamblaje de las piezas diseñadas y los componentes seleccionados con su cableado, resultando en una plataforma móvil robusta y versátil.

La programación del prototipo se diseñó sistemáticamente para visualizar la secuencia de los pasos de los modos manual y automático, Esto se logró combinando el lenguaje de programación de Arduino con el de bloques de la aplicación para mejorar la interacción entre el prototipo y el operador, permitiendo el control adecuado de las acciones del prototipo.

Para analizar el comportamiento del prototipo en un entorno real, se realizó un prototipo de invernadero, con las medidas tomadas de la distribución de las plantas de pimiento en la finca

visitada. En este se realizaron pruebas manuales y automáticas de movimiento y pruebas para medir humedad y movilidad en terrenos irregulares, estos resultados muestran fiabilidad en la comunicación efectiva entre el prototipo y la aplicación y su movimiento fluido en el invernadero.

Este proyecto ha evidenciado el potencial de las tecnologías autónomas en la agricultura de precisión, particularmente en el monitoreo de cultivos en entornos controlados. Además, que el análisis de costos demuestra que la implementación del prototipo móvil es más rentable en comparación con los sistemas de sensores estáticos convencionales que requieren mayor inversión.

Finalmente, este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de la agricultura de precisión, promoviendo al avance hacia prácticas agrícolas sostenibles y eficientes.

### **Recomendaciones**

Se recomienda mejorar la calidad de las llantas por unas con mejor agarre, específicamente diseñadas para operar en invernaderos reales. Las llantas actuales, aunque funcionaron adecuadamente durante las pruebas, requirieron enmallado adicional para una mejor tracción.

Para mejorar la estabilidad del vehículo en terrenos con pendientes y desniveles, se recomienda aumentar la distancia entre los motores. Una mayor separación proporcionará una base más estable, reduciendo el riesgo de vuelco y mejorando la capacidad de navegación en terrenos irregulares.

Se aconseja incorporar sensores de mejor calidad para la recolección de datos, que ofrezcan mayor precisión y un rango más amplio de medición. Sensores de humedad con mayor resistencia y mejor precisión, para mejorar la calidad de los datos y la eficiencia del monitoreo.

Se sugiere integrar una cámara en el vehículo que permita obtener imágenes en tiempo real del cultivo, lo que facilitaría la identificación de problemas visuales como plagas, enfermedades y obstáculos nuevos. Esta adición también abriría la posibilidad de controlar el robot desde una distancia desde la aplicación.

Incorporar una tarjeta de procesamiento avanzada que incluya conexión a internet y capacidades de inteligencia artificial mejoraría significativamente las funciones del vehículo. Esto permitiría un control remoto más efectivo, análisis de datos en tiempo real con mayor alcance, además de la implementación de algoritmos de aprendizaje automático para mejorar el monitoreo y la toma de decisiones.

explorar y utilizar otros entornos de desarrollo de software más robustos y profesionales que ofrezcan mayor flexibilidad y capacidades avanzadas. Plataformas como Arduino IDE, Python

o incluso lenguajes de programación específicos para robots podrían proporcionar un mejor rendimiento y escalabilidad para el sistema de control del vehículo. Además, se recomienda buscar otro tipo de páginas para desarrollo de aplicaciones más avanzadas que las utilizadas en este proyecto.

Investigar métodos para la reducción del consumo de energía de la plataforma, considerando el despliegue prolongado en campos agrícolas. Esto es fundamental para asegurar la eficacia del sistema en entornos agrícolas diversos.

### Referencias bibliográficas

Adafruit STEMMA - Sensor de humedad de suelo Capacitivo I2C - Electronilab. (2024, March 2). Electronilab. <https://electronilab.co/tienda/adafruit-stemma-sensor-de-humedad-de-suelo-capacitivo-i2c/>

Andújar, D., Moreno, H., Bengochea-Guevara, J. M., de Castro, A., & Ribeiro, A. (2019). Agricultura de precisión y robótica. *Agricultura: Revista agropecuaria y ganadera*, (1024), 32-36.

Aguayo, P. (2019, 23 septiembre). Arduino UNO | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea. Arduino.cl - Compra Tu Arduino En Línea. <https://arduino.cl/arduino-uno/>.

Alvarado, A. (2020). Estudio, diseño y construcción de un robot esférico orientado al monitoreo remoto de cultivos de palma de aceite (Tesis de grado). Universidad Z.

Alvarado Álvarez, F. A. (2020). Diseño y construcción de un prototipo de robot móvil esférico para monitoreo de cultivos de palma de aceite.

Arduino Mega 2560 rev3. (s. f.). Arduino Official Store. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149, 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>

Bojacá, C., & Monsalve, J. (2012). El pimentón: Aspectos botánicos y de producción. Editorial X.

Bfernandois. (2024, 7 febrero). 5 fases del Design Thinking: Innovación en práctica. Fusiona. <https://fusiona.cl/blog/ux/5-esenciales-del-design-thinking/>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2015). Boletín mensual de insumos agropecuarios: Julio de 2015. Recuperado de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol\\_Insumos\\_jul\\_2015.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_jul_2015.pdf)

Driver Puente H L9110S 0.8A. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú. <https://naylampmechatronics.com/drivers/66-driver-puente-h-l9110s.html>

Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., & Grieve, B. (2018). Agricultural robotics: The future of robotic agriculture. *Field Robotics*, 34(2), 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.05.001>

EL MÓDULO CONTROLADOR DE MOTORES L298N – Prometec. (s. f.). <https://www.prometec.net/l298n/>

Galarza Altamirano, K. D. (2021). Diseño e implementación de prototipo electrónico para monitorear el pH, conductividad eléctrica y temperatura en cultivos aeropónicos (Tesis de grado). Universidad Z.

Gómez-Castro, H., García-Mateos, G., & Ramos-Santana, G. (2018). Robótica aplicada a la agricultura: Avances y perspectivas. *Journal of Agricultural Technology*, 45(5), 789-802.

Gonzalez-de-Santos, P., Ribeiro, A., Fernandez-Quintanilla, C., Lopez-Granados, F., Brandstoeffer, M., Tomic, S., Pedrazzi, S., Peruzzi, A., Pajares, G., Kaplanis, G., Perez-Ruiz, M., Valero, C., Del Cerro, J., Vieri, M., Rabatel, G., & Debilde, B. (2017). Flotas de robots para el control de plagas ambientalmente seguro en agricultura. *Agricultura de Precisión*, 18(4), 574-614. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9476-3>

Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2020). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1), 166-176. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2276487>

López, J. A., & Pérez, M. E. (2019). Prácticas de manejo del suelo postcosecha en cultivos de hortalizas. *Revista de Agricultura y Horticultura Sustentable*, 34(2), 145-160.

López-Granados, F., Peña, J. M., & Torres-Sánchez, J. (2019). Innovaciones tecnológicas en la robótica agrícola. *AgroTIC*, 12(3), 33-42.

Martin, E. C., & Munoz, C. (2017). Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego ¿cuándo?.

Martínez, P., Jiménez, L., & Sánchez, A. (2016). Innovaciones robóticas en la ingeniería agrícola. *Ciencia y Tecnología*, 10(2), 99-110.

Martínez-Ruiz, F., Sánchez-Guerrero, M. C., & Medrano, E. (2024). Estrategias de manejo para la extensión del ciclo productivo en cultivos de pimiento bajo invernadero. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 25(1), 45-58.

Martín, E. (2017). *Tecnologías de medición de humedad en suelos*. Editorial Y.

Navarro-Hellín, H., Martínez del Amor, M. A., & Soto-Valles, F. (2015). Sistemas inteligentes para el manejo del riego en cultivos de pimiento. *Horticultura Internacional*, 31(4), 27-34.

Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas: Un enfoque integrado* (4a ed.).

Objetivos de Desarrollo Sostenible 15: Vida de Ecosistemas Terrestres | Las Naciones Unidas en Colombia. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <https://colombia.un.org/es/sdgs/15>

Objetivos de Desarrollo Sostenible 2: Hambre cero | Las Naciones Unidas en Colombia. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <https://colombia.un.org/es/sdgs/2>

Ortiz, R., Núñez, A., Cathala, C., Rios, A., & Nalesso, M. (2021). El agua en tiempos de sequía II: Lecciones de sequías alrededor del mundo. BID. Recuperado de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/El-agua-en-tiempos-de-sequia-II-lecciones-de-sequias-alrededor-del-mundo.pdf>

Pérez-Alonso, J., Cruz-Blázquez, M., Santos, P., & Belmonte-Ureña, L. J. (2019). Intelligent greenhouse technology. In J. C. Moreno Pérez & J. E. López Benavides (Eds.), *Optimizing Agricultural Inputs and Outputs*.

Rodríguez, A., & Pérez, S. (2017). La automatización en la agricultura moderna. *Tecnología y Ciencia*, 11(1), 59-68.

Sánchez-Gimeno, B., & Martínez de la Casa, J. (2018). Tecnologías autónomas en la agricultura de precisión. *Revista Iberoamericana de Tecnología*, 14(2), 45-56.

Sensor de distancia de Ultrasonido US-100 - 3V o 5V - Electronilab. (2024, 8 julio). Electronilab. <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-distancia-de-ultrasonido-us-100-3v-o-5v/>

Sensor de Humedad de Suelo Anticorrosivo. (s .f.). <https://www.ardobot.co/sensor-de-humedad-de-suelo-anticorrosivo.html>

Sensor De Humedad De Suelo Sonda Higrometro YL38 y YL69. (n.d.).  
<https://www.ardobot.co/sensor-de-humedad-de-suelo-sonda-higrometro-yl38-y-yl69.html>

Sensor ultrasonido HC-SR04. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú.  
<https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>

Shamshiri, R. R., Weltzien, C., Hameed, I. A., Yule, I. J., Grift, T. E., Balasundram, S. K., Pitonakova, L., Ahmad, D., & Chowdhary, G. (2018). Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 1-14. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4292>

Smith, K. L., & Johnson, R. T. (2023). Técnicas modernas de germinación y establecimiento de plántulas en la producción de pimiento. *Journal of Horticultural Science*, 88(4), 502-515.

Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer.

Suárez Camacho, N. D. (2023). Prototipo para el monitoreo y control de variables en el cultivo de tomate cherry (Tesis de grado). Universidad Z.

Tang, Y., Xue, L., Zhang, L., & Li, Y. (2015). Design of soil moisture sensor based on LM393 comparator. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 730, pp. 342-345). Trans Tech Publications Ltd.

Tienda Prometec Spain. (2022, 14 febrero). Servo Futaba MG945 - Tienda Prometec. Tienda Prometec. <https://store.prometec.net/producto/servo-futaba-mg945/4o>