

Diseño de un sistema de riego por goteo automatizado para plantaciones de aguacate Hass en la  
Mesa de los Santos

Juan Sebastian Cavanzo Ortiz y Juan Sebastian Guarín Ibáñez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yennifer Yuliana Ríos Diaz

PhD en Ingeniería Mecatrónica

Codirector

Juan Pablo Flórez Mera

PhD en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1     Objetivos .....	12
1.1   Objetivos específicos .....	12
2     Marco teórico .....	14
2.1   Sistemas tecnificados de riego .....	14
2.2   Requerimientos plantas de aguacate Hass .....	15
2.2.1 Profundidad y textura de la tierra: .....	15
2.2.2 Temperatura: .....	16
2.2.3 Humedad: .....	16
3     Recopilación de datos .....	17
3.1   Selección y características del terreno .....	17
3.2   Variable de trabajo y condiciones de operación .....	18
4     Diseño del sistema .....	20
4.1   Subsistema hidráulico de captación y transporte .....	20
4.1.1 Cálculo de pérdidas de carga .....	22
4.1.2 Cálculo de la altura manométrica .....	23
4.1.3 Material de la tubería .....	24
4.1.4 Definición de variables y consideraciones.....	25
4.1.5 Selección de la bomba hidráulica principal .....	26
4.2   Subsistema hidráulico de goteo y distribución .....	27

4.2.1	Canal de distribución .....	28
4.2.2	Bomba de riego y línea de descarga .....	29
4.2.3	Goteros .....	30
4.2.4	Cálculos y consideraciones de subsistema hidráulico de goteo y distribución.....	30
4.2.5	Selección de la bomba de riego .....	31
4.3	Subsistema de movimiento-locomoción .....	32
4.3.1	Cálculo y selección del perfil de acero transversal .....	33
4.3.2	Cálculo y selección de rieles o vigas paralelas .....	39
4.3.3	Cálculo y selección de soportes .....	43
4.3.4	Cálculo y selección del conjunto potencia y transmisión .....	45
5	Sistema de control.....	48
5.1	Secuencia lógica de programación.....	51
5.1.1	Entradas.....	52
5.1.2	Salidas .....	52
5.2	Selección de Componentes para el control .....	52
5.2.1	Sensor de humedad .....	53
5.2.2	Controlador (PLC) .....	55
6	Construcción y evaluación del prototipo .....	56
6.1	Bastidor .....	56
6.2	Subsistema de locomoción.....	57
6.3	Subsistema hidráulico .....	58
6.4	Sistema y lógica de control.....	59
7	Análisis de costos.....	60

7.1	Costos de una finca productora de aguacate Hass .....	60
7.2	Costos de automatización y plan de amortización .....	63
8	Análisis hidrometeorológico .....	65
9	Conclusiones .....	67
	Referencias.....	69

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Comparativa entre perfiles IPE según calibre para selección de la viga trasversal</i> .....	39
Tabla 2 <i>Comparativa entre perfiles IPE según calibre para selección del riel</i> .....	43
Tabla 3 <i>Escenarios para la recuperación de la inversión</i> .....	64

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Rendimiento nacional cultivo de aguacate Hass</i> .....	10
Figura 2 <i>Parcela conjunto campo campiña, mesa de los Santos</i> .....	17
Figura 3 <i>Mediciones de humedad en sitio</i> .....	20
Figura 4 <i>Curva de rendimiento Altura x caudal bomba hidráulica principal</i> .....	26
Figura 5 <i>Subsistema hidráulico y parámetros importantes</i> .....	27
Figura 6 <i>Boceto subsistema hidráulico de goteo y distribución</i> .....	28
Figura 7 <i>Distribución y organización del cultivo</i> .....	32
Figura 8 <i>Boceto sistema de locomoción</i> .....	33
Figura 9 <i>Diagrama de esfuerzos y momentos del perfil trasversal</i> .....	36
Figura 10 <i>Configuración y distribución de cargas para el riel</i> .....	40
Figura 11 <i>Diagrama de esfuerzos y momentos del riel paralelo</i> .....	41
Figura 12 <i>Mecanismo para transmisión de movimiento en puentes grúas</i> .....	46
Figura 13 <i>Bocetos del conjunto potencia y transmisión</i> .....	48
Figura 14 <i>Boceto del sistema de riego</i> .....	49
Figura 15 <i>Vista superior del cultivo y distribución del mismo</i> .....	50
Figura 16 <i>Diagrama de flujo del sistema de control</i> .....	51
Figura 17 <i>Gráfica entre la distancia variada y el porcentaje de la diferencia entre las mediciones</i> .....	54
Figura 18 <i>Regresión lineal por medio del logaritmo</i> .....	54
Figura 19 <i>Partes del bastidor y sistema de locomoción en el prototipo</i> .....	58

Figura 20 *Partes del sistema de control en el prototipo* ..... 60

Figura 21 *Gráfica de costos registro histórico producción de aguacate Hass por hectárea*..... 61

Figura 22 *Gráfica de pronóstico lineal de la producción de aguacate Hass por hectárea* ..... 62

Figura 23 *Gráfico del comportamiento pluvial en 2024 según IDEAM*..... 65

### Resumen

**Título:** Diseño de un sistema de riego por goteo automatizado para plantaciones de aguacate Hass en la Mesa de los Santos\*

**Autor:** Juan Sebastian Cavanzo, Juan Sebastian Guarín\*\*

**Palabras Clave:** Riego por goteo, Automatización, Sensores TDR, PLC, Aguas lluvias, Aguacate Hass, Santander

**Descripción:** Este trabajo presenta el diseño de un sistema de riego automatizado para una parcela de 600 m<sup>2</sup> con 15 árboles de aguacate Hass en la Mesa de los Santos, Santander. La propuesta integra tres subsistemas —captación y transporte, goteo y distribución, y locomoción— gobernados por un PLC modular con sensores de humedad TDR como variable principal de control. Se priorizó un montaje compacto, de fácil implementación y con aprovechamiento de aguas lluvias como fuente prioritaria. El diseño contempló criterios hidráulicos y estructurales, y se construyó un prototipo a escala para verificación funcional. En el análisis económico se tomó como referencia un costo sectorial de 22,7 millones COP/ha·año, obteniendo para la unidad de estudio un costo anual de 1,01 millones COP. La inversión en automatización ascendió a 38,1 millones COP y, con una producción estimada de 540 kg/año y precios entre 3.500–6.000 COP/kg, el escenario medio arrojó un periodo de recuperación de 26–27 años, lo que limita la viabilidad a pequeña escala.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Programa académico. Director: Yennifer Yuliana Ríos Díaz. Doctora en Ingeniería Mecatrónica. Codirector: Juan Pablo Flórez Mera. Doctor en Ingeniería Mecánica.

### Abstract

**Title:** Design of an Automated drip Irrigation System for Hass Avocado Plantations in Mesa de los Santos\*

**Author(s):** Juan Sebastian Cavanzo, Juan Sebastian Guarín\*\*

**Key Words:** Drip irrigation, Automation, TDR sensors, PLC, Rainwater reuse, Hass avocado, Santander

**Description:** This work presents the design of an automated irrigation system for a 600 m<sup>2</sup> plot with 15 Hass avocado trees located in Mesa de los Santos, Santander. The proposal integrates three subsystems—water intake and transport, drip distribution, and locomotion—governed by a modular PLC with TDR soil moisture sensors as the main control variable. A compact and easy-to-implement setup was prioritized, with rainwater as the primary source. The design included hydraulic and structural criteria, and a scaled prototype was built for functional verification. The economic analysis considered a sectoral cost of 22.7 million COP/ha·year, estimating 1.01 million COP/year for the study unit. The automation investment amounted to 38.1 million COP and, with an expected yield of 540 kg/year and prices between 3,500–6,000 COP/kg, the medium scenario showed a payback period of 26–27 years, which limits feasibility at small scale.

---

\* Degree Work

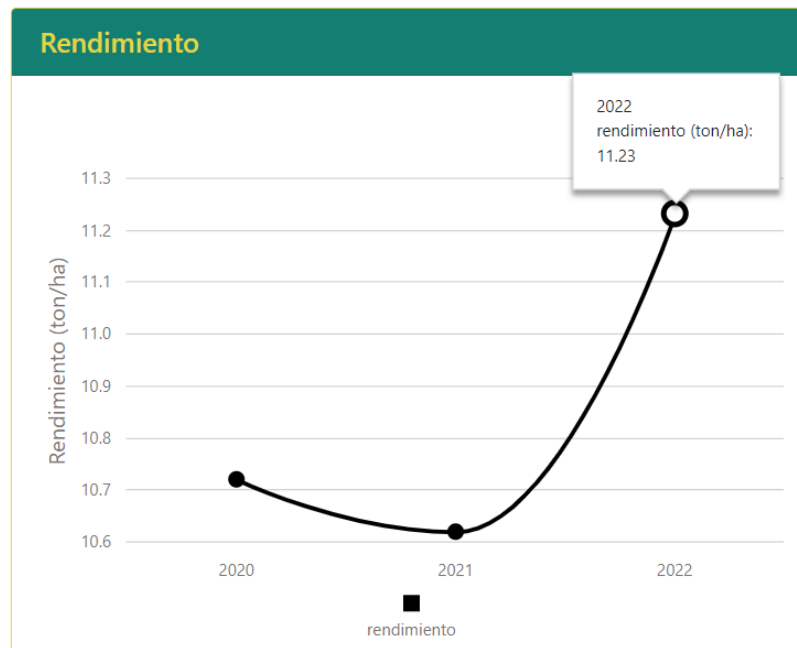
\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Academic Program. Advisor: Yennifer Yuliana Ríos Diaz. Doctor in Mechatronics Engineering. Co-advisor: Juan Pablo Flórez Mera. Doctor in Mechanical Engineering.

### Introducción

La industria agrícola en Colombia tiene gran importancia en el sector económico del país, ocupando el tercer lugar en la producción mundial de aguacate con el 6% de la producción total, como se aprecia en la figura 1, un rendimiento promedio de 11,23 t/ha en 2022 (Ministerio de agricultura, s.f.). La región de Santander, Colombia, se destaca por su rica tradición agrícola y la diversidad de cultivos que contribuyen a su economía local. El cultivo de aguacate Hass ha ganado interés como una alternativa prometedora, gracias a la creciente demanda del mercado y las condiciones propicias para su desarrollo. No obstante, el éxito de este cultivo se ve influido por diversos factores, siendo el manejo del riego uno de los aspectos cruciales. La disponibilidad de agua, las características específicas del suelo y las variaciones climáticas presentan desafíos que requieren atención para asegurar un crecimiento saludable y una producción óptima del aguacate.

### Figura 1

*Rendimiento nacional cultivo de aguacate Hass*



*Nota.* Adaptado de MINISTERIO DE AGRICULTURA. *Rendimiento nacional cultivo de aguacate Hass 2022.* <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

El aguacate es un cultivo que requiere de abundante agua en la mayoría de sus etapas, siendo así que se necesitan unos 200 Litros de agua para producir 1 kg del fruto, es decir, unos 4 o 5 aguacates (Diputación de Salamanca, 2023). La mesa de los santos en Santander se encuentra a 1700 metros sobre el nivel del mar, con un clima fresco y seco, pero especial para la diversidad de cultivos. En esta región se presenta la necesidad de un suministro constante de agua, siendo así, un factor esencial para potencializar este cultivo emergente. Por ende, es imperativo abordar estas carencias de conocimiento y desarrollar un sistema de riego específico para ese cultivo y las características de la zona. Este sistema no solo deberá garantizar un suministro eficiente de agua para el cultivo de aguacate Hass, sino que también buscará fomentar la sostenibilidad ambiental y económica para los agricultores locales.

## **1 Objetivos**

Diseñar un sistema de riego por goteo automatizado para una plantación de aguacate Hass ubicada en la mesa de los santos haciendo uso eficiente del recurso hídrico de la zona.

### **1.1 Objetivos específicos**

Ejecutar un modelo a escala en un laboratorio para llevar a cabo pruebas y validaciones del sistema de riego por goteo automatizado propuesto, utilizando condiciones controladas que simulan el entorno real de cultivo de aguacate Hass en la región de la mesa de los Santos, Santander.

Determinar las características del suelo, con el fin de identificar las necesidades hídricas específicas del cultivo de aguacate Hass y el recurso hídrico disponible.

Proponer un sistema de distribución hidráulico para un área de cultivo de 600 m<sup>2</sup> bajo las condiciones ambientales de la región de la mesa de los Santos, Santander.

Plantear un sistema de monitoreo de la humedad del suelo que permita ajustes automáticos en el suministro de agua según las condiciones climáticas y las demandas del cultivo de aguacate Hass.

Evaluar la viabilidad económica a corto plazo del sistema de riego propuesto, considerando los costos de instalación y analizando el impacto en la productividad del aguacate Hass.

### **Limitaciones**

El terreno de trabajo cuenta con un suministro de agua para uso de riego, situado aproximadamente a unos 10 o 15 metros de la plantación. Se estima el uso de al menos una bomba para el transporte del agua hacia el sistema junto a unas válvulas de apertura y cierre. El sistema incluye sensores de humedad cuya cantidad y características serán estimados de acuerdo a las

necesidades del sistema. Como caso de estudio se implementa en un modelo a nivel de laboratorio aproximadamente en un espacio de un 0.25 m<sup>2</sup> para validación.

## 2 Marco teórico

La capa superficial de la Mesa de los Santos consiste en arcilla y arena, con un espesor variable de hasta 40 centímetros y ocasionalmente alcanza los 2 metros. Debajo de esta capa blanda se encuentra una roca compacta, principalmente arenisca, compuesta por lajas fracturadas, algunas de gran tamaño (Ortiz, 1958). Estudios geológicos han revelado un nivel freático discontinuo entre 5 y 10 metros de profundidad, con material meteorizado y suelo con poca agua. Esta área abarca aproximadamente 430 km<sup>2</sup> y ha experimentado un rápido crecimiento demográfico en las últimas décadas, lo que ha provocado una escasez directa de agua (Vergel Navarro & Remolina Rivero, 2023).

### 2.1 Sistemas tecnificados de riego

Distribuir agua de manera uniforme en los campos es crucial para una producción óptima. Los sistemas de riego tecnificados garantizan que las plantas reciban la cantidad precisa de agua para su crecimiento y producción. El riego por goteo, en particular, ofrece una eficiencia de hasta el 90% y ahorros de agua de hasta el 50% en comparación con la aspersión, mientras se evita el mojado del tronco y la intercepción por las ramas (Equipo editorial INTAGRI).

Entre estos sistemas, el riego por goteo es de los más efectivos para distribuir el agua de manera uniforme, seguido por el riego por aspersión, riego por gravedad y, por último, el riego por inundación o surcos. El siguiente análisis compara dos tipos de cultivos y el impacto de la introducción del riego por goteo en ellos. Según la investigación realizada en una comunidad peruana, se sugiere que sería beneficioso cambiar el cultivo de arroz por aguacate Hass y adoptar el riego por goteo. Se identifican varias ventajas, entre ellas, una menor demanda de agua. Para el arroz utilizan 17.639m<sup>3</sup> por campaña, en comparación con los 14.910m<sup>3</sup> por año del aguacate

Hass. Además, se observa un incremento del 25% en la productividad del aguacate al implementar el riego por goteo (Albites Paico & Alvitez Figueroa, 2015).

Siendo útil de igual forma un buen sistema de control, tomando valores de referencia del riego por goteo comparado en función a otros tipos de riego. Un proyecto de grado desarrollado en Perú indica un consumo de 360.000 litros en sistemas por inundación, en contraste, sistemas de riego por goteo controlado y automatizado consumen solo 125.000 litros durante las 5 horas de riego en plantaciones de uva Italia, siendo probable ahorrar el 65% del total de agua utilizada (Cruz Concha, 2009). Esta es la principal razón para adoptar un sistema de riego por goteo que cuenta con características y ventajas superiores a los demás en función de los requerimientos específicos de la plantación como se observa en una matriz QFD (Ver anexo 1).

## **2.2 Requerimientos plantas de aguacate Hass**

La productividad del cultivo de aguacate está influenciada por diversos factores, incluidas las condiciones del suelo y el clima en los que se encuentran los huertos. Por lo tanto, es crucial seleccionar cuidadosamente el terreno al establecer una plantación para evitar una baja productividad debido a problemas climáticos o del suelo.

### ***2.2.1 Profundidad y textura de la tierra:***

son factores clave que determinan la capacidad de retención de agua. Los árboles de aguacate necesitan un suelo moderadamente profundo, ya que sus raíces son superficiales. Se ha observado que el aguacate produce cosechas abundantes en suelos con una profundidad de 30 a 40 cm.

### ***2.2.2 Temperatura:***

La temperatura óptima para el cultivo de aguacate oscila entre 17 y 24 °C, siendo 20 °C ideal para su crecimiento. Durante el proceso de amarre de frutos, se requieren temperaturas mínimas de 10 a 17 °C y máximas de 28 a 33 °C. (Equipo Editorial INTAGRI, 2019).

### ***2.2.3 Humedad:***

Un nivel óptimo de humedad relativa para el cultivo de aguacate se sitúa entre el 60% y el 80%. Aunque puede crecer con niveles de humedad del 40% o menos si otras condiciones son favorables, esto puede aumentar el riesgo de estrés hídrico, plagas y pérdida de flores y frutos. Por otro lado, un exceso de humedad puede provocar la propagación de enfermedades fúngicas (EOS DATA ANALYTICS, 2023).

### 3 Recopilación de datos

#### 3.1 Selección y características del terreno

El área seleccionada para el proyecto se encuentra en una parcela de aproximadamente 1,800 m<sup>2</sup>, ubicada dentro del conjunto residencial Campo Campiña, en la Mesa de los Santos, Santander. Para los fines del estudio, se ha delimitado una sección de 30x20 metros (600 m<sup>2</sup>) en la que se llevó a cabo la plantación de aguacate Hass y se realizaron las pruebas iniciales (figura 2). El área elegida debido a sus características agroclimáticas favorables, como la temperatura media, la altitud y el régimen de precipitaciones típicas de la zona, los cuales son adecuados para el desarrollo del cultivo de aguacate.

#### Figura 2

*Parcela conjunto campo campiña, mesa de los Santos.*



En reuniones con los propietarios del terreno, se expresó un interés significativo por implementar el cultivo, aunque surgieron inquietudes relacionadas con los altos requerimientos hídricos del aguacate, especialmente durante las primeras etapas de crecimiento. El sistema de

riego será crucial durante la etapa inicial de la plantación, cuando las plantas requieren una mayor cantidad de agua para asegurar su establecimiento y desarrollo.

Afortunadamente, el terreno cuenta con una infraestructura de recolección de agua de lluvia mediante canales ya instalados, que permiten aprovechar el recurso hídrico disponible de manera eficiente. Adicionalmente, se dispone de un pequeño pozo ubicado a unos metros del cultivo, el cual recibe abastecimiento constante por parte de una empresa contratada para garantizar el suministro de agua dentro del conjunto residencial.

El sistema de riego propuesto se centra en cubrir las necesidades hídricas críticas durante la fase de establecimiento del aguacate, especialmente en los primeros meses de plantación, cuando las raíces jóvenes requieren mayor humedad para adaptarse al suelo. Este sistema de riego es alimentado por el agua recolectada en el pozo y aguas lluvias, utilizando un sistema de bombeo que lleva el agua a un canal de almacenamiento.

### **3.2 Variable de trabajo y condiciones de operación**

El aguacate Hass es un cultivo de alto valor comercial, pero también de gran demanda hídrica. La correcta determinación del caudal de riego es esencial para garantizar la eficiencia en el uso del agua y optimizar la producción. Sin embargo, en este proyecto, el caudal de riego se determina en función de la **humedad del suelo**, medida a través de sensores que permiten ajustar dinámicamente el suministro de agua según las necesidades reales del cultivo. El riego por goteo ha experimentado una evolución hacia caudales más bajos con el fin de maximizar la eficiencia en la aplicación del agua. Actualmente, se emplean goteros de muy bajo caudal, con valores tan bajos como 0,35 L/h, lo cual resulta ser ideal para cultivos como el aguacate, que posee un sistema radicular superficial (Ecomercio Agrario, 2023). La utilización de goteros de bajo caudal permite

una aplicación más gradual del agua, lo que facilita mantener la humedad en las capas superficiales del suelo, donde las raíces de los aguacates tienen mayor capacidad de absorción. Este enfoque aprovecha el agua, asegurando que las plantas reciban el máximo beneficio de cada gota aplicada.

La implementación del riego por goteo se enfoca en la etapa inicial de la plantación, en donde la humedad relativa influye directamente en el prendimiento de la flor y el desarrollo de los frutos. Según diversas fuentes consultadas, la humedad relativa adecuada para esta etapa del cultivo debe oscilar entre 75% y 80%, lo que favorece el desarrollo adecuado de la planta y la producción de frutos (Alfonso Bartoli, 2008). Sin embargo, cuando la humedad relativa supera el 80%, las plantas se vuelven más propensas al desarrollo de plagas y hongos, lo que afecta negativamente la salud de las plantas y su productividad. Este exceso de humedad puede fomentar el crecimiento de algas o líquenes sobre tallos, ramas y hojas, además de enfermedades fúngicas que afectan el follaje, la floración y la polinización, comprometiendo así el desarrollo adecuado de los frutos (Días Colorado, 2018).

Luego de realizar mediciones en el terreno donde se desea implementar el sistema, en un día algo húmedo en la mesa de los santos se obtienen valores entre 70 y 77 % (figura 3) los cuales pueden variar considerablemente en días y épocas de escasez de agua. Se define un rango de humedad relativa de 65% a 75%, este rango fue seleccionado para evitar los riesgos asociados a la alta humedad, ya mencionados anteriormente y para mantener las condiciones más favorables para el crecimiento del aguacate Hass sin comprometer su salud o productividad. En función de los resultados obtenidos, el sistema podría mantenerse hasta una fase de crecimiento controlado, donde se ajustarán los parámetros de riego según las necesidades del cultivo y los valores de humedad del suelo medidos.

**Figura 3**

*Mediciones de humedad en sitio*



#### **4 Diseño del sistema**

El diseño del sistema de riego se compone de tres subsistemas principales, cada uno cumpliendo una función esencial dentro del proceso de captación, transporte y distribución del agua con un orden lógico y programación. La integración de estos subsistemas permite garantizar un suministro de agua estable para la plantación. A continuación, se describen en detalle cada uno de los subsistemas, sus componentes principales y su función dentro del sistema general de riego.

##### **4.1 Subsistema hidráulico de captación y transporte**

El subsistema hidráulico fue diseñado con el objetivo de garantizar el abastecimiento continuo de agua desde las fuentes naturales disponibles hacia un canal de depósito, desde el cual se alimenta el sistema de riego por goteo. Las fuentes de captación consideradas en este diseño son un pozo natural ubicado dentro de la finca y un depósito de recolección de aguas lluvias. El sistema comprende las siguientes etapas:

**Captación desde el lago y el depósito de aguas lluvias:** para definir la vía de succión, se usó la válvula solenoide tres vías-dos posiciones, que trabaja en función de donde halla el recurso hídrico y priorizando el uso del agua del depósito de aguas lluvias.

**Impulsión mediante bomba hidráulica:** El agua captada es conducida mediante una bomba centrífuga eléctrica, seleccionada según requerimientos de caudal y altura manométrica total del sistema. La bomba está instalada en una caseta técnica que proporciona protección frente a la intemperie, y se alimenta mediante una red eléctrica controlada por el sistema automatizado.

**Conducción hacia el canal de depósito:** El agua impulsada se transporta por una tubería, con un diámetro adecuado para minimizar pérdidas por fricción y soportar las condiciones de operación.

**Almacenamiento temporal en canal de depósito:** El canal de depósito actúa como reservorio temporal antes de la distribución final del agua hacia el sistema de riego por goteo. Este canal está diseñado con doble propósito, con capacidad suficiente para amortiguar variaciones en la demanda hídrica diaria y para recolección de agua lluvia a través de la longitud específica de este, lo que permite un uso adecuado del recurso hídrico.

El diseño de este subsistema se realizó considerando principios de la mecánica de fluidos, con el objetivo de garantizar un flujo adecuado desde las fuentes hídricas hasta el canal de depósito. A continuación, se detallan los principales cálculos y fórmulas utilizadas para la selección de los componentes del sistema.

**4.1.1 Cálculo de pérdidas de carga**

Las pérdidas de carga se calcularon empleando la ecuación de Darcy-weisbach (Ec 1). La velocidad del agua es determinada en función del caudal y el diámetro interno de la tubería (Ec 2). Para determinar el factor de fricción *f*, se consideró el régimen de flujo a través del cálculo del número de Reynolds (Ec 3). Formulas tomadas de (Mott, 2006)

$$h_L = f * (L / D) * (v^2 / 2g) \tag{Ec 1}$$

*h<sub>L</sub>* : Pérdida de carga [m]

*f*: Factor de fricción

*L*: Longitud de la tubería [m]

*D*: Diámetro interno de la tubería [m]

*v*: Velocidad del agua [m/s]

*g*: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$$v = Q / (\pi * D / 4) \tag{Ec 2}$$

*Q*: caudal [m<sup>3</sup>/s]

$$Re = (\rho * v * D) / \mu \tag{Ec 3}$$

*Re*: Número de Reynolds (adimensional)

$\rho$ : Densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$ : Viscosidad dinámica del agua [Pa·s]

Dependiendo del valor obtenido de *Re*, el flujo puede clasificarse como laminar (*Re* < 2000), transitorio (2000 < *Re* < 4000) o turbulento (*Re* > 4000). Para flujo turbulento, se utilizó la fórmula empírica de Swamee-Jain (Ec 4) para determinar el factor de fricción:

$$f = 0.25 / [\log_{10}(\epsilon / (3.7D)) + (5.74 / \text{Re}^{0.9})]^2 \quad \text{Ec 4}$$

$\epsilon$ : Rugosidad absoluta de la tubería [m]

En el caso de las pérdidas por accesorios, se reemplaza el factor (L/D) por un valor constante K, en función del tipo de accesorio (Ver anexo 2).

Para la evaluación de las alternativas de diseño, se reemplaza en la Ec 1, los términos “f \* (L / D)” por un coeficiente de pérdidas K, obteniendo así una reducción de la ecuación de Darcy Weisback (Ec 5).

$$h_L = K * (v^2/2g) \quad \text{Ec. 5}$$

#### **4.1.2 Cálculo de la altura manométrica**

Para la selección de la bomba se empleó la Ecuación de Bernoulli (Ec 6), entre el punto de captación (superficie del pozo o del depósito de aguas lluvias) y el punto de descarga (canal de depósito). Esta ecuación permite determinar la energía por unidad de peso que debe suministrar la bomba para vencer la diferencia de energía entre los dos puntos y compensar las pérdidas del sistema. Se asumen condiciones atmosféricas en ambos extremos del sistema (es decir,  $P_1 = P_2$ ), y velocidades despreciables respecto al tramo de impulsión principal, simplificando así la ecuación de Bernoulli (Ec 7). Formulas tomadas de (Mott, 2006)

$$P_1/\gamma + v_1^2/2g + z_1 + HB = P_2/\gamma + v_2^2/2g + z_2 + h_L \quad \text{Ec 6}$$

$$HB = (z_2 - z_1) + h_L + v_2^2/2g \quad \text{Ec 7}$$

$P/\gamma$ : Altura de presión [m]

$v^2/2g$ : Altura de velocidad [m]

$z$ : Altura geométrica [m]

$HB$ : Altura de bombeo requerida [m]

$h_L$ : Pérdidas de carga [m]

Con esta metodología se calculó la altura que la bomba debe suministrar para garantizar el transporte de agua desde la fuente hasta el canal de depósito, teniendo en cuenta las pérdidas de energía asociadas al flujo en la tubería.

#### **4.1.3 Material de la tubería**

Según las comparaciones realizadas por (Hollands, 2016) entre el PVC y HDPE, donde evaluaron requisitos de eficiencia, durabilidad y costos operativo de cada uno. Se optó por el uso de **tubería de PVC de alta presión** de una rugosidad absoluta  $\varepsilon = 1.5 \times 10^{-6} [m]$ . Para la conducción del agua desde la fuente de captación hasta el canal de depósito. Estos fueron algunos parámetros a tener en cuenta:

**Costo y disponibilidad:** es un material ampliamente disponible y de bajo costo, lo que facilita su implementación en sistemas de riego a gran escala (Merchán Chaparro, Paez Ramírez, Tamayo Pita, Torres Gómez, & Aguirre Rodríguez, 2024).

**Durabilidad:** la tubería es resistente a la corrosión y al desgaste, lo que asegura su durabilidad a lo largo del tiempo sin necesidad de mantenimiento frecuente. Esto es crucial en el contexto de sistemas de riego de largo plazo, donde la eficiencia operativa debe ser constante.

Facilidad de instalación: es fácil de instalar debido a su ligereza y a los métodos de unión que se pueden emplear, como los adhesivos y los sistemas de acoplamiento roscado, lo cual reduce los tiempos de ejecución y los costos laborales.

#### ***4.1.4 Definición de variables y consideraciones***

Para los cálculos hidráulicos y de Bernoulli es importante considerar la línea con mayor altura, ya que esta influye directamente en la carga que debe soportar la bomba influyendo en los requisitos de presión y potencia necesarios para su funcionamiento. En este caso la línea que succiona agua del pozo está a 5 metros de altura bajo la posición de la bomba, mientras que del depósito de agua lluvias se encuentra a casi en el mismo nivel de la bomba. Por ende, en total son 10 metros de succión, 24 metros de descarga, la válvula solenoide y el uso de accesorios para tener en cuenta en los cálculos (figura 5). No obstante, si el usuario requiere una alternativa de menor costo, puede emplear una “T” de PVC para dividir las dos líneas de succión, colocando en cada una de ellas una válvula de dos vías. Esta opción resulta más económica, pero al ser un sistema más robusto en términos de espacio físico, requiere mayor área de instalación y se incurre en un re diseño en el sistema y control debido a los nuevos accesorios que se desean implementar.

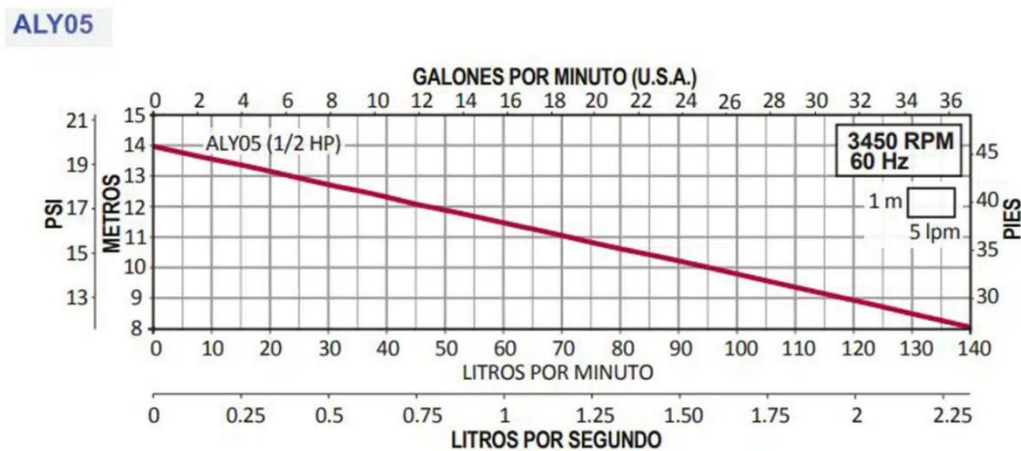
Se define un rango de caudal de 1 a 5 [L/s], dado que se trata de un campo pequeño de 600 m<sup>2</sup> y el sistema de riego utilizado es por goteo, que requiere un flujo controlado y eficiente. A partir de esto, se realizó la evaluación del sistema con los valores de caudal estipulados, con una variación de 1 L/s en cada prueba y con un tamaño de tubería de 1.5” y 2”, con el fin de seleccionar la bomba.

**4.1.5 Selección de la bomba hidráulica principal**

En base a los valores arrojados, para la tubería de 2'' entre los valores de 1 a 5 L/s se requiere una H de bomba entre 5 a 9 metros respectivamente, mientras que con un diámetro de tubería de 1,5" se requiere una H de bomba de entre 5 y 19 metros según el rango de caudal mencionado. Teniendo en cuenta que el sistema requiere una baja capacidad, se selecciona una bomba de 0.5 HP (Ver figura 4).

**Figura 4**

*Curva de rendimiento Altura x caudal bomba hidráulica principal*



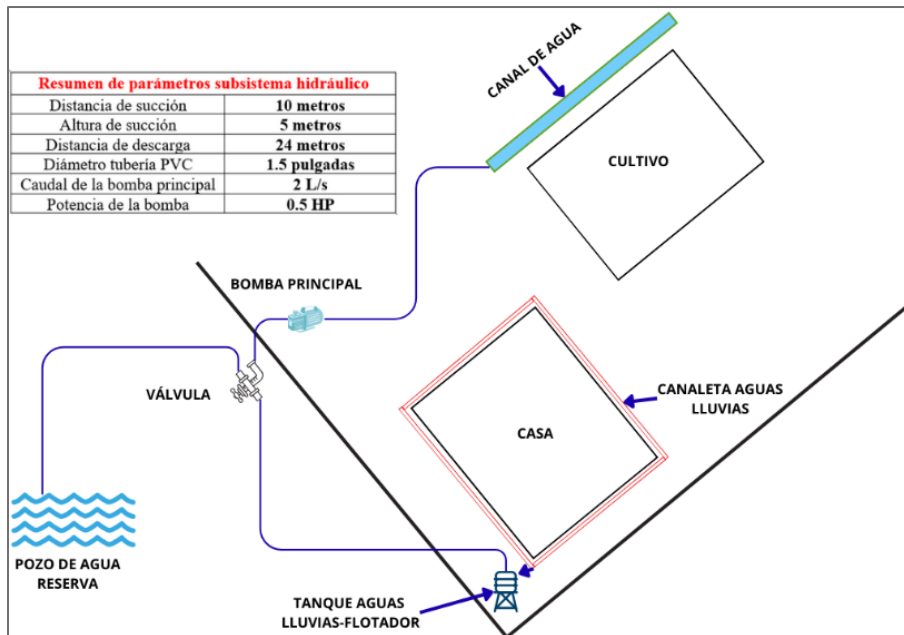
*Nota. Adaptado de Bombeo, Bomba Aqua Pak, Centrífuga, Acero Inoxidable, 230 Vac, 0.5 Hp, SxD 1.25"x 1", Monofásica, 10 MCA/25 GPM, ref. ALY05/1230 por (Bombeo.co, s. f.)*

Esta bomba maneja un caudal de hasta 2.25 L/s, en base a esto se evaluaron los resultados obtenidos para un caudal de 2 L/s. Para esta configuración se requiere una altura de 5.8 m en la tubería de 2" y 7.7 m en la tubería de 1.5". A pesar de que la tubería de 1,5" en términos generales presenta mayores pérdidas, la bomba seleccionada brinda 9 metros a 2 L/s, por lo tanto, se puede

usar y esta tubería presenta un menor costo de implementación. Los cálculos, iteraciones y resultados que comprende este subsistema se realizaron mediante el software EES (por sus siglas en inglés Engineering Equation Solver) (Ver anexo 4).

**Figura 5**

*Subsistema hidráulico y parámetros importantes*

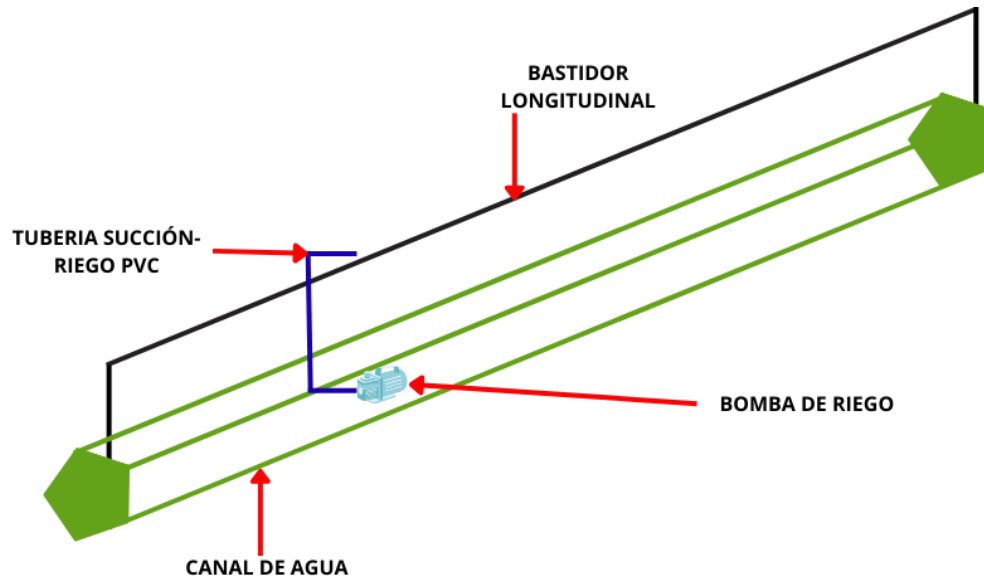


**4.2 Subsistema hidráulico de goteo y distribución**

Este subsistema está diseñado para transportar el agua desde su fuente, en el canal de abastecimiento (figura 6), hasta los puntos de aplicación final en el campo, a través de un sistema de tuberías de PVC. La elección de PVC como material para las tuberías, al igual que en el subsistema anterior, se debe a sus propiedades de resistencia a la corrosión, ligereza y costo relativamente bajo, lo que lo convierte en una opción recurrente para el transporte de agua en sistemas de riego.

**Figura 6**

*Boceto subsistema hidráulico de goteo y distribución*



Para asegurar un suministro adecuado a lo largo de todo el trayecto, se realiza un análisis detallado de las características hidráulicas del sistema, teniendo en cuenta las pérdidas de carga. Mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli, se ajustan los parámetros del sistema, como el tamaño y la disposición de las tuberías, y se definen las especificaciones necesarias para la bomba de riego.

#### **4.2.1 Canal de distribución**

El canal de abastecimiento de agua funciona como un reservorio lineal a lo largo de la plantación, con el objetivo de almacenar el agua necesaria para el riego. El canal, con longitud de 30 metros, ancho de 0.5 metros y profundidad de 0.5 metros, tiene la capacidad de almacenar 7.5 metros cúbicos de agua. En este caso, se ha instalado un flotador que permite monitorear el nivel

del agua en el canal, asegurando que se mantenga dentro de los rangos requeridos para un suministro adecuado al sistema de riego. Este flotador actúa como un indicador, permitiendo detectar si el canal está lleno o si necesita más agua y así activar la bomba principal.

Las opciones frecuentes para la fabricación de este canal como algún tipo de plástico, madera o metal fueron descartadas debido al alto costo en el insumo para la elaboración. De esta manera se obtuvo una solución excavando la tierra en las dimensiones mencionadas y recubriendo con 50 metros cuadrados de una geomembrana impermeable (Anexo 3) que asegura la estanqueidad y el adecuado transporte del agua; esta metodología permite aprovechar el propio suelo como estructura de soporte, reduciendo la necesidad de materiales adicionales y, en consecuencia, los costos de construcción. El uso de la geomembrana garantiza la impermeabilidad del sistema, obteniéndose así un canal eficiente, económico y de fácil mantenimiento, especialmente apropiado para aplicaciones de riego que requieren funcionalidad y durabilidad a bajo costo.

#### ***4.2.2 Bomba de riego y línea de descarga***

La bomba sumergible es el componente encargado de generar la presión necesaria para transportar el agua desde el canal de abastecimiento hacia el sistema de distribución. La selección de la bomba se realizó al completar los cálculos hidráulicos mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli, obteniendo el caudal y la presión adecuados para el sistema de riego. La línea de descarga conecta la bomba sumergible con los goteros y comprende un tubo vertical de 1.5 metros de altura, un codo de 90 grados y una tubería longitudinal de 20 metros. Estos elementos permiten redirigir y transportar el agua hacia el sistema de distribución. El diseño de esta línea toma en cuenta la longitud total de la tubería, el diámetro adecuado y las pérdidas por fricción debido a los codos y la tubería longitudinal. Al no contar con válvulas de control, el sistema está diseñado para

operar con un flujo constante, dependiendo únicamente de la capacidad de la bomba y las características del sistema de tuberías.

La línea de retorno para el agua sobrante, compuesta por dos codos y una tubería que dirige el agua de regreso al canal de abastecimiento. Esta línea de retorno tiene una pendiente del 5%, lo que permite que el agua fluya por gravedad de vuelta al canal, sin requerir fuerza adicional de la bomba para el retorno.

#### **4.2.3 Goteros**

Los goteros regulables de 1/4" (Anexo 5) son el componente final del subsistema hidráulico y están diseñados para distribuir el agua de manera precisa y controlada en la zona radicular de las plantas. Estos goteros permiten ajustar el caudal de agua según las necesidades específicas de cada área del cultivo, proporcionando un riego regulado y sin desperdicio. Para el caso de este terreno, se utilizaron tres goteros equidistantes a lo largo de la línea de riego, asegurando que toda el área reciba una distribución específica de agua por árbol.

#### **4.2.4 Cálculos y consideraciones de subsistema hidráulico de goteo y distribución**

Para el diseño y análisis del subsistema hidráulico, se aplicó la ecuación de Bernoulli (Ec 7) para calcular las variaciones de presión, velocidad y altura a lo largo del sistema de tuberías, desde el reservorio de agua estancada hasta los goteros. Dado que el agua en el reservorio no tiene velocidad inicial ( $v_1 = 0$ ), la bomba sumergible, encargada de generar la presión necesaria, proporciona el impulso para el flujo. No se consideró una línea de succión debido a que la bomba es sumergible, y el sistema únicamente cuenta con una línea de descarga.

En el análisis, se tomaron en cuenta los componentes del sistema, como la tubería vertical de 1.5 metros de altura, un codo de 90°, y una tubería horizontal de 20 metros de un tamaño de 1'' que conecta la bomba con los goteros. Estos elementos fueron evaluados en términos de sus

pérdidas de carga, permitiendo ajustar los parámetros del sistema, como el diámetro de las tuberías y la presión de salida, asegurando un flujo eficiente de agua desde el reservorio hasta los puntos de riego. Los cálculos, iteraciones y resultados que comprende este subsistema se realizaron mediante el software EES (por sus siglas en inglés Engineering Equation Solver) (Anexo 6).

#### ***4.2.5 Selección de la bomba de riego***

Considerando que las bombas sumergibles comerciales suelen operar con caudales que varían entre 200 y 1500 galones por hora (aproximadamente 0.21 a 1.5 L/s), se definió un caudal de 0.25 L/s para el sistema. Se eligió la configuración de caudal más baja, dado que los goteros no requieren un alto caudal para su funcionamiento adecuado. Cada gotero necesita entre 1 y 4 L/h (Liotta, 2015), y dado que solo se emplean 3 goteros en el sistema, este caudal es suficiente para cubrir las necesidades del riego. Sin embargo, es necesario mantener un caudal mínimo para asegurar el correcto funcionamiento de la bomba y evitar sobrecargas o fallos en el sistema.

Para evaluar las pérdidas de carga localizadas en los goteros, de acuerdo con (Rodríguez, Sirgado, Clavo, & Villasante, 2004) donde realizan un estudio detallado de las pérdidas en ramales de goteo, se proponen varias opciones para el factor  $k$  de los goteros. Para nuestro caso de estudio, se ha definido un valor promedio de  $k=0.5$ , lo cual se utiliza para calcular las pérdidas adicionales de carga debido a la inserción de los goteros en las tuberías de distribución.

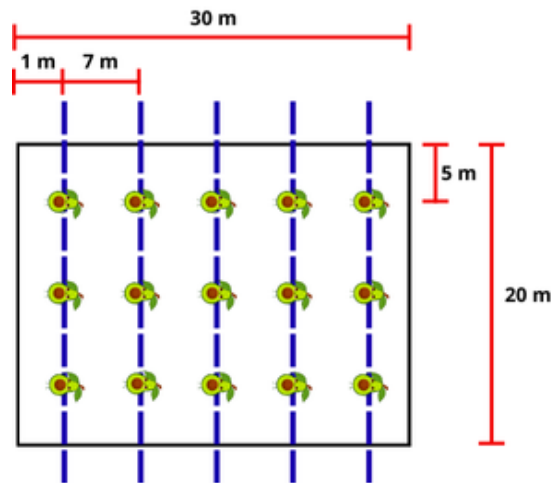
Con la configuración definida en el análisis de Bernoulli, se determinó que la altura necesaria para la bomba es de aproximadamente 2 metros. A partir de este valor y considerando los requisitos de caudal, se seleccionó una bomba de 40 Watts con las siguientes especificaciones técnicas (Anexo 7).

### 4.3 Subsistema de movimiento-locomoción

El sistema de locomoción para el riego en el cultivo de aguacate Hass se ha diseñado con el objetivo de cubrir de manera eficiente y equitativa todo el terreno de 30x20 metros. El diseño contempla filas de cultivo, con 3 árboles cada uno, distribuidas a lo largo del terreno (figura 7). En total, se sembraron 5 filas de cultivo, dispuestas de manera que se maximicen las zonas de riego.

**Figura 7**

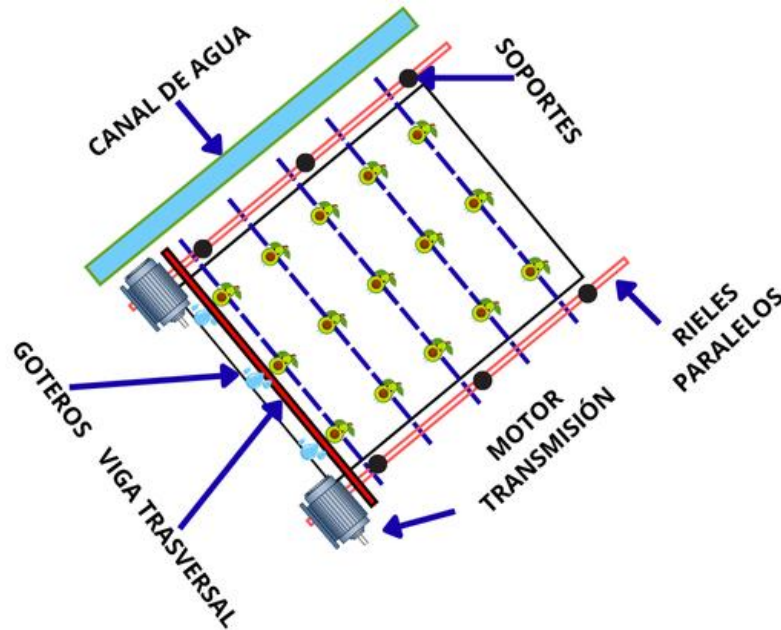
*Distribución y organización del cultivo*



La estructura del sistema se organiza de manera longitudinal, ubicando soportes de verticales a ambos lados del cultivo. Estos soportes son los encargados de sostener los rieles que se distribuyen paralelos del terreno. Estos soportan un perfil IPE de acero A36 de manera transversal, cumpliendo la función de desplazarse a lo largo del cultivo (figura 8). El perfil transversal soporta el otro subsistema encargado del riego, contemplando la de tubería en PVC (suministro y retorno) y los goteros encargados del riego, asegurando uniformidad en todas las áreas.

**Figura 8**

*Boceto sistema de locomoción*



Este sistema de locomoción permite que el perfil con el mecanismo de riego se desplace longitudinalmente sobre los rieles, garantizando un riego automático y uniforme. Además, esta configuración facilita el mantenimiento y la automatización del proceso, ajustando el riego de acuerdo con las necesidades específicas de cada zona del terreno sin intervención constante.

#### **4.3.1 Cálculo y selección del perfil de acero transversal**

Para el diseño del perfil de acero que va a soportar nuestro sistema de riego se tuvo en cuenta factores como las dimensiones y propiedades del PVC, las propiedades del agua y los catálogos de perfiles que se encuentran en el mercado junto con las propiedades del acero estructural. Se hace el cálculo del volumen del tubo para iniciar (Ec 8) y así hallar el peso del mismo.

**Datos del tubo de PVC:**

- Longitud del tubo: 20 metros.
- Diámetro del tubo: 1 pulgada (1" = 0.0254 m).
- Grosor de la pared: El grosor estándar para tubos de PVC de 1 pulgada es de aproximadamente 2.3 mm (0.0023 m).
- Densidad del PVC: Aproximadamente 1.4 g/cm<sup>3</sup> o 1400 kg/m<sup>3</sup>.
- Peso específico del PVC: 1400 kg/m<sup>3</sup>.

El volumen de un tubo es el volumen del cilindro hueco, que se calcula como la diferencia entre el volumen del cilindro exterior (con el diámetro exterior) y el volumen del cilindro interior (con el diámetro interior).

$$V = \pi \left( \frac{D^2 - d^2}{4} \right) * L \quad \text{Ec 8}$$

$$V = \pi \left( \frac{(0.0254)^2 - (0.0231)^2}{4} \right) * 20$$

$$V = 0.00175 \text{ m}^3$$

Sustituyendo los valores se obtuvo un volumen de 0.00175 metros cúbicos. Para calcular la masa, se multiplico este volumen por la densidad del PVC, resultando un valor de 2.453 Kg para los 20 metros de longitud. Dicha masa obtenida se utilizó para el cálculo de su peso neto o carga que se va a distribuir sobre el perfil seleccionado. La masa por la gravedad nos dio una carga de 24 Newtons (N) de manera uniforme sobre el acero.

El volumen del agua contenida dentro del tubo es simplemente el volumen del cilindro interior en el PVC (Ec 9), conociendo la densidad específica del agua se halló el valor de la masa y posteriormente su peso.

$$V_{\text{agua}} = \pi \left( \frac{d^2}{4} \right) * L \quad \text{Ec 9}$$

$$V_{\text{agua}} = \pi \left( \frac{(0.0231)^2}{4} \right) * 20$$

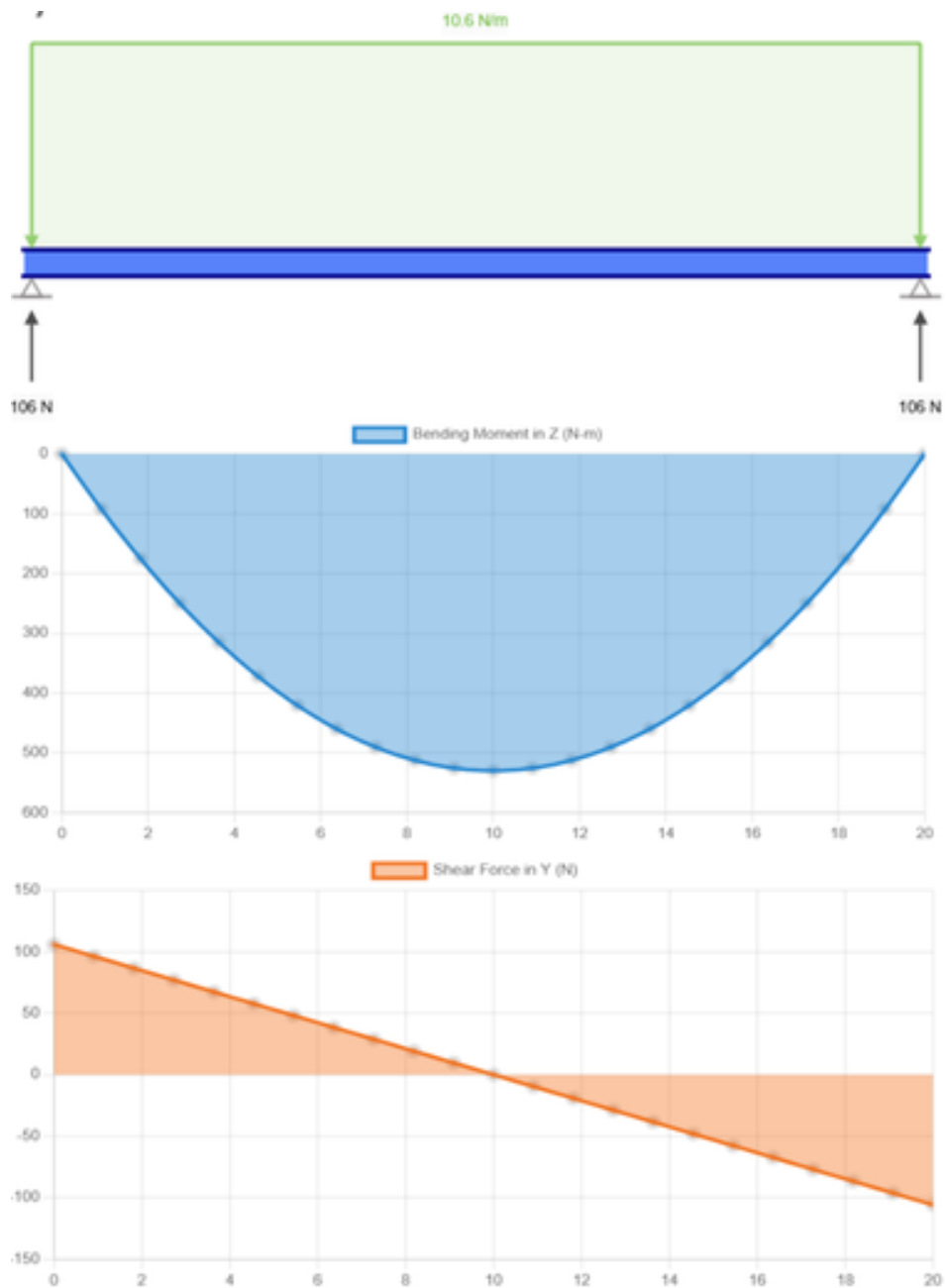
$$V_{\text{agua}} = \mathbf{0.0084 \text{ m}^3}$$

Con un peso del agua equivalente a 82 N en la situación donde toda la tubería está llena se concluyó que, la carga total distribuida que va a soportar el perfil por parte del subsistema de riego se ve reflejada en la suma de peso del PVC con el del agua, excluyendo el peso de los tres goteros al ser un valor despreciable (anexo 5).

El peso del tubo vacío (24 N) y el peso del agua (82 N) equivale a una carga de 106 N distribuida de manera uniforme, pero según el diseño se debe instalar dos canales iguales (suministro y retorno) pero uno con mayor inclinación para el retorno del agua, concluyendo que esta carga será el doble al ya definido, con un valor de **212 N**. Por medio de análisis de resistencia, se observa el diagrama de las cargas puntuales aplicadas sobre el perfil, los apoyos, el diagrama de cortante y de momentos (figura 10).

**Figura 9**

*Diagrama de esfuerzos y momentos del perfil trasversal*



*Nota.* Adaptado de SkyCiv análisis de viga y diseño estructural por (SkyCiv, s. f.)

**Diagrama de Cargas:** la carga total que actúa sobre la viga es el producto de la intensidad de la carga y la longitud de la viga. Como se observa en la figura anterior una carga por longitud de 10.6 N/m

**Diagrama de Cortante:** en una viga con carga distribuida uniforme, la fuerza cortante máxima ocurre en los apoyos. Si la carga total es de 212 N al dividirla entre los apoyos, obtenemos 106 N, tanto para el apoyo A como para el apoyo B, ya que la carga es simétrica.

**Diagrama de Momento Flector:** el momento flector máximo es de 530 N·m (en el centro de la viga), lo que indica el máximo esfuerzo de flexión que la viga tendrá que soportar. El momento flector disminuye hacia los extremos de la viga.

Seleccionado el perfil IPE 140 para comparar las propiedades de este acero con respecto a la deformación máxima en sistemas con carga distribuida (Ec. 10) y la admisible, además el esfuerzo de flexión máxima (Ec 11) teniendo en cuenta la resistencia a la tracción del material. Las fórmulas usadas pertenecen a (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2018) y las características del perfil mencionado son las siguientes (Anexo 8):

- Altura: 140 mm (0.14 m)
- Ancho de las alas: 73 mm (0.22 m)
- Momento de inercia:  $I = 5.42 \times 10^{-6} m^4$  (Anexo #4)
- Peso aproximado: 12.9 kg/m (aproximadamente)
- Módulo de elasticidad (E) del acero A36:  $E = 200 \times 10^9 N/m^2$
- Resistencia a la tracción del acero A36: 250 MPa

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad \text{Ec 10}$$

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{5 \cdot (10.6) \cdot 20^4}{384 \cdot (200 \times 10^{-9} \text{ N/m}^2) \cdot (5.42 \times 10^{-6} \text{ m}^4)}$$

$$\delta_{\text{máx}} = \mathbf{0.0204 \text{ m} = 20.4 \text{ mm}}$$

$$\sigma_f = \frac{M \cdot c}{I} \quad \text{Ec 11}$$

$$\sigma_f = \frac{530 \cdot 0.07}{5.42 \times 10^{-6} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_f = \mathbf{6.855 \text{ MPa}}$$

Según la (American Institute of Steel Construction, 2022) norma AISC 360 , la deflexión máxima de una viga no debe superar valores según la relación de la fracción entre la Longitud y un valor adimensional de 240, para este caso dicho cociente es equivalentes a **83.3 mm**, sin embargo, en el caso de la viga IPE 140, cuya deflexión calculada es de 20.4 mm, esta no representa un riesgo para la estructura, ya que el uso previsto es para un sistema de riego, que no está sometido a cargas críticas. En comparación con otras alternativas, la viga seleccionada representa una deflexión menor a los perfiles IPE 120 y IPE 100 (Tabla 1). El esfuerzo máximo de **6.855 MPa** se mantiene muy por debajo de la resistencia máxima del acero A36 (250 MPa), aun al aplicar un factor de seguridad de 2, el perfil es seguro y suficiente para soportar las cargas sin comprometer su rendimiento. Este perfil ofrece una buena resistencia y rigidez sin el riesgo de un sobredimensionamiento, lo que lo convierte en una solución adecuada para el diseño estructural de la viga transversal.

**Tabla 1**

*Comparativa entre perfiles IPE según calibre para selección de la viga transversal*

Perfil	Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)
IPE 80	137.8	26.47
IPE 100	64.57	15.5
IPE 120	34.74	10
<b>IPE 140</b>	<b>20.4</b>	<b>6.855</b>
IPE 160	12.7	4.877

**4.3.2 Cálculo y selección de rieles o vigas paralelas**

Para el diseño de cada uno de los rieles paralelos, se tiene en cuenta que todo el peso que van a soportar presenta una deflexión mayor en el centro de la longitud (15 metros) definida en ellas. Para analizar esta carga se tienen en cuenta valores ya calculados anteriormente y otros muy cercanos según datos en la industria; como en este caso es el peso de los motores eléctricos y las ruedas conductoras-conducidas dispuestas para cada sección (50 kg en total).

Al sistema de riego sujeto en la viga transversal se añadió el peso de la viga transversal A36 desde el catálogo (Anexo 8), se extrae de la referencia un valor de 12.9 Kg/m por tramo para la IPE 140, al contar con una longitud de 20 metros se obtuvo un total de 2531 N de solo el peso de la viga transversal que deben soportar los rieles paralelos. Todo este sistema cumple la función de traslación y debe soportar una carga igual a la suma de estos tres pesos (Ec 12).

$$W_T = W_{\text{riego}} + W_{\text{viga}} + W_{\text{transmisión}} \tag{Ec 12}$$

$$W_T = 212 + 2531 + 490$$

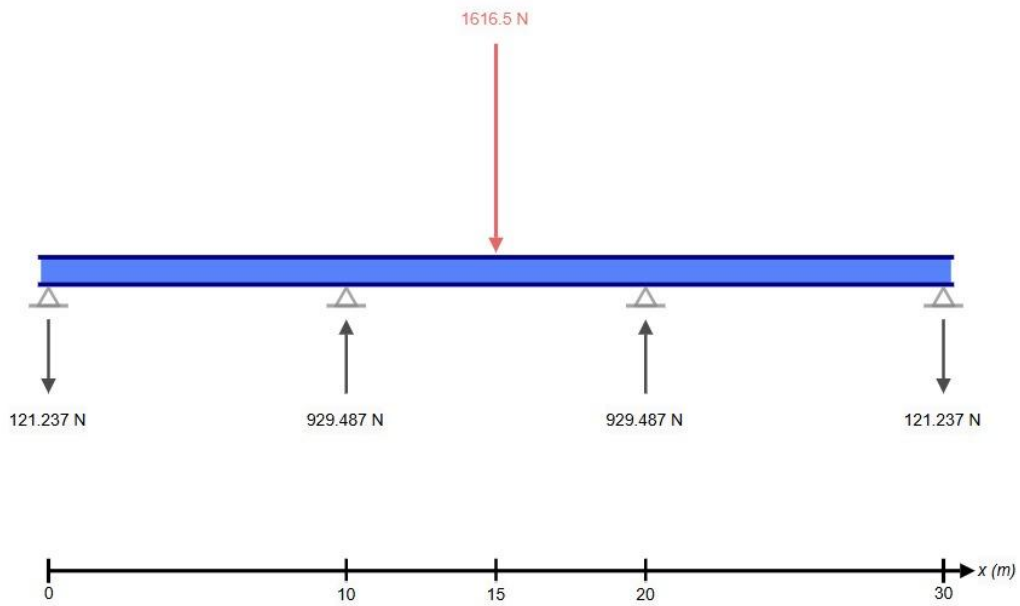
$$W_T = 3233 \text{ N}$$

La carga que debe soportar cada riel será la mitad del valor calculado con la ecuación 12, es decir, una carga puntual de **1616.5 N** sobre una viga IPE de 30 metros de longitud y cuatro

apoyos distribuidos uniformemente (figura 10). Por medio del análisis de resistencia se analizaron los diagramas de cortante y de momentos (figura 11) para seleccionar el calibre del perfil adecuado para que cumpla la función definida.

**Figura 10**

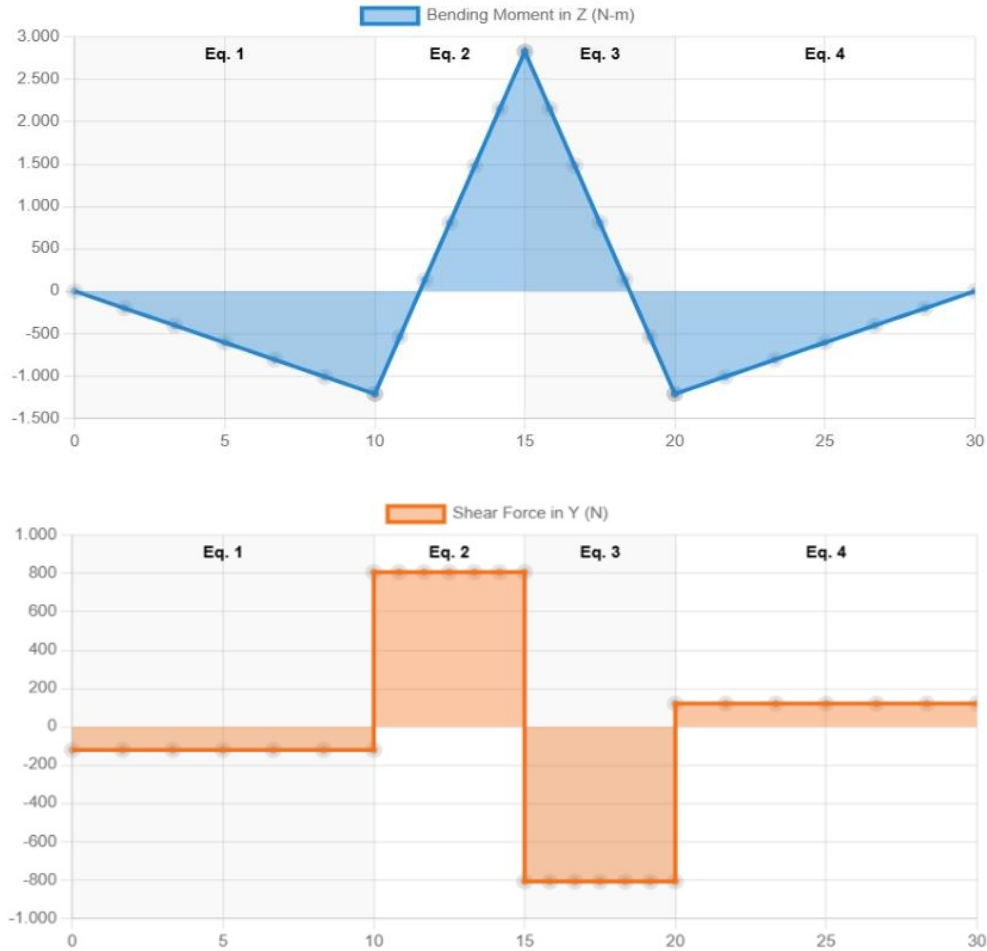
*Configuración y distribución de cargas para el riel*



*Nota.* Adaptado de SkyCiv análisis de viga y diseño estructural por (SkyCiv, s. f.)

**Figura 11**

*Diagrama de esfuerzos y momentos del riel paralelo*



*Nota.* Adaptado de *SkyCiv análisis de viga y diseño estructural* por (SkyCiv, s. f.)

**Diagrama de Carga:** el diagrama de carga muestra una carga puntual P1 aplicada en el centro de la viga, a los 15 m. La reacción máxima es de 929.48 N en los apoyos del medio, reflejando un equilibrio simétrico debido a la carga centrada y disminuyendo en los extremos.

**Diagrama de Cortante:** el cortante máxima que se visualiza es en los apoyos del medio, correspondiente a 808.25 N. Este comportamiento es típico de una carga puntual, con la magnitud máxima en los apoyos y un cambio de signo en la ubicación de la carga.

**Diagrama de Momento:** el momento va en aumento desde los extremos de la viga hacia el centro donde se aplica la carga puntual, con un valor correspondiente de 2828.8 N·m en el centro de la viga, donde se aplica la carga puntual. Hay cambios de sentido en cada apoyo y en la posición de la carga puntual.

Seleccionado el perfil IPE 300 para comparar las propiedades de este acero con respecto al esfuerzo máximo de flexión y el admisible, teniendo en cuenta solo en este caso que la fórmula de la deflexión máxima es específica para una carga ubicada en la mitad de cada riel (Ec 13). Las fórmulas usadas pertenecen a (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2018) y las características del perfil IPE 300 A36 son las siguientes (Anexo 8):

- Altura: 300 mm (0.3 m)
- Ancho de las alas: 150 mm (0.15 m)
- Momento de inercia:  $I = 8.35 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
- Peso aproximado: 42.2 kg/m (aproximadamente)
- Módulo de elasticidad (E) del acero A36:  $E = 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
- Resistencia a la tracción del acero A36: 250 MPa

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad \text{Ec 13}$$

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{(1616.5) \cdot 30^3}{48 \cdot (200 \times 10^9) \cdot (8.35 \times 10^{-5})}$$

$$\delta_{\text{máx}} = 0.054 \text{ m} = 54 \text{ mm}$$

$$\sigma_f = \frac{(2828.8) * (0.15)}{(8.35 \times 10^{-5})}$$

$$\sigma_f = 5,07 \text{ MPa}$$

Según la longitud del riel (30m) y la norma AISC (American Institute of Steel Construction, 2022) se debe cumplir un valor de **125 mm** para la deflexión máxima permitida. Siendo un valor menor la que se obtuvo con el perfil IPE 300, al igual que el esfuerzo de flexión que no supera el valor admisible, ni aun contemplando un factor de seguridad de 2. Otro perfil aceptable es el de calibre 270 (Tabla 2) pero las dimensiones de su base no favorecen la selección de la rueda de transmisión de movimiento del motor al riel. El sistema se equilibra debido a la disposición inicial y los apoyos distribuidos a lo largo de la luz del riel, siendo especial la geometría del perfil para generar la sujeción directa respecto a la rueda de transmisión y el catálogo que ofrece el proveedor para este tipo de sistemas (Miguel Abad componentes de gruas, 2025).

**Tabla 2**

*Comparativa entre perfiles IPE según calibre para selección del riel*

Perfil	Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)
<b>IPE 220</b>	164	11.23
<b>IPE 240</b>	116.8	8.72
<b>IPE 270</b>	78.5	6.59
<b>IPE 300</b>	<b>54</b>	<b>5.07</b>
<b>IPE 160</b>	38.63	3.6

### 4.3.3 Cálculo y selección de soportes

En el diseño de los soportes para este sistema estructural, se seleccionaron perfiles SHS de acero A36, material que garantiza una alta resistencia y durabilidad para las cargas aplicadas. Los soportes están diseñados para fallar por pandeo debido a las fuerzas de compresión que deben

soportar. Estas fuerzas alcanzan su valor máximo en los dos apoyos intermedios, donde las reacciones son de 929.4 N en cada uno (Figura 11). La carga crítica será la suma de la reacción máxima generada con el peso de la viga que deberá soportar cada apoyo (Anexo 8), el riel pesa 42.2 kg por metro, resumido a 12419.46 N en total, pero cada apoyo deberá soportar 3104.8 N, más el valor de la reacción ya mencionado anteriormente.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(L_e)^2} \quad \text{Ec 14}$$

$P_{cr}$ : carga crítica

$L_e$ : longitud máxima en función de la carga crítica

Para garantizar la seguridad y estabilidad del sistema, se aplicó un factor de seguridad de 2, lo que implica que los soportes fueron diseñados para resistir el doble de la carga máxima estimada antes de experimentar fallos. En el diseño de estos soportes, se utilizó la ecuación de Euler para el pandeo (Ec 14) (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2018), tomando como base que la carga máxima que deben soportar con el factor de seguridad es de, **6051 N**. A partir de esta carga máxima, se calculó la longitud efectiva despejándola de la ecuación, teniendo en cuenta que los apoyos en los extremos son fijos (Anexo 10), por ende, se aplica un factor de 0.5 la longitud real que deben tener los soportes para evitar el pandeo y asegurar que los perfiles no fallen bajo condiciones de carga máxima.

Realizando el cálculo con un perfil **SHS de 60x60x3.2** y sus propiedades (Anexo 9), despejando la longitud máxima del soporte que se puede escoger para que el perfil no sufra pandeo por la carga crítica a compresión. Se concluye que la longitud del soporte puede ser de hasta 19 metros sin sufrir pandeo.

$$6051 = \frac{\pi^2(200 \times 10^9)(3.82 \times 10^{-7})}{(0.5 * L_e)^2}$$

$$L_e = 19.33 \text{ m}$$

Además, la tierra donde se instalarán los soportes es medianamente firme, por lo que se recomienda el uso de zapatas de concreto prefabricadas como base de anclaje, distribuyendo eficientemente las cargas hacia el suelo y evitando posibles desplazamientos o asentamientos. Este diseño, garantizará la estabilidad y resistencia de los soportes de un metro y medio de longitud durante el tiempo de operación en las condiciones de la plantación.

#### ***4.3.4 Cálculo y selección del conjunto potencia y transmisión***

Para que este sistema funcione es indispensable contar con dos motores monofásicos, ruedas conductoras y conducidas por cada lado, que deben ir de manera sincrónica buscando un sistema estable y con buena potencia. Se pensó en el mecanismo que usan los puentes grúa para trasladarse hacia adelante y para atrás (figura 12), en la mayoría de situaciones se usan motores trifásicos por los requerimientos de la industria junto a la carga que se debe movilizar. En nuestro sistema contamos con dos motores monofásicos programados desde el control, con el fin de permitirnos alternar los sentidos cuando se requiera. La salida del motor se acopla reductores para aprovecharlos mejor, obteniendo mayor torque, traducido en la capacidad de romper un punto de inercia más alto del que el motor nos pueda entregar. Los motores van acoplados directamente con un freno electromagnético para obtener precisión y en caso de algún percance poder accionarlo y frenar el sistema.

**Figura 12**

*Mecanismo para transmisión de movimiento en puentes grúas*



*Nota.* Adaptado de *Elevación SAC, conjuntos de grúas componentes y accesorios* por (ELEVACION SAC, s. f.)

$$T = F \cdot r \quad \text{Ec 15}$$

$$P = T \cdot \omega \quad \text{Ec 16}$$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad \text{Ec 17}$$

$$P_{\text{motor}} = \frac{P}{\eta} \quad \text{Ec 18}$$

La potencia requerida para cada motor se determinó considerando el peso total que debe movilizarse, que viene siendo la viga transversal, subsistema de goteo y la fricción del sistema. A partir de estos factores, se calculó el torque necesario (Ec 15) teniendo el peso a mover y el radio (r) de la rueda seleccionada. La rueda elegida, de acuerdo con el catálogo de componentes de puente grúa (Anexo 11), permite una distribución adecuada de la carga y asegura que el sistema se desplace suavemente sobre los rieles, además, fue útil para hallar la velocidad angular (Ec 17)

Teniendo en cuenta el radio exterior de esta. La velocidad de desplazamiento lineal de 0.5 m/s fue tomada de catálogos de operación de este tipo de sistemas (AICRANE, 2025), por ende, la potencia del motor se despejó de la (Ec 16). Se tuvo en cuenta la eficiencia del motor ajustada al 85% en (Ec 18) para compensar las pérdidas del sistema. Este diseño garantiza que el motor monofásico seleccionado sea capaz de mover la viga a lo largo de todo el cultivo, con la capacidad de soportar la carga y mantener un funcionamiento seguro y eficiente durante su operación.

$$T = 1371.5 \text{ N} \cdot 0.355 \text{ m}$$

$$\mathbf{T = 486.9 \text{ Nm}}$$

$$\omega = \frac{0.5 \text{ m/s}}{0.355 \text{ m}} = \mathbf{1.408 \text{ rad/s}}$$

$$\cdot P_{\text{motor}} = \frac{486.9 \cdot 1.408 \cdot 0.85}{746}$$

$$\mathbf{P_{\text{motor}} = 0.91 \text{ Hp}}$$

Según los cálculos realizados, se requiere un motor monofásico de **un caballo de fuerza** para mover el sistema en cada riel. Teniendo en cuenta que los motores comerciales están diseñados para funcionar a altas revoluciones por minuto (rpm), es necesario utilizar un reductor que proporcione una relación de 100:1. Esta relación permitirá que la rueda y el sistema en su conjunto operen a la velocidad ya mencionada y el torque adecuados para el movimiento transversal de la viga. Además, se ha seleccionado un freno electromagnético (figura 13) que debe ser capaz de contrarrestar el torque generado por el motor, asegurando así un control adecuado del sistema y evitando que el movimiento descontrolado.

**Figura 13**

*Bocetos del conjunto potencia y transmisión*



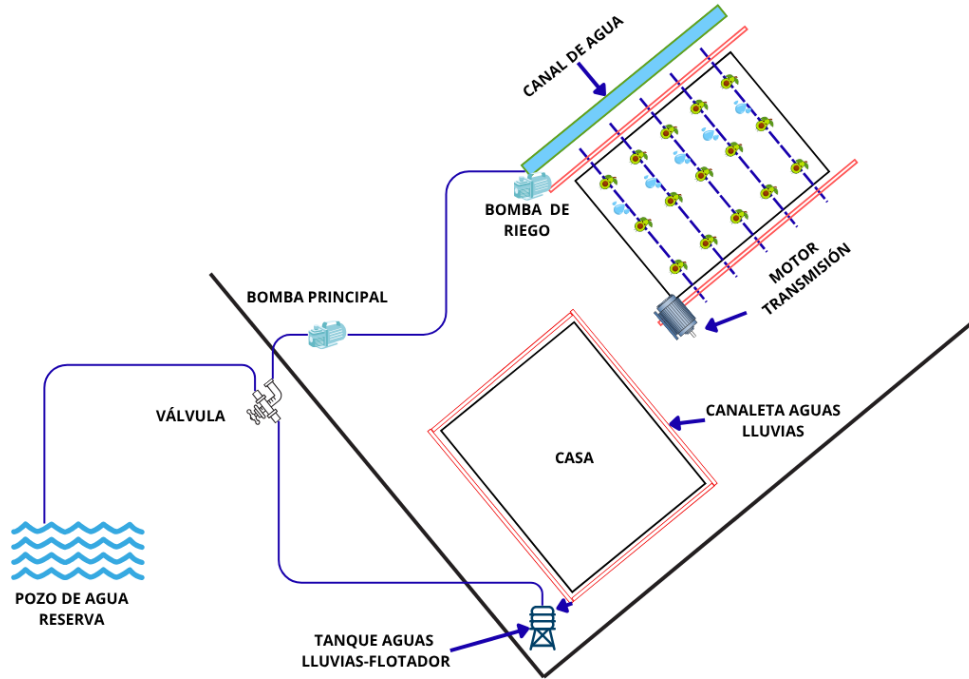
*Nota.* Adaptado de *Inteligencia artificial AI, Ilustración realizada a través de texto* de (OpenAI, 2025)

## **5 Sistema de control**

El control del sistema de riego automatizado por goteo es la integración entre un controlador o interfaz que nos permita regular el sistema hidráulico para accionar el flujo de agua. Utilizamos una válvula solenoide de tres vías-dos posiciones como opción principal, la cual permitirá elegir entre dos fuentes de agua: el pozo o el tanque de recolección de aguas lluvias (Figura 14). El agua será elevada hacia el canal ubicado al lado del cultivo, donde se almacenará temporalmente. Desde allí, una pequeña bomba impulsa el agua hacia la línea de suministro del sistema de riego.

**Figura 14**

*Boceto del sistema de riego*

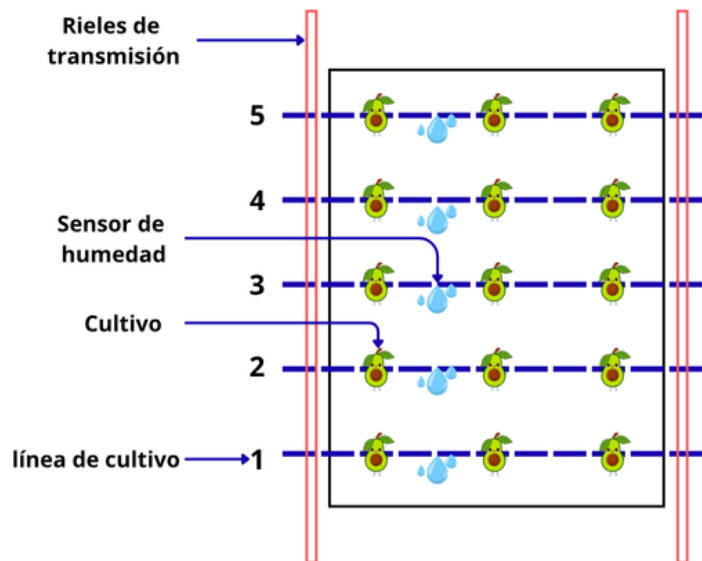


El sistema de cultivo cuenta con 5 filas, cada una con tres árboles, lo que implica que se necesitan 5 finales de carrera, los cuales se configuran como entradas. Además, cada línea de cultivo tiene equipado sensores de humedad como nuestra variable principal. La conexión de este sensor es a una entrada análoga al sistema de control, parámetro establecido para tomar decisiones sobre cuándo activar la bomba que va a enviar el agua desde el canal según las necesidades del cultivo. En función de los requerimientos técnicos de operación, el número de entradas-salidas utilizadas y el ambiente agresivo se requiere el uso de un PLC (por sus siglas en inglés Programmable Logic Controller), con capacidad para controlar la válvula solenoide, motores, bomba, los finales de carrera y los sensores de humedad, permitiendo una gestión adecuada del sistema. La selección de este controlador se detalla en la sección 6.2.2.

El riego sigue un patrón de funcionamiento abajo-arriba, realizando preguntas lógicas al PLC en cada línea de cultivo en función del valor de humedad registrado (figura 15). Si el valor de humedad está por debajo del rango óptimo, el PLC activará el riego en esa línea. Si la humedad es adecuada, el sistema continuará a la siguiente línea, repitiendo este proceso hasta llegar a la última fila de cultivo.

**Figura 15**

*Vista superior del cultivo y distribución del mismo*



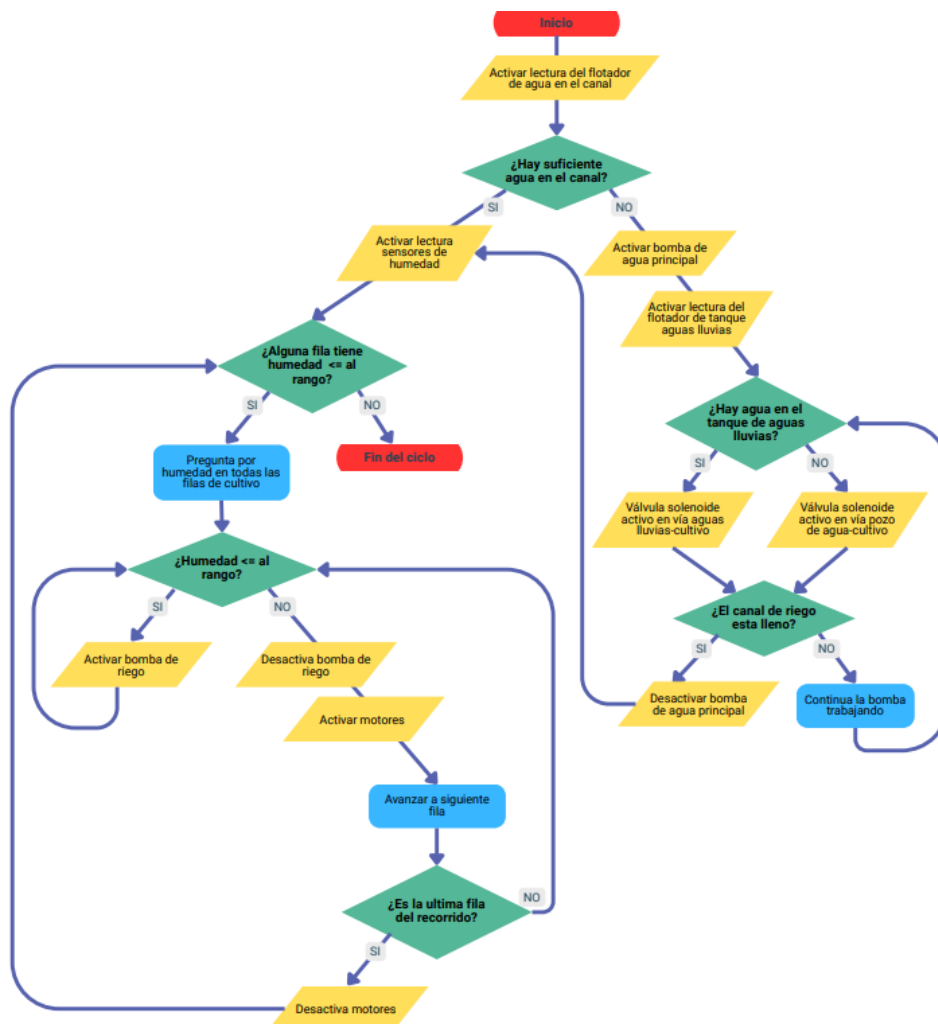
Para mejorar el uso de energía, el riel transversal, que es el que impulsa el sistema de riego a lo largo de las filas, debe esperar un tiempo programable al llegar al final del cultivo para volver a recorrer el mismo, pero en sentido contrario. Durante este recorrido de regreso, el PLC debe hacer las preguntas sobre la humedad en cada fila, asegurándose de que el riego se ejecute y que el agua llegue al punto inicial del cultivo, sin necesidad de hacerlo de forma continua. Este enfoque contribuye a un uso más eficiente de los recursos y la energía.

### 5.1 Secuencia lógica de programación

Al terminar ya el diseño, se abordó la programación y control para automatizar el cultivo. Se realizó un listado de los componentes esenciales y definió el rol de cada uno en el control. Luego, se estableció la secuencia lógica que guíe la programación del PLC. Esto se representa mediante un diagrama de flujo (Figura 16), el cual define claramente cómo debe funcionar el sistema, proporcionando la base para la programación.

**Figura 16**

*Diagrama de flujo del sistema de control*



### **5.1.1 Entradas**

**Sensores de humedad:** (entradas análogas).

**Finales de carrera:** uno por cada fila de cultivo (5 entradas en total).

**Sensor de nivel en el tanque de aguas lluvias:** para detectar el nivel de agua disponible en el tanque (1 entrada).

**Sensor de nivel en la canaleta:** para detectar el nivel de agua disponible en la canaleta cerca del cultivo (1 entrada).

**Botón de inicio:** para iniciar el sistema de riego (1 entrada).

**Botón de parada:** para detener el sistema de riego (1 entrada).

### **5.1.2 Salidas**

**Válvula solenoide:** Para controlar la dirección del agua entre el pozo y el tanque de recolección (1 salida).

**Motores monofásicos:** Para mover el riel transversal a través del cultivo, controlando el recorrido de izquierda a derecha y viceversa (1 salida).

**Bomba principal de suministro:** Para enviar el agua hacia la canaleta de riego (1 salida).

**Bomba de riego:** Para enviar el agua a las líneas de cultivo (1 salida).

**Alarma de falla:** Para indicar que hay un error al correr el programa-responiendo a una falla por comunicación (1 salida).

## **5.2 Selección de Componentes para el control**

Fue necesario la selección de los componentes clave para el control y montaje del sistema de riego. Para ello, se revisaron alternativas de sensores de humedad, tales como: tensiómetros,

matriz granular, capacitivos/FDR (por sus siglas en inglés Frequency Domain Reflectometry) y TDR (por sus siglas en inglés Time Domain Reflectometry) y opciones de controladores (PLC compactos y modulares), considerando criterios de confiabilidad en campo, facilidad de integración eléctrica y disponibilidad. Como resultado, se optó por sensores TDR con salida 4-20 mA para su lectura directa en entradas analógicas del controlador sin transductores intermedios y por un PLC modular con expansión analógica que cubre los cinco canales previstos. A continuación, se detallan estos componentes y la justificación de su elección.

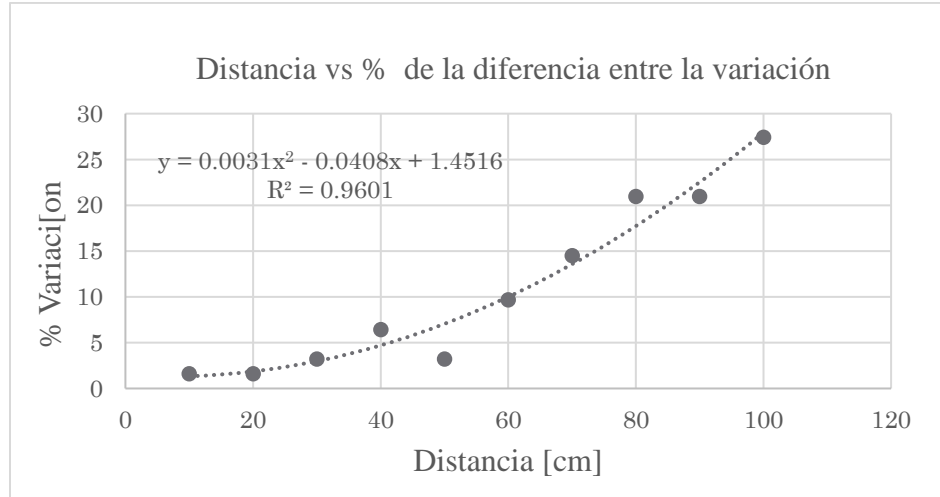
### ***5.2.1 Sensor de humedad***

Para monitorear la humedad del suelo y elegir riegos de forma simple y confiable, comparamos tres opciones habituales: tensiómetros, sensores de matriz granular y sensores dieléctricos (como TDR) (Intagri, s. f.). Con base en las pautas de (Cenicaña, 2017), los sensores bien ubicados permiten programar riegos en tiempo real, en caso de los tensiómetros miden la “succión” del suelo y funcionan, pero requieren más atención y seguimiento; los de matriz granular también son útiles, aunque es clave calibrarlos para cada suelo. En nuestro caso elegimos TDR (Anexo 12) porque nos entrega lecturas continuas y estables, facilita automatizar decisiones y encaja mejor con la operación prevista. Además, los equipos seleccionados se conectarán como entradas analógicas al PLC, alimentados a una fuente de 24V DC. Como salida entregan señal 4–20 mA, lo que permite una lectura directa sin usar transductores adicionales.

Para evaluar el alcance de estos, se realizaron pruebas utilizando sensores FC-28, los mismos empleados en el modelo a escala descrito en la sección 7. El procedimiento consistió en comparar las lecturas de dos sensores colocados a diferentes distancias (Anexo 13), registrando la variación en los valores obtenidos y representándolos en un gráfico de dispersión (Figura 17).

**Figura 17**

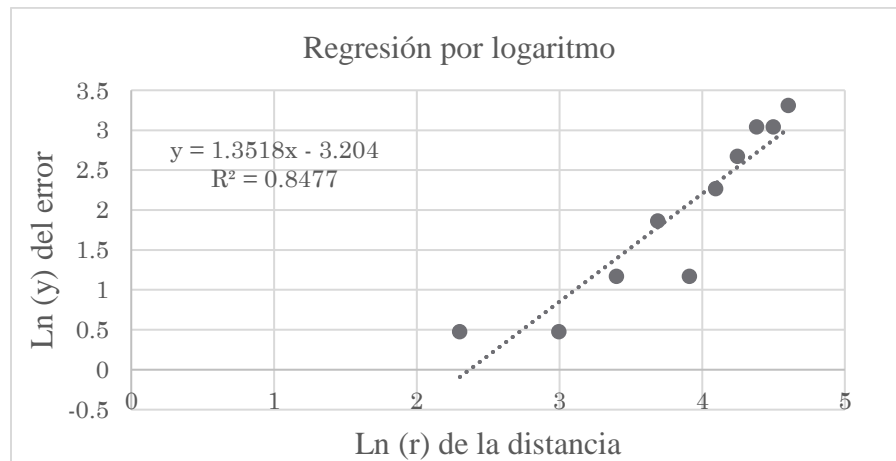
*Gráfica entre la distancia variada y el porcentaje de la diferencia entre las mediciones*



Dado que la relación esperada entre la diferencia de lecturas y la distancia no es lineal, sino de tipo potencial ( $y = kr^n$ ), se aplicó una transformación logarítmica a los datos. Esto permitió convertir la curva original en una recta al graficar  $\ln(y)$  del % de diferencia, ahora llamado el error frente a  $\ln(r)$  siendo  $r$  la distancia (Figura 18). Mediante una regresión lineal se determinó la pendiente, asociada al exponente  $n$ , y el intercepto, relacionado con la constante  $k$ .

**Figura 18**

*Regresión lineal por medio del logaritmo*



Partiendo de la gráfica anterior con un comportamiento lineal, se buscó llegar a la expresión potencial (Ec 19) por medio de un cambio de variable y operando los logaritmos naturales a partir de sus propiedades de la siguiente manera:

$$Y = A + BX$$

$$\text{Ln}(y) = A + B\text{Ln}(r)$$

$$e^{\text{Ln}(y)} = e^{A+B\text{Ln}(r)}$$

$$y = e^A * e^{\text{Ln}(r^B)}$$

$$y = e^A * r^B$$

$$y = e^{-3.204} * r^{1.3518} \quad \text{Ec 19}$$

La ecuación mencionada mostró que, a partir de aproximadamente 59 cm de separación, la diferencia en las lecturas supera el 10%, lo que evidencia una pérdida significativa de precisión. En consecuencia, se concluye que para garantizar un riego automatizado adecuado es necesario instalar un sensor por cada árbol del cultivo, ya que un solo sensor no cubre de manera confiable más de un ejemplar.

Cabe destacar que, aunque en la versión final del sistema se emplea un sensor de mayor calidad y con un alcance superior, la diferencia observada en las pruebas es lo suficientemente significativa como para determinar que, incluso con un dispositivo más avanzado, lo más adecuado para mejorar la precisión del sistema es mantener la estrategia de un sensor por árbol.

### 5.2.2 Controlador (PLC)

El uso de microcontroladores como Arduino, así como de PLCs de gama básica, no ofrecen las condiciones de confiabilidad y robustez que demanda un sistema de riego agrícola en campo abierto. Aunque un microcontrolador permite desarrollar prototipos funcionales a bajo costo, su capacidad para trabajar de forma continua en ambientes con humedad, polvo y variaciones de

tensión eléctrica es limitada, además de que su programación carece de entornos industriales estandarizados, dificultando el mantenimiento y la escalabilidad del sistema.

Aunque el Siemens LOGO presenta como una alternativa más económica y sencilla, Su capacidad se limita principalmente a automatizaciones pequeñas de encendido y apagado, con un número reducido de entradas y salidas digitales y muy pocas opciones para manejar señales analógicas, incluso con módulos adicionales. Además, su comunicación suele restringirse a interfaces básicas, resulta limitado cuando se busca escalabilidad o integración con librerías de diagnóstico. En contraste, el Siemens S7-1200 (Anexo 14), además de ofrecer un mayor número de entradas y salidas, permite la expansión modular ordenada y soporta de forma directa módulos analógicos 4–20 mA, lo que facilita la conexión de sensores de humedad sin convertidores externos. Asimismo, su comunicación Ethernet integrada y su programación dentro del entorno TIA Portal aseguran un control más robusto, escalable y fácil de mantener, características indispensables para un sistema de riego agrícola que requiere confiabilidad en campo y la posibilidad de crecer en el futuro con nuevas variables de proceso.

Dado que el proyecto requiere entradas analógicas para los sensores de humedad que representan la variable de control, se añadió un módulo de expansión (Anexo 15) para disponer de suficientes. De este modo, se conectan directamente como entradas analógicas del PLC, sin transductores intermedios. Esta configuración deja canales de reserva pensando en incluir futuras señales como caudal, temperatura o presión.

## **6 Construcción y evaluación del prototipo**

### **6.1 Bastidor**

Con el propósito de validar el diseño planteado, se desarrolló un modelo físico a escala que reproduce los principales subsistemas del sistema de riego (figura 19 y 20). La estructura del

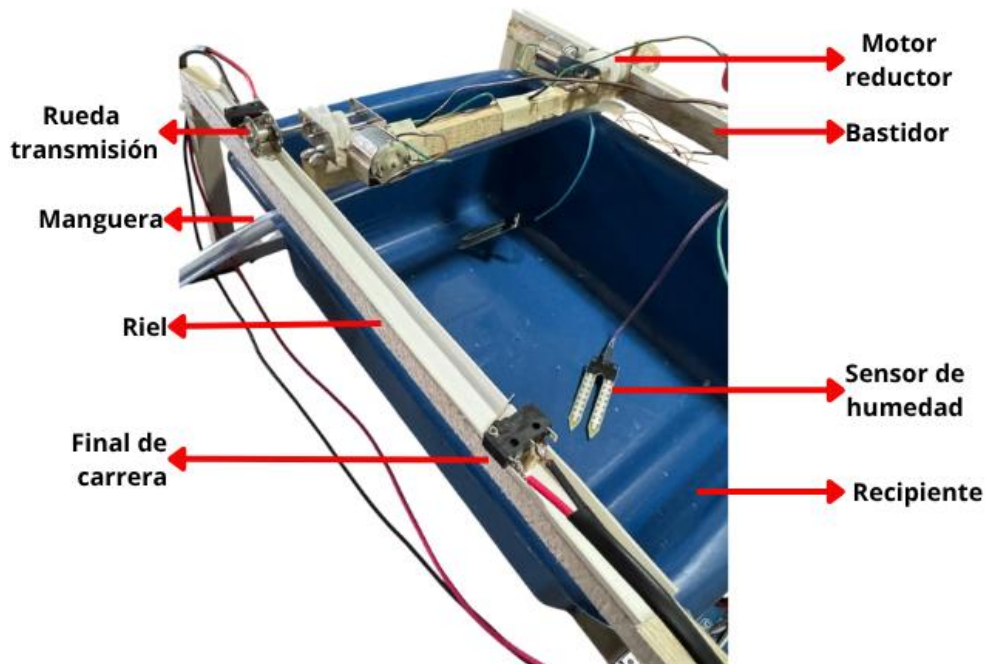
bastidor se construyó utilizando palos de balsa, material escogido por su bajo peso, facilidad de corte y adecuada resistencia para la simulación. Este bastidor constituyó la base sobre la cual se integraron los elementos mecánicos, hidráulicos y de control que permitieron la verificación práctica del funcionamiento general del proyecto.

## **6.2 Subsistema de locomoción**

El movimiento del bastidor se implementó mediante dos motorreductores instalados en paralelo, acoplados a un sistema de ruedas que se desplazan sobre un riel. Estos motores fueron conectados a un puente H (L298N), lo que permitió controlar el sentido de giro y, por consiguiente, la dirección de desplazamiento del bastidor. La alimentación del conjunto se realizó con una batería de 9V, suficiente para las pruebas en escala. El recorrido fue delimitado con dos finales de carrera, ubicados en los extremos del riel, que marcan las posiciones de parada (figura 19). Aunque el diseño original contemplaba cinco estaciones, el prototipo se redujo a dos paradas debido a consideraciones prácticas y económicas.

**Figura 19**

*Partes del bastidor y sistema de locomoción en el prototipo*



### 6.3 Subsistema hidráulico

En el aspecto hidráulico, no se implementó el canal de prueba por limitaciones dimensionales, dado que la bomba sumergible seleccionada resultaba demasiado grande para la escala del modelo. Sin embargo, sí se reprodujo la línea de descarga de la bomba hacia los goteros, por medio de una manguera (figura 19), junto con un sistema de retorno que permitió recircular el agua no utilizada. De esta forma, se pudo simular el funcionamiento del riego localizado en condiciones similares a las del diseño real, manteniendo la coherencia con el planteamiento del proyecto. Cabe resaltar que el subsistema de captación y transporte no fue objeto de simulación, ya que su validación no resultaba pertinente en esta etapa.

#### 6.4 Sistema y lógica de control

El control del prototipo se implementó mediante un Arduino, encargado de gestionar tanto el movimiento del bastidor como la activación del sistema de riego en función de las lecturas de los dos sensores de humedad (FC-28). El ciclo de operación inicia con el bastidor en la estación 1, donde el final de carrera 1 indica la posición de partida. Una vez allí, el Arduino evalúa la señal del sensor asociado a este punto.

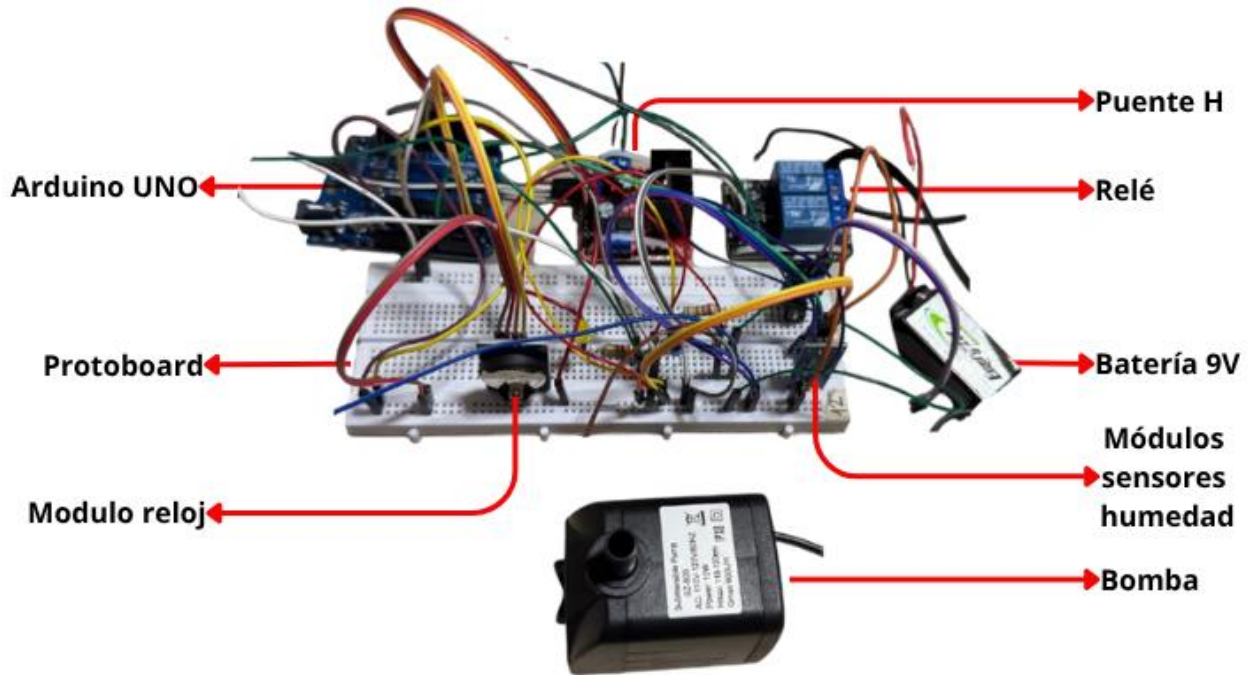
Si la humedad medida es menor al 60 %, se activa el relé de la bomba sumergible y se inicia el riego hasta que la humedad supere el 70 %, momento en el que el relé se abre y la bomba se detiene. En caso contrario, si la humedad inicial es mayor al 60 %, el sistema no ejecuta riego en este punto. Finalizada la evaluación de la estación 1, el Arduino determina el comportamiento en la estación 2:

Si la humedad de la segunda estación es menor al 60 %, el Arduino activa los motorreductores mediante el puente H, desplazando el bastidor hasta que el final de carrera 2 se active, deteniendo los motores. En este punto, se ejecuta nuevamente la lógica de riego bajo las mismas condiciones descritas para la estación 1. Una vez completado el proceso, los motores se invierten y el bastidor regresa a la estación 1, donde se detiene por acción del final de carrera 1.

Como aclaración, si la humedad en la estación 2 es mayor al 60 %, el ciclo se da por concluido sin necesidad de desplazamiento adicional. Por motivos de capacidad de memoria en el microcontrolador se integró un módulo de reloj alimentado de manera independiente (figura 20), cuya función consiste en ejecutar el programa automáticamente cada cierto tiempo programable, garantizando la autonomía del sistema y evitando la necesidad de activaciones manuales. El código de programación del sistema a través del microcontrolador Arduino se puede visualizar en (Anexo 20)

**Figura 20**

*Partes del sistema de control en el prototipo*



## 7 Análisis de costos

### 7.1 Costos de una finca productora de aguacate Hass

Las fincas productoras de aguacate Hass en Colombia tienen como objetivo tener cultivos de calidad, preparados para obtener una cosecha de tipo exportación. Según las fuentes consultadas se observan análisis realizados para fincas de mínimo 26 hectáreas, siendo bastante grandes en comparación a la que tenemos en este caso de estudio donde el área de siembra comprende tan solo 600 metros cuadrados de cosecha. Según (Batista Ángel & Colorado Restrepo, 2022), se hizo el estudio en 3 fincas productoras de 27, 26 y 37 hectáreas aproximadamente ubicadas en Sonsón, Antioquia. Este estudio tuvo en cuenta el proceso de preparación, adecuación, siembra y mantenimiento durante 12 meses, estimando los costos principales por cada árbol. Indican que el

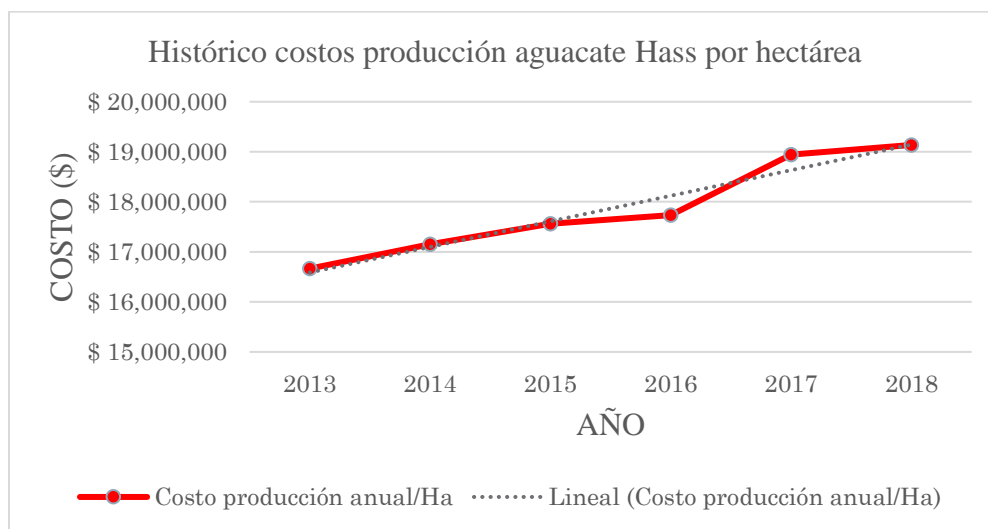
costo promedio en la siembra es de \$43.365.946 por hectárea y esto equivale a \$82.342 por árbol (44,4% de los costos es debido a la mano de obra propia, el 5,1% a mano de obra tercerizada, el 11,1% en materiales e insumos y el 39,4% se destinó a costos indirectos de producción).

Las fincas productoras estudiadas arrojan un promedio de 15.400 árboles plantados (Anexo 16) en las hectáreas ya mencionada, al promediar el total de las hectáreas de las tres fincas se obtuvo un resultado de 30 Ha, de las cuales representa una relación de 514 árboles sembrados por hectárea aproximadamente.

Según (Ministerio de agricultura de Colombia, 2018) y los indicadores emitidos, los costos de una finca productora anual son de \$19.136.300 con una producción de 9 toneladas por hectárea, contempladas variables como mano de obra, insumos, equipos, herramientas y costos indirectos (anexo 17). En promedio los costos de producción aumentan considerablemente un 5% anual, teniendo en cuenta que la mayor parte de la inversión está en los insumos, herramientas y equipos, donde incluyen aquí sistemas tecnificados de riego, fertilización y manejo de plagas.

**Figura 21**

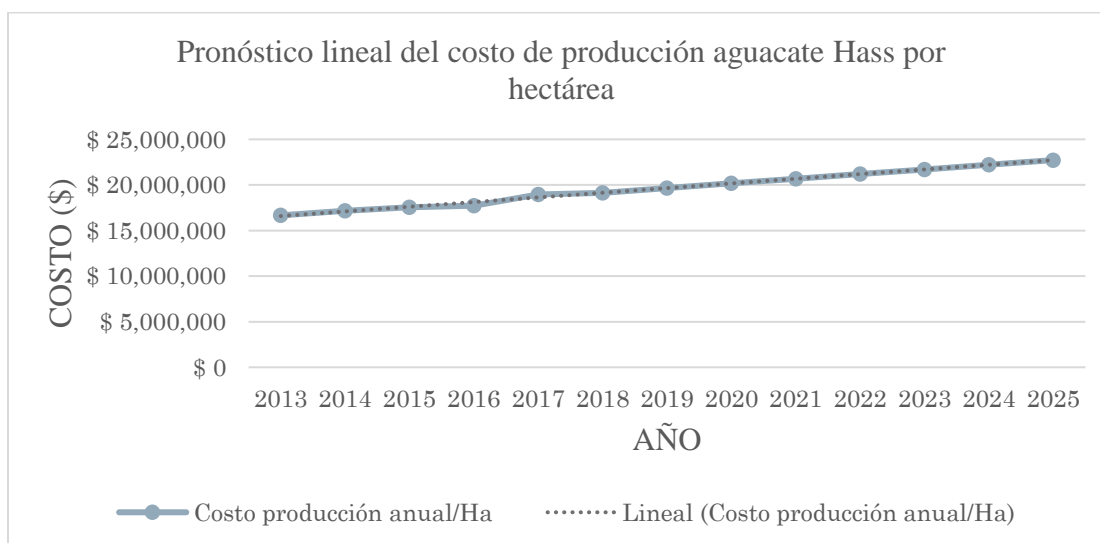
*Gráfica de costos registro histórico producción de aguacate Hass por hectárea*



Al tener datos históricos de unos años atrás (Anexo 18) se analizó por medio de una gráfica el comportamiento de los costos desde 2013 hasta 2018 (figura 21), reflejando una tendencia lineal se aplicó una fórmula estadística llamada pronóstico lineal que permite aproximar el valor de los costos hasta el año actual teniendo en cuenta las variaciones de los años anteriores. Analizando la gráfica del pronóstico (figura 22) se obtuvo que el costo para establecer una hectárea de aguacate Hass en Colombia aproximadamente es de \$22.724.314 en 2025 usando la referencia del último reporte registrado por el Ministerio de agricultura que ha tenido en cuenta rubros ya mencionados, como la siembra (50%) que incluye insumos, equipos y herramientas; la mano de obra (20%) y los indirectos (11%).

**Figura 22**

*Gráfica de pronóstico lineal de la producción de aguacate Hass por hectárea*



Para estimar el costo anual de la unidad de 600 m<sup>2</sup> (0,06 ha) con 15 árboles, se adopta como único parámetro el costo integral del ministerio de agricultura proyectado (figura 22) \$22.724.314 /ha·año. En base a las referencias anteriores se obtienen dos aproximaciones consistentes, una por superficie, mediante escalamiento lineal del costo por hectárea, obteniendo \$1.363.459 /año, y otra por densidad referente, donde el costo de los 514 árboles/ha aplicado en función de los 15 árboles proyectados para la siembra, con resultado de \$663.161 /año. Para capturar simultáneamente los componentes extensivos (dependientes del área) e intensivos (dependientes del número de plantas) sin sesgo hacia ninguno de los extremos, se adopta como estimación operativa el promedio de ambas cotas, equivalente a **\$1.013.310** /año para la parcela de 600 m<sup>2</sup> con 15 árboles; este monto excluye el sistema de automatización, que se contempla a continuación.

## **7.2 Costos de automatización y plan de amortización**

En este apartado se presenta el análisis económico del sistema de riego automatizado definido para 600 m<sup>2</sup> (0,06 ha) con 15 árboles de aguacate Hass. La solución se seleccionó privilegiando un montaje fácil de implementar, arquitectura compacta, con materiales y componentes de buena calidad; el desglose de equipos y cotizaciones pueden consultarse en el (Anexo 19), donde se confirma que el monto total de inversión asciende a \$38.128.662. Sobre esta base, se evalúan los ingresos esperados a partir de una producción estimada de 540 kg/año partiendo de la relación suministrada por (Ministerio de agricultura de Colombia, 2018) equivalente a 9 t/ha·año ajustadas en un rango de precio de venta entre 3.500 y 6.000 COP/kg (Croper.com, 2025), así como el costo anual del lote de 1.013.310 COP/año; con estos datos se realizó la proyección del margen operativo, el flujo de caja y el horizonte de recuperación de la inversión.

Para tener posibles resultados se jugó con el precio de venta, se establecen tres escenarios: bajo (3.500 COP/kg), medio (4.500 COP/kg) y alto (6.000 COP/kg). En todos los casos se mantienen constantes los costos fijos mencionados anteriormente; únicamente varía el precio por kilogramo. A efectos operativos, se adopta como escenario de trabajo el medio, utilizando los escenarios bajo y alto como banda de contraste. La (tabla 3) resume, para cada escenario, los ingresos estimados, el flujo neto anual con el fin de determinar el horizonte de recuperación.

**Tabla 3**

*Escenarios para la recuperación de la inversión*

<b>Escenario</b>	<b>Ingreso (COP/año)</b>	<b>Costo anual (COP/año)</b>	<b>Flujo neto (COP/año)</b>	<b>Inversión (COP)</b>	<b>Recuperación (años)</b>
Bajo	\$ 1,890,000		\$ 876,690		43.5
Medio	\$ 2,430,000	\$ 1,013,310	\$ 1,416,690	\$ 38,128,662.00	26.9
Alto	\$ 3,240,000		\$ 2,226,690		17.1

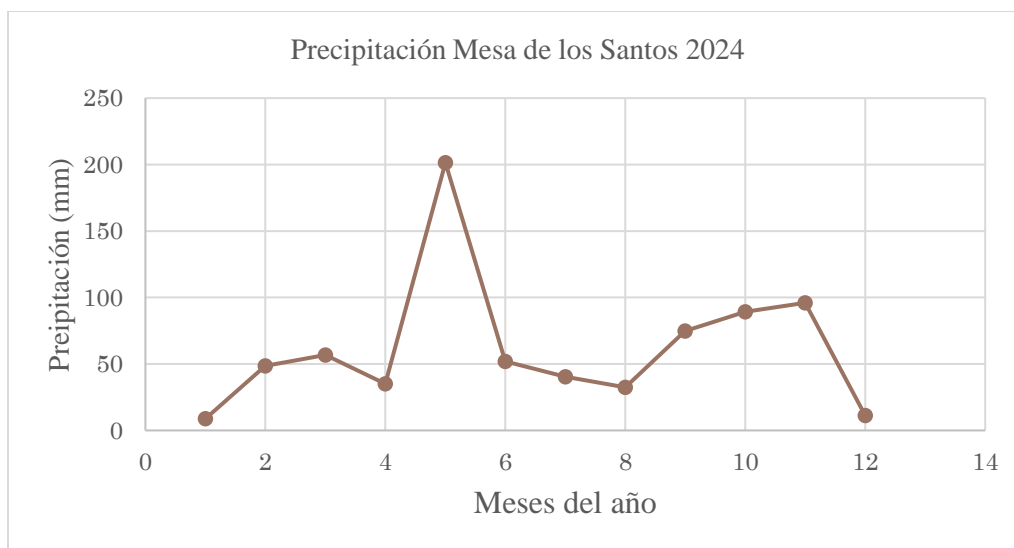
el proyecto no resulta rentable para el tamaño de parcela evaluado. Aun trabajando con el escenario medio (4.500 \$/kg) y una lectura optimista, el flujo neto anual ronda \$1.416.690, por lo que la recuperación de la inversión se ubica en torno a 27 años aproximadamente. Si además se consideraran gastos de operación/mantenimiento del sistema de control o el valor del dinero en el tiempo, el resultado sería menos favorable.

### 8 Análisis hidrometeorológico

Con el propósito de complementar el estudio técnico y justificar el desarrollo del sistema de riego automatizado desde una perspectiva ambiental, se llevó a cabo un análisis hidrometeorológico correspondiente a la zona de La Mesa de los Santos (Santander). Para ello, se consultaron los registros históricos de precipitación del año 2024 obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2025), a partir de los cuales se determinaron los promedios mensuales de precipitación y su respectiva media anual.

**Figura 23**

*Gráfico del comportamiento pluvial en 2024 según IDEAM*



Los resultados muestran una precipitación promedio mensual de 62,22 mm, equivalente a una precipitación anual de 746,7 mm. Con el fin de estimar el volumen potencial de aprovechamiento hídrico, se consideró el área de la cubierta de la vivienda ubicada en la finca de estudio, con una superficie aproximada de 300 m<sup>2</sup>, la cual cuenta con un sistema de canaletas para la recolección de aguas lluvias. Aplicando la relación de conversión de 1 mm de precipitación

equivalente a 1 litro de agua por metro cuadrado (1 L/m<sup>2</sup>), se estimó una recolección anual de aproximadamente 224.000 litros de agua. Este valor representa una fuente complementaria de recurso hídrico que podría emplearse para suplir parcialmente las necesidades de riego del cultivo de aguacate Hass, especialmente durante los períodos secos del año (figura 23).

De manera ilustrativa, se estableció una relación entre el volumen de agua recolectada y la producción agrícola mencionada anteriormente de 540 kg de aguacate Hass al año en 0.06 Ha. En consecuencia, los 224.000 litros de agua recolectados anualmente podrían asociarse teóricamente con una producción equivalente a 1.120 kg de aguacate Hass, resaltando que un solo kilogramo de aguacate necesita alrededor de 200 Litros de agua en toda su etapa de producción.

En síntesis, aunque el análisis económico determinó que la implementación del sistema automatizado no resulta viable financieramente bajo las condiciones actuales, los resultados del presente estudio hidrometeorológico demuestran la viabilidad ambiental y técnica del aprovechamiento de aguas lluvias como estrategia sostenible para mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico dentro del sistema de producción de aguacate Hass en la región.

## 9 Conclusiones

La construcción del prototipo validó la lógica de control y el uso de sensores de humedad en la activación del riego, confirmando la factibilidad del sistema. Aunque no incluyó todos los subsistemas en condiciones reales, demostró la integración entre hidráulica, control y movimiento, sirviendo como base para futuros ensayos en campo.

El estudio de la textura y profundidad del terreno permitió identificar limitaciones de retención de agua y un nivel freático discontinuo, factores que condicionaron directamente el diseño del sistema de riego. Con base en estas características, se definió la necesidad de un riego localizado y controlado, de modo que el agua se aplique de forma precisa en la zona radicular del aguacate Hass y se reduzcan las pérdidas por infiltración y escasez hídrica en la Mesa de los Santos.

El análisis hidráulico permitió establecer un caudal de operación cercano a 2 L/s y una altura manométrica de 9 m, valores que orientaron la selección de una bomba centrífuga de 0.5 HP. Con el dimensionamiento de tuberías en PVC de 1,5" se garantizó un flujo uniforme y con pérdidas de carga controladas. Además, el canal de almacenamiento recubierto con geomembrana, con capacidad de 7,5 m<sup>3</sup>, asegura la disponibilidad de agua y mejora el aprovechamiento del recurso hídrico en la parcela de 600 m<sup>2</sup>.

El diseño contempló la integración de sensores TDR y un PLC compacto como núcleo del sistema de automatización, seleccionados por su facilidad de integración y escalabilidad frente a otras alternativas. Esta propuesta permite gestionar el riego en función de la humedad del suelo, aportando coherencia al diseño integral al vincular hidráulica, mecánica y control.

El análisis financiero reveló que para la escala de 600 m<sup>2</sup> el sistema presenta un horizonte de recuperación superior a 25 años, lo que indica que no es económicamente rentable en el corto ni en el mediano plazo. Estos resultados resaltan la importancia de seguir evaluando modelos

alternativos de financiamiento, reducción de costos de implementación o posibles apoyos institucionales para hacer viable este tipo de tecnologías en parcelas pequeñas.

## Referencias

- AICRANE. (s. f. de s. f. de 2025). *AICRANE*. Obtenido de Parámetros de puente grúa metalúrgica: <https://aicrane.es/puente-grua-metalurgica/>
- Albites Paico, J. V., & Alvitez Figueroa, C. d. (2015). *Diseño de un sistema de riego por goteo para el cultivo de palto hass en parcela de 22 ha del subsector de riego Ferreñafe*. Lambayeque : Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Alfonso Bartoli, J. A. (2008). *manual técnico del cultivo de aguacate HASS*. Cortés. La lima: Centro de Comunicación Agrícola de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA). Obtenido de <https://www.avocadosource.com/books/AlfonsoJose2008.pdf>
- Alibaba.com. (02 de 08 de 2022). *Alibaba.com*. Obtenido de SENSOR EC 3 en 1 de temperatura y humedad del suelo, alta precisión, baja potencia: [https://www.alibaba.com/product-detail/HIGH-PRECISION-LOW-POWER-SOIL-TEMPERATURE\\_1600404218983.html?spm=a2700.details.you\\_may\\_like.1.e8d92366SCF1J9](https://www.alibaba.com/product-detail/HIGH-PRECISION-LOW-POWER-SOIL-TEMPERATURE_1600404218983.html?spm=a2700.details.you_may_like.1.e8d92366SCF1J9)
- American Institute of Steel Construction. (2022). *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-22)*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- Batista Ángel, A., & Colorado Restrepo, N. A. (2022). *COSTOS DE ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO DE AGUACATE (Persea americana Mill) HASS EN EL MUNICIPIO DE SONSÓN, A NIVEL EMPRESARIAL*. Caldas: UNILASALLISTA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2018). *Mecánica de materiales* (Sexta ed.). Ciudad de México: McGraw-Hill Education.

- Bombeo.co. (s. f. de s. f. de s. f.). *Bombeo.co*. Obtenido de Bomba Aqua-Pak centrífuga acero inoxidable 230 VAC 0,5 HP SXD 1 ¼ × 1 monofásica 10 mca 25 gpm ALY05-1230: <https://bombeo.co/producto/bomba-aqua-pak-centrifuga-acero-inoxidable-230-vac-0-5-hp-sxd-1-25x-1-monofasica-10-mca-25-gpm-aly05-1230/>
- Cenicaña. (29 de 12 de 2017). *Cenicaña*. Obtenido de Claves para utilizar sensores en labores de riego: <https://www.cenicana.org/claves-para-utilizar-sensores-en-labores-de-riego/>
- Croper.com. (s. f de s. f de 2025). *Croper.com*. Obtenido de Precios del aguacate Hass: <https://croper.com/prices/0977-aguacate?product=Aguacate%20Hass>
- Cruz Concha, J. C. (2009). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO CONTROLADO Y AUTOMATIZADO PARA UVA ITALIA*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Días Colorado, C. (13 de 12 de 2018). *Plan de manejo integrado de insectos, enfermedades y fisiopatías en aguacate Hass*. Obtenido de Engormix: [https://www.engormix.com/agricultura/enfermedades-plagas-cultivos-intensivos/manejo-integrado-insectos-enfermedades\\_n24882/](https://www.engormix.com/agricultura/enfermedades-plagas-cultivos-intensivos/manejo-integrado-insectos-enfermedades_n24882/)
- Diputación de Salamanca. (22 de marzo de 2023). *Hostelería Salamanca*. Obtenido de <https://www.hostelerialsalamanca.es/noticias-hosteleria/marzo-2023/sabias-que-1-kilo-aguacate-2000-litros-agua.php#:~:text=Aguacate%3A%20el%20aguacate%20es%20un,producir%201%20kg%20del%20fruto.>
- Ecomercio Agrario. (2023). ECAFRUITS. *Hortofrutícola*, 82. Obtenido de <https://ecomercioagrario.com/wp-content/uploads/2023/09/Revista-ECA-Fruits-Ed-21-October-2023.pdf>

ELEVACION SAC. (s. f. de s. f. de s. f.). *ELEVACION SAC*. Obtenido de Conjunto de grúas componentes y accesorios : [https://www.elevacion.com.pe/gruas\\_puente.html](https://www.elevacion.com.pe/gruas_puente.html)

EOS DATA ANALYTICS. (08 de 09 de 2023). *EOS DATA*. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-aguacate/#condiciones>

Equipo Editorial INTAGRI. (Junio de 2019). *INTAGRI*. Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/frutales/requerimientos-de-clima-y-suelo-en-el-cultivo-de-aguacate>

Equipo editorial INTAGRI. (s.f.). Requerimientos hídricos del cultivo de aguacate. *Instituto para la innovación tecnológica en Agricultura*, 3.

e-struc. (s. f. de s. f. de s. f.). *e-struc Cálculo de estructuras online*. Obtenido de Cuadro con las dimensiones y propiedades mecánicas de los perfiles IPE: <https://e-struc.com/2020/04/21/perfiles-estructurales-de-acero-abiertos/>

FREESEA. (25 de 12 de 2017). *AMAZON*. Obtenido de FREESEA Bomba de agua sumergible de fuente: 660GPH 40W: [https://www.amazon.com/FREESEA-Bomba-agua-sumergible-fuente/dp/B078LZS1XW/ref=asc\\_df\\_B078LZS1XW?language=es\\_US&mcid=f81eee4ea29635c3a8bcb4232ddc14c6&tag=cogoshpadde-20&linkCode=df0&hvadid=720414689716&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=11122923083010584847&hvpone=&hv](https://www.amazon.com/FREESEA-Bomba-agua-sumergible-fuente/dp/B078LZS1XW/ref=asc_df_B078LZS1XW?language=es_US&mcid=f81eee4ea29635c3a8bcb4232ddc14c6&tag=cogoshpadde-20&linkCode=df0&hvadid=720414689716&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=11122923083010584847&hvpone=&hv)

Hollands, B. (02 de 03 de 2016). *PVCPIPE ASSOCIATION*. Obtenido de <https://www.uni-bell.org/Blogs/Pipe-Issues-Blog/Post/207/PVC-and-HDPE-Pressure-Pipes-Material-Comparison?utm>

IDEAM. (10 de 10 de 2025). *Consulta y descarga de datos Hidrometeorológicos*. Obtenido de IDEAM: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Intagri. (s. f. de s. f. de s. f.). *Intagri*. Obtenido de Uso de sensores de humedad para definir riego:

<https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/uso-de-sensores-de-humedad-para-definir-riego>

Liotta, M. (2015). *Manual de capacitación: riego por goteo*. Rivadavia: Marta Laura Paz.

Obtenido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://alimentacion.conahcyt.mx/glifosato/descargables/alternativas/materiales/RIEGO%20POR%20GOTEO.pdf](https://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://alimentacion.conahcyt.mx/glifosato/descargables/alternativas/materiales/RIEGO%20POR%20GOTEO.pdf)

Mercado Libre LTDA. (s. f. de s. f. de s. f.). *Mercado libre*. Obtenido de Gotero Inundador

Regulable 0-70 L/h Paq X 200 Und Rojo: [https://www.mercadolibre.com.co/gotero-inundador-regulable-070-lh-paq-x-200-und/up/MCOU3031956102#polycard\\_client=search-categories&tracking\\_id=df6518df-9ae7-4220-9c71-ac44729a291b&wid=MCO2821079154&sid=search](https://www.mercadolibre.com.co/gotero-inundador-regulable-070-lh-paq-x-200-und/up/MCOU3031956102#polycard_client=search-categories&tracking_id=df6518df-9ae7-4220-9c71-ac44729a291b&wid=MCO2821079154&sid=search)

Merchán Chaparro, V., Paez Ramírez, C. S., Tamayo Pita, J. C., Torres Gómez, K. V., & Aguirre Rodríguez, C. A. (2024). *Diseño de Sistema de Transporte de Agua para Abastecimiento de Animales en Finca Rural*. Tunja: Universidad Santo Tomás.

Miguel Abad componentes de gruas. (s. f. de s. f. de 2025). *Miguel Abad componentes de gruas*.

Obtenido de Conjuntos de Ruedas para Rieles: <https://miguelabad.com.ar/tienda/traslaciones-y-c-rodantes/conjuntos-de-ruedas-para-rieles-serie-ma1/>

MIGUEL ABAD COMPONENTES DE PUENTE GRÚAS. (s. f. de s. f. de s. f.). *MIGUEL ABAD*

*COMPONENTES DE PUENTE GRÚAS*. Obtenido de Hojas técnicas traslaciones y conjuntos rodantes: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://miguelabad.com.ar/tienda/traslaciones-y-c-rodantes/conjuntos-de-ruedas-para-rieles-serie-ma1/](https://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://miguelabad.com.ar/tienda/traslaciones-y-c-rodantes/conjuntos-de-ruedas-para-rieles-serie-ma1/)

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://miguelabad.com.ar/wp-content/uploads/2016/12/conjuntos-de-ruedas-para-rieles.pdf

Ministerio de agricultura. (s.f.). *Agronte MinAgricultura*. Obtenido de <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

Ministerio de agricultura de Colombia. (2018). *Cadena de aguacate, indicadores e instrumentos*. Bogotá: MINAGRICULTURA. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2018-08-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos aplicada 6TA edición* (Sexta ed.). México: Pearson Educación.

OpenAI. (s. f. de s. f. de 2025). *ChatGPT-5*. Obtenido de ChatGPT-5: <https://chat.openai.com/>

Ortiz, W. C. (1958). LA MESA DE LOS SANTOS. *SOCIEDAD GEOGRÁFICA DE COLOMBIA*, 16.

Rodríguez, S., Sirgado, J., Clavo, S., & Villasante, L. (2004). PÉRDIDAS DE CARGA LOCALIZADAS EN INSERCIONES DE RAMALES DE GOTEO. *INGENIERÍA DEL AGUA*, 289-296. Obtenido de <https://iwaponline.com/IA/article/11/3/289/68391/Perdidas-de-carga-localizadas-en-inserciones-de>

SIEMENS. (s. f. de s. f. de s. f.). *SIEMENS*. Obtenido de CPU 1214C 6ES7214-1BG40-0XB0: <https://sieportal.siemens.com/es-ww/products-services/detail/6ES7214-1BG40-0XB0?tree=CatalogTree#overview>

SkyCiv. (s. f. de s. f. de s. f.). *Skyciv*. Obtenido de Licencia de prueba gratuita para Análisis estructural : <https://platform.skyciv.com/beam>

TINGEO. (s. f. de s. f. de 2025). *TINGEO*. Obtenido de Revestimiento con geomembrana HDPE:

<https://www.tingeo.com/soluciones/canal-agua-geomembranas/>

Vergel Navarro, S., & Remolina Rivero, B. Y. (2023). *Estudio del nivel freático de la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos, vereda La Fuente, municipio Los Santos del departamento de Santander, mediante los métodos geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Sísmica de Re*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

**Anexos**

**Anexo 1**

*Matriz QFD de diferentes sistemas de riego en análisis con varios criterios de evaluación.*

*Siendo 5 un nivel de alta importancia y 1 de muy poca importancia.*

	Tipo de Riego		
	Inundación	Aspersión	Goteo
Adaptación al terreno	5	4	5
Consumo de agua	1	2	5
Eficiencia de riego	2	3	5
Control de agua	2	3	5
Riesgo ambiental	1	2	5
Dispersión de plagas	1	2	5
Mano de obra	2	3	3
Sencillez del sistema	3	3	4
	17	22	37

**Anexo 2**

*Resistencia en válvulas y accesorios, Factores L/D.*

**TABLA 10.4 Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería,  $L_e/D$**

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería $L_e/D$
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doblez de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

*Nota.* Adatado de (Mott, 2006)

**Anexo 3**

*Ilustración del canal con la geomembrana*



*Nota.* Adaptado de (TINGEO, 2025)

**Anexo 4**

*Cálculos, iteraciones y resultados subsistema hidráulico de captación y transporte*

The image shows two windows from the Engineering Equation Solver (EES) software. The top window, titled "Equations Window", lists the following equations and variables:

- $Q = 2E-3$  "Caudal"
- $D_i = 40E-3$  "Diametro interno de tubería"
- $Z = 5$  "Altura punto 2 respecto al punto 1"
- $g = 9.81$
- $E = 1.5E-6$  "Coeficiente de rugosidad PVC"
- $V = (Q^4 / (\pi^2 (D_i^2)))$  "Velocidad del fluido"
- $NR = (V D_i) / 8.94E-7$  "Numero de reynolds"
- $f = 0.25 / ((\log_{10}(1 / (3.7 (D_i / E) + (5.74 / NR^{0.9}))))^2)$  "Factor de fricción"
- $k_1 = 0.78$  "Entrada"
- $k_2 = f (5 / D_i)$  "Succión vertical"
- $k_3 = 30 f$  "codo"
- $k_4 = f (5 / D_i)$  "Succión horizontal"
- $k_5 = f (24 / D_i)$  "Descarga"
- $k_6 = 30 f$  "Codo"
- $k_7 = 45 f$  "valvula solenoide"
- $K = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7$  "Sumatoria coeficiente de perdidas total"
- $h_L = K (V^2) / (2 g)$  "Perdidas por accesorios"
- $h_A - h_L = Z + (V^2) / (2 g)$

The bottom window, titled "Solution", shows the following results:

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg			
$D_i = 0.04$	$E = 0.0000015$	$f = 0.01939$	$g = 9.81$
$h_A = 7.62$	$h_L = 2.491$	$K = 19.3$	$k_1 = 0.78$
$k_2 = 2.424$	$k_3 = 0.5817$	$k_4 = 2.424$	$k_5 = 11.63$
$k_6 = 0.5817$	$k_7 = 0.8725$	$NR = 71210$	$Q = 0.002$
$V = 1.592$	$Z = 5$		

*Nota.* Adaptado de Engineering Equation Solver (EES), software de apoyo.

**Anexo 5**

*Referencia de goteros comerciales para riego por goteo*



*Nota.* Adaptado de (Mercado Libre LTDA., s. f.)

**Anexo 6**

*Cálculos, iteraciones y resultados subsistema hidráulico de goteo y distribución*

The image shows two windows from the Engineering Equation Solver (EES) software. The top window, titled "Equations Window", lists the following equations and variables:

- $Q = 0.25 \times 10^{-3}$  "Caudal"
- $D_i = 23.1 \times 10^{-3}$  "Diametro interno tubería"
- $Z = 1.5$  "Altura sistema"
- $g = 9.81$
- $E = 1.5 \times 10^{-6}$  "Coeficiente de rugosidad PVC"
- $V = (Q^4 / (\pi^2 \cdot D_i^2))^{0.25}$  "Velocidad de flujo"
- $NR = (V \cdot D_i) / 8.94 \times 10^{-7}$  "Número de Reynolds"
- $f = 0.25 / ((\log_{10}(1 / (3.7 \cdot (D_i / E))) + (5.74 / NR^{0.9})))^2$  "Factor de fricción"
- $k_1 = 0.78$  "Entrada"
- $k_2 = f \cdot (1.5 / D_i)$  "Descarga vertical"
- $k_3 = 30 \cdot f$  "Codo"
- $k_4 = f \cdot (20 / D_i)$  "Descarga horizontal"
- $K_5 = 0.5 \cdot f$  "Gotero"
- $K = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 \cdot 3$  "Sumatoria coeficiente de perdidas de carga"
- $h_L = K \cdot (V^2) / (2 \cdot g)$  "Perdidas por accesorios"
- $h_A - h_L = Z + (V^2) / (2 \cdot g)$

The bottom window, titled "Solution", shows the following results:

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$D_i = 0.0231$	$E = 0.0000015$	$f = 0.02773$	$g = 9.81$
$h_A = 2.016$	$h_L = 0.4981$	$K = 27.46$	$k_1 = 0.78$
$k_2 = 1.801$	$k_3 = 0.832$	$k_4 = 24.01$	$K_5 = 0.01387$
$NR = 15413$	$Q = 0.00025$	$V = 0.5965$	$Z = 1.5$

*Nota.* Adaptado de Engineering Equation Solver (EES), software de apoyo.

**Anexo 7**

*Bomba de riego con sus especificaciones técnicas*

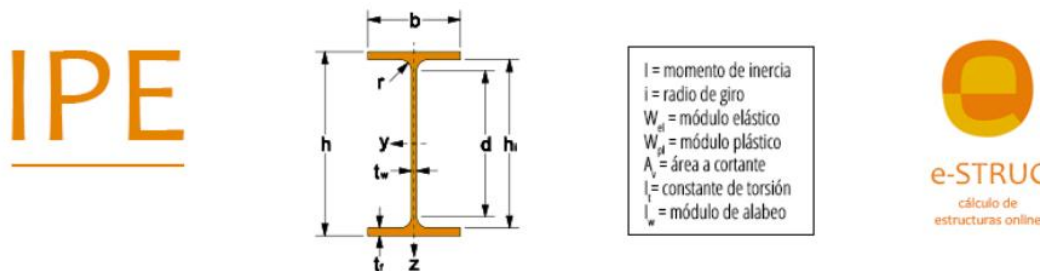


<b>Marca</b>	FREESEA
<b>Color</b>	Verde
<b>Material</b>	Plástico
<b>Estilo</b>	Bomba de agua para acuario
<b>Dimensiones del producto</b>	5,9"l. x 5,51"an. x 4,33"al. pulgadas
<b>Fuente de alimentación</b>	AC
<b>Caudal máximo</b>	11 Galones por minuto
<b>Altura de elevación máxima</b>	8,2 Pies
<b>Voltaje</b>	120 Voltios
<b>Fabricante</b>	FREESEA

*Nota.* Adaptado de (FREESEA, 2017)

Anexo 8

Tabla dimensiones y propiedades vigas IPE



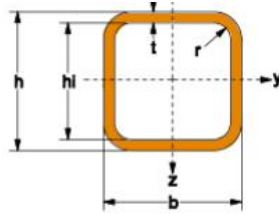
Perfil	Dimensiones							Área	Propiedades mecánicas										Peso		
									Propiedades respecto al eje fuerte					Propiedades respecto al eje débil							
									$I_y$	$i_y$	$W_{el,y}$	$W_{pl,y}$	$A_{vy}$	$I_z$	$i_z$	$W_{el,z}$	$W_{pl,z}$	$A_{vz}$		$I_t$	$I_w$
IPE	h	b	$t_w$	$t_f$	r	$h_1$	d	A	$I_y$	$i_y$	$W_{el,y}$	$W_{pl,y}$	$A_{vy}$	$I_z$	$i_z$	$W_{el,z}$	$W_{pl,z}$	$A_{vz}$	$I_t$	$I_w$	$\rho$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup> x10 <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup> x10 <sup>4</sup>	mm x10	mm <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> x10 <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup> x10 <sup>4</sup>	mm x10	mm <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> x10 <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup> x10 <sup>4</sup>	mm <sup>6</sup> x10 <sup>9</sup>	kg/m
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5	70	60	7,6	80,1	3,24	20,0	23,2	5,00	8,5	1,05	3,7	5,8	3,58	0,70	0,12	6,00
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7	89	75	10,3	171,0	4,07	34,2	39,4	6,67	15,9	1,24	5,8	9,2	5,08	1,20	0,35	8,1
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7	107	93	13,2	317,8	4,90	53,0	60,7	8,47	27,7	1,45	8,7	13,6	6,31	1,74	0,89	10,4
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7	126	112	16,4	541,2	5,74	77,3	88,3	10,47	44,9	1,65	12,3	19,3	7,64	2,45	1,98	12,9
IPE 160	160	82	5,0	7,4	9	145	127	20,1	869,3	6,58	108,7	123,9	12,84	68,3	1,84	16,7	26,1	9,66	3,60	3,96	15,8
IPE 180	180	91	5,3	8,0	9	164	146	23,9	1317,0	7,42	146,3	166,4	15,21	100,9	2,05	22,2	34,6	11,25	4,79	7,43	18,8
IPE 200	200	100	5,6	8,5	12	183	159	28,5	1943,0	8,26	194,3	220,6	18,25	142,4	2,24	28,5	44,6	14,00	6,98	12,99	22,4
IPE 220	220	110	5,9	9,2	12	202	178	33,4	2772,0	9,11	252,0	285,4	21,51	204,9	2,48	37,3	58,1	15,88	9,07	22,67	26,2
IPE 240	240	120	6,2	9,8	15	220	190	39,1	3892,0	9,97	324,3	366,6	25,44	283,6	2,69	47,3	73,9	19,14	12,88	37,39	30,7
IPE 270	270	135	6,6	10,2	15	250	220	45,9	5790,0	11,23	428,9	484,0	29,43	419,9	3,02	62,2	97,0	22,14	15,94	70,58	36,1
IPE 300	300	150	7,1	10,7	15	279	249	53,8	8356,0	12,46	557,1	628,4	34,02	603,8	3,35	80,5	125,2	25,68	20,12	125,90	42,2
IPE 330	330	160	7,5	11,5	18	307	271	62,6	11770,0	13,71	713,1	804,3	39,58	788,1	3,55	98,5	153,7	30,81	28,15	199,10	49,1
IPE 360	360	170	8,0	12,7	18	335	299	72,7	16270,0	14,95	903,6	1019,0	45,93	1043,0	3,79	122,8	191,1	35,14	37,32	313,60	57,1
IPE 400	400	180	8,6	13,5	21	373	331	84,5	23130,0	16,55	1156,0	1307,0	52,42	1318,0	3,95	146,4	229,0	42,69	51,08	490,00	66,3
IPE 450	450	190	9,4	14,6	21	421	379	98,8	33740,0	18,48	1500,0	1702,0	59,24	1676,0	4,12	176,4	276,4	50,85	66,87	791,00	77,6
IPE 500	500	200	10,2	16,0	21	468	426	116,0	48200,0	20,43	1928,0	2194,0	68,26	2142,0	4,31	214,2	335,9	59,87	89,29	1249,00	90,7
IPE 550	550	210	11,1	17,2	24	516	468	134,0	67120,0	22,35	2441,0	2787,0	76,77	2668,0	4,45	254,1	400,5	72,34	123,20	1884,00	106,0
IPE 600	600	220	12,0	19,0	24	562	514	156,0	92080,0	24,30	3069,0	3512,0	88,56	3387,0	4,66	307,9	485,6	83,78	165,40	2846,00	122,0

Nota. Adaptado de (e-struct, s. f.)

Anexo 9

Tabla dimensiones y propiedades vigas SHS para soportes de rieles paralelos

SHS



$I$  = momento de inercia  
 $i$  = radio de giro  
 $W_{el}$  = módulo elástico  
 $W_{pl}$  = módulo plástico  
 $A_v$  = área a cortante  
 $I_t$  = constante de torsión

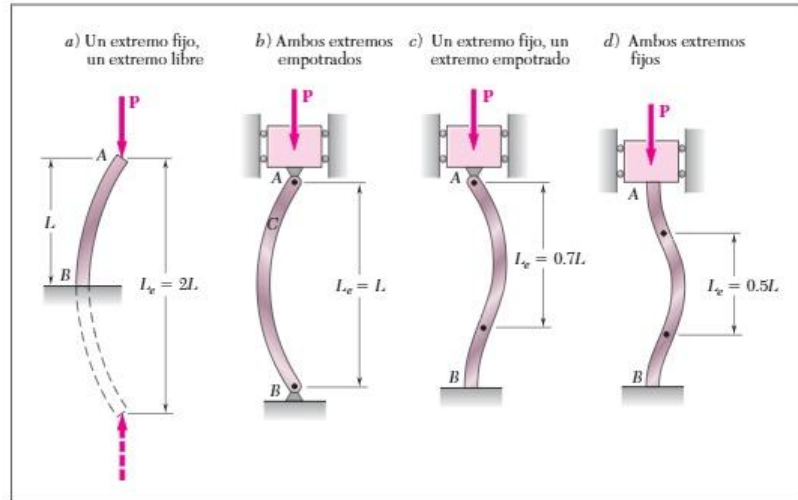


Perfil	Dimensiones					Área	Propiedades mecánicas										Peso	
							Propiedades respecto al eje fuerte					Propiedades respecto al eje débil						
	h	b	t	r	h <sub>1</sub>		A	I <sub>y</sub>	I <sub>y</sub>	W <sub>el,y</sub>	W <sub>pl,y</sub>	A <sub>v,y</sub>	I <sub>z</sub>	I <sub>z</sub>	W <sub>el,z</sub>	W <sub>pl,z</sub>		A <sub>v,z</sub>
mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup> x10 <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup> x10 <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup> x10	mm <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> x10 <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup> x10 <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup> x10	mm <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> x10 <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup> x10 <sup>4</sup>	kg/m	
SHS 40.40.3,2	40.0	40.0	3.2	8.0	33.6	4.6	10.2	1.49	5.1	6.3	2.56	10.2	1.49	5.1	6.3	1.28	16.50	3.61
SHS 40.40.4	40.0	40.0	4.0	10.0	32.0	5.6	11.8	1.45	5.9	7.4	3.20	11.8	1.45	5.9	7.4	1.60	19.50	4.4
SHS 40.40.5	40.0	40.0	5.0	12.5	30.0	6.7	13.4	1.41	6.7	8.7	4.00	13.4	1.41	6.7	8.7	2.00	22.50	5.3
SHS 40.40.6,3	40.0	40.0	6.3	15.8	27.4	8.1	14.7	1.35	7.3	9.9	5.04	14.7	1.35	7.3	9.9	2.52	25.30	6.3
SHS 50.50.3,2	50.0	50.0	3.2	8.0	43.6	5.9	21.2	1.90	8.5	10.2	3.20	21.2	1.90	8.5	10.2	1.60	33.80	4.6
SHS 50.50.4	50.0	50.0	4.0	10.0	42.0	7.2	25.0	1.86	10.0	12.3	4.00	25.0	1.86	10.0	12.3	2.00	40.40	5.6
SHS 50.50.5	50.0	50.0	5.0	12.5	40.0	8.7	28.9	1.82	11.6	14.5	5.00	28.9	1.82	11.6	14.5	2.50	47.50	6.9
SHS 50.50.6,3	50.0	50.0	6.3	15.8	37.4	10.6	32.8	1.76	13.1	17.0	6.30	32.8	1.76	13.1	17.0	3.15	55.10	8.3
SHS 50.50.8	50.0	50.0	8.0	20.0	34.0	12.8	36.0	1.68	14.4	19.5	8.00	36.0	1.68	14.4	19.5	4.00	62.10	10.0
SHS 50.50.10	50.0	50.0	10.0	25.0	30.0	14.9	37.6	1.59	15.0	21.4	10.00	37.6	1.59	15.0	21.4	5.00	66.20	11.7
SHS 60.60.3,2	60.0	60.0	3.2	8.0	53.6	7.2	38.2	2.31	12.7	15.2	3.84	38.2	2.31	12.7	15.2	1.92	60.20	5.6
SHS 60.60.4	60.0	60.0	4.0	10.0	52.0	8.8	45.4	2.27	15.1	18.3	4.80	45.4	2.27	15.1	18.3	2.40	72.50	6.9
SHS 60.60.5	60.0	60.0	5.0	12.5	50.0	10.7	53.3	2.23	17.8	21.9	6.00	53.3	2.23	17.8	21.9	3.00	86.40	8.4
SHS 60.60.6,3	60.0	60.0	6.3	15.8	47.4	13.1	61.6	2.17	20.5	26.0	7.56	61.6	2.17	20.5	26.0	3.78	102.00	10.3
SHS 60.60.8	60.0	60.0	8.0	20.0	44.0	16.0	69.7	2.09	23.2	30.4	9.60	69.7	2.09	23.2	30.4	4.80	118.00	12.5
SHS 60.60.10	60.0	60.0	10.0	25.0	40.0	18.9	75.5	2.00	25.2	34.4	12.00	75.5	2.00	25.2	34.4	6.00	131.00	14.9
SHS 70.70.3,2	70.0	70.0	3.2	8.0	63.6	8.4	62.3	2.72	17.8	21.0	4.48	62.3	2.72	17.8	21.0	2.24	97.60	6.6
SHS 70.70.4	70.0	70.0	4.0	10.0	62.0	10.4	74.7	2.68	21.3	25.5	5.60	74.7	2.68	21.3	25.5	2.80	118.00	8.2
SHS 70.70.5	70.0	70.0	5.0	12.5	60.0	12.7	88.5	2.64	25.3	30.8	7.00	88.5	2.64	25.3	30.8	3.50	142.00	10.0
SHS 70.70.6,3	70.0	70.0	6.3	15.8	57.4	15.6	104.0	2.58	29.7	36.9	8.82	104.0	2.58	29.7	36.9	4.41	169.00	12.3
SHS 70.70.8	70.0	70.0	8.0	20.0	54.0	19.2	120.0	2.50	34.2	43.8	11.20	120.0	2.50	34.2	43.8	5.60	200.00	15.0
SHS 70.70.10	70.0	70.0	10	25.0	50.0	22.9	133.0	2.41	38.0	50.3	14.00	133.0	2.41	38.0	50.3	7.00	227.00	18
SHS 70.70.12,5	70.0	70.0	12.5	31.3	45.0	27.1	142.0	2.29	40.6	56.3	17.50	142.0	2.29	40.6	56.3	8.75	248.00	21.3
SHS 80.80.3,2	80.0	80.0	3.2	8.0	73.6	9.72	95.0	3.13	23.7	27.9	5.12	95.0	3.13	23.7	27.9	2.56	148.00	7.63

Nota. Adaptado de (e-struc, s. f.)

**Anexo 10**

*Longitud efectiva en soportes según el tipo de apoyo*

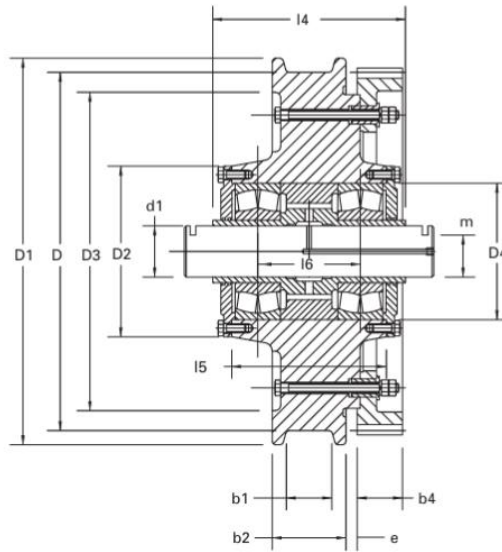


**Figura 10.18** Longitudes efectivas de columnas para varias condiciones de extremo.

*Nota.* Adaptado de (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2018)

**Anexo 11**

*Catálogo de ruedas para transmisión*



UNIDAD CONDUCTORA

N° SERIE	D (mm) h11	RIEL	RODAMIENTO	C.DENTADA GRANDE		C. DENTADA CHICA		D1 (mm)	b1 (1) (mm)
				Z	M	Z	M		
MA4 315	315	A55	22218CW33	52	6			350	65
MA4 400	400	A75	22220CW33	50	8	40	8	440	90
MA4 500	500	A75	22224CW33	49	10	42	10	540	90
MA4 630	630	A100	22226CW33	62	10	54	10	680	110
MA4 710	710	A120	22230CW33	58	12	50	12	760	160
MA4 800	800	A120	22232CW33	66	12	58	12	850	160
MA4 900	900	A120	22236CW33	63	14	56	14	950	160
MA4 1000	1000	A120	22240CW33	70	14	64	14	1050	160
MA4 1120	1120		22244CW33	68	16	62	16	1180	160
MA4 1250	1250		22248CW33	76	16	70	16	1310	160

*Nota.* Adaptado de (MIGUEL ABAD COMPONENTES DE PUENTE GRÚAS, s. f.)

**Anexo 12**

*Sensor de humedad TDR*



*Nota.* Adaptado de (Alibaba.com, 2022)

**Anexo 13**

*Datos y resultados experimentales de humedad con sensores FC-28*

<b>Distancia (cm)</b>	<b>Sensor A (%)</b>	<b>Sensor B (%)</b>	<b>Diferencia (%)</b>	<b>Ln(distancia)</b>	<b>Ln(error)</b>
10	62	61	1.61290323	2.302585093	0.4780358
20	62	61	1.61290323	2.995732274	0.4780358
30	62	60	3.22580645	3.401197382	1.17118298
40	62	58	6.4516129	3.688879454	1.86433016
50	62	60	3.22580645	3.912023005	1.17118298
60	62	56	9.67741935	4.094344562	2.26979527
70	62	53	14.516129	4.248495242	2.67526038
80	62	49	20.9677419	4.382026635	3.04298516
90	62	49	20.9677419	4.49980967	3.04298516
100	62	45	27.4193548	4.605170186	3.31124914

**Anexo 14**

*Controlador CPU 1214C, AC/DC/Relés, 14DI/10DO/2AI*



*Nota.* Adaptado de (SIEMENS, s. f.)

**Anexo 15**

*Módulo de expansión SM 1231, 8AI*



*Nota.* Adaptado de (SIEMENS, s. f.)

**Anexo 16**

*Costos y promedio de árboles sembrados por fincas en estudio.*

<b>Costo/Árbol</b>				
<b>Finca</b>	<b># 1</b>	<b># 2</b>	<b># 3</b>	<b>Finca Prom.</b>
<b>N° ÁRBOLES</b>	15.501	15.651	15.048	\$ 15.400
<b>LABORES</b>	\$ 89.825	\$ 74.989	\$ 68.903	\$ 77.906
<b>CAPEX</b>	\$ 4.437	\$ 4.437	\$ 4.437	\$ 4.437
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 94.262</b>	<b>\$ 79.425</b>	<b>\$ 73.340</b>	<b>\$ 82.342</b>

*Nota.* Adaptado de (Batista Ángel & Colorado Restrepo, 2022)

**Anexo 17**

*Costos de producción de siembra tecnificada de aguacate por hectárea*

<b>Aguacate</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
Técnicado	\$16.665.000	\$17.150.000	\$17.564.540	\$17.735.108	\$18.491.407	\$19.136.300

<b>AGUACATE AÑO 2017</b>		
<b>Actividad</b>	<b>(\$/ha)</b>	<b>%</b>
Mano de Obra	3.750.000	20
Insumos, Equipos y Herramientas	13.286.300	69
Indirectos	2.150.000	11
<b>Costo Total (\$)</b>	<b>19.186.300</b>	<b>100</b>
<b>Costo/Ton (\$/Ton)</b>	1.918.630	-

Fuente: Consejo Nacional de Aguacate.

*Nota.* Adaptado de (Ministerio de agricultura de Colombia, 2018)

**Anexo 18**

*Cifras nacionales de producción aguacate Hass por hectárea en Colombia*

Variable	2014	2015	2016	2017	2018*
Área (Ha)	7.800	8.765	11.860	13.500	15.530
Area Consechada (Ha)	4.385	7.429	8.667	9.625	10.583
Producción (Ton)	28.500	52.000	65.000	77.000	95.250
Rendimiento(Ton/Ha)	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0

Fuente: Evaluaciones Agropecuarias Municipales – ASOHOFrucol

\* Proyectado EVAS.

*Nota.* Adaptado de (Ministerio de agricultura de Colombia, 2018)

**Anexo 19**

*Costos de implementación sistema de riego automatizado*

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo/und</b>	<b>Total</b>
Tubería PVC 1"	41.5	\$ 2,983	\$ 123,808
Codo 90° PVC 1"	3	\$ 2,900	\$ 8,700
Tubería PVC 1.5"	44	\$ 7,650	\$ 336,600
Codo 90° PVC 1.5"	1	\$ 2,150	\$ 2,150
Bomba centrifuga 0.5 HP	1	\$ 680,000	\$ 680,000
Bomba sumergible 40W	1	\$ 100,800	\$ 100,800
Valvula solenoide	1	\$ 378,000	\$ 378,000
Goteros	3	\$ 500	\$ 1,500
Flotador	2	\$ 140,000	\$ 280,000
Canal geomembrana (m^2)	50	\$ 20,000	\$ 1,000,000
Sensor humedad	15	\$ 231,000	\$ 3,465,000
PLC	1	\$ 2,431,051	\$ 2,431,051
Modulo de expansión	1	\$ 2,640,253	\$ 2,640,253
Motor	2	\$ 500,000	\$ 1,000,000
Reductor y freno	2	\$ 2,000,000	\$ 4,000,000
Perfil IPE140 (mts)	20	\$ 66,450	\$ 1,329,000
Perfil IPE300 (mts)	60	\$ 250,000	\$ 15,000,000
Perfil SHS (mts)	12	\$ 27,000	\$ 324,000
Par de ruedas	2	\$ 2,000,000	\$ 4,000,000
Fuente de alimentación	1	\$ 53,000	\$ 53,000
Cableado eléctrico #18 (mts)	100	\$ 549	\$ 54,900
Cableado eléctrico #12 (mts)	100	\$ 2,319	\$ 231,900
Contactora	1	\$ 98,000	\$ 98,000
Relé termico de 2-5 A	1	\$ 145,000	\$ 145,000
Interruptores	1	\$ 20,000	\$ 20,000
Finales de carrera	5	\$ 65,000	\$ 325,000
Alarma de falla	1	\$ 100,000	\$ 100,000
		<b>TOTAL</b>	<b>\$ 38,128,662</b>

**Anexo 20**

*Código de programación Arduino UNO, prototipo sistema de riego automatizado*

```
1
2 #define sensor_0 A0 //Pin Sensor de humedad 1
3 #define sensor_1 A1 //Pin Sensor de humedad 2
4 int valor_0 = 0; //Lectura Sensor de humedad 1
5 int valor_1 = 0; //Lectura Sensor de humedad 2
6
7 ///////////////////////////////////////////////////
8
9 int enA = 6; // Pin de entrada PWM para controlar velocidad
10 int in1 = 7; // Pin para controlar dirección del motor 1
11 int in2 = 8; // Pin para controlar dirección del motor 1
12 int Rele= 9;
13
14 int speed=70; //Velocidad en % del motor
15 int pwmVal = speed * 255 / 100; //Convertir la velocidad de 8 bits a % del motor
16
17 ///////////////////////////////////////////////////
18
19 int Final_C1=5; //Pin Final de Carrera 1
20 int Lectura1=0; //Lectura Final de Carrera 1
21
22 int Final_C2=4; //Pin Final de Carrera 2
23 int Lectura2=0; //Lectura Final de Carrera 2
24
25 int FC_1=0;
26 int FC_2=0;
27
28 ///////////////////////////////////////////////////
29
30
31 #include <Wire.h> //libreria de reloj
32 #include <RTClib.h>
```

```

33 RTC_DS3231 rtc;
34 int minutoAnterior = -1;
35 int terminado=0;
36
37 void setup()
38 {
39   Serial.begin(9600);
40
41   pinMode(enA, OUTPUT); //Declarar pin salida PWM motor
42   pinMode(in1, OUTPUT); //Declarar pin salida direccion motor
43   pinMode(in2, OUTPUT); //Declarar pin salida direccion motor
44
45   pinMode(Rele, OUTPUT); //Declarar pin salida Rele
46
47   pinMode(Final_C1, INPUT); //Declarar pin salida Final de Carrera 1
48   pinMode(Final_C2, INPUT); //Declarar pin salida Final de Carrera 2
49
50
51   if (!rtc.begin()) {
52     Serial.println("No se encuentra el módulo RTC");
53     while (1);}
54
55   if (rtc.lostPower()) {
56     Serial.println("RTC se ha reiniciado, configurando fecha y hora...");
57     // Ajusta la hora del RTC a la fecha y hora de la PC en el momento de la compilación
58     rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));}
59
60 }
61 void loop()
62 {
63
64   DateTime now = rtc.now();
65   int minutoActual = now.minute();
66
67   int valor_0 = map(analogRead(sensor_0), 0, 1023, 100, 0); // Funcion map conversor analógico-digital (ADC) 10 bits a un rango de 0 a 100
68   int valor_1 = map(analogRead(sensor_1), 0, 1023, 100, 0); // Funcion map conversor analógico-digital (ADC) 10 bits a un rango de 0 a 100
69
70 //Se inicia con motores apagados, velocidad al 0% y rele apagado
71
72   digitalWrite(in1, LOW);
73   digitalWrite(in2, LOW);
74   analogWrite(enA, 0);
75   digitalWrite(Rele, LOW);
76
77 //Se hace un mapeo de la lectura del sensor a porcentual
78   Serial.print("Humedad_0: ");
79   Serial.print(valor_0);
80   Serial.print("% ");
81
82   Serial.print("Humedad_1: ");
83   Serial.print(valor_1);
84   Serial.print("% ");
85
86
87   Serial.print(" QUIETO ");
88   Lectura1=digitalRead(Final_C1);
89   Serial.print(" FC_1 ");
90   Serial.print(Lectura1);
91
92   Lectura2=digitalRead(Final_C2);
93   Serial.print(" FC_2 ");
94   Serial.println(Lectura2);

```

```
95 |
96 |
97 | while (minutoActual % 1 == 0 && minutoActual != minutoAnterior && terminado==0) //ACÁ CAMBIAR EL TIEMPO POR EL QUE QUIERAN
98 | {
99 |     Serial.println("ACTIVADO");
100 |     minutoAnterior = minutoActual;
101 |
102 |
103 | //Mientras que el sensor 1 maque seco y el Final de Carrera este oprimido se va a ejecutar la rutina
104 |
105 | while (valor_0<=50 && Lectura1==1)
106 | {
107 |
108 | Lectura1=digitalRead(Final_C1); //Se muestra la lectura de los finales de carrera
109 | Lectura2=digitalRead(Final_C2); //Se muestra la lectura de los finales de carrera
110 | valor_0 = map(analogRead(sensor_0), 0, 1023, 100, 0); //Se lee los valores del sensor de humedad
111 | valor_1 = map(analogRead(sensor_1), 0, 1023, 100, 0); //Se lee los valores del sensor de humedad
112 |
113 | //Se muestra lectura de los sensores a porcentual
114 |     Serial.print("Humedad_0: ");
115 |     Serial.print(valor_0);
116 |     Serial.print("% ");
117 |     Serial.print("Humedad_1: ");
118 |     Serial.print(valor_1);
119 |     Serial.print("% ");
120 |
121 | if(Lectura1==1 && Lectura2==0) //Condicion de Final de Carrera 1 activado y 2 desactivado
122 | {
123 |
124 | //Se enciende el rele con la bomba y se apagan los motores
125 |     Serial.print("REGANDO_1 Y MOTOR APAGADO");
126 |     Serial.print(" FC_1 ");
127 |     Serial.print(Lectura1);
```

```
128 Serial.print("  FC_2 ");
129 Serial.println(Lectura2);
130
131 digitalWrite(Rele, HIGH);
132 digitalWrite(in1, LOW);
133 digitalWrite(in2, LOW);
134 delay(100);
135
136
137   }
138
139
140 digitalWrite(in1, LOW);
141 digitalWrite(in2, LOW);
142
143 valor_0 = map(analogRead(sensor_0), 0, 1023, 100, 0);
144 valor_1 = map(analogRead(sensor_1), 0, 1023, 100, 0);
145 Lectura1=digitalRead(Final_C1); //Se muestra la lectura de los finales de carrera
146 Lectura2=digitalRead(Final_C2); //Se muestra la lectura de los finales de carrera
147 }
148
149
150 digitalWrite(in1, LOW);
151 digitalWrite(in2, LOW);
152
153
154 //////////////////////////////////////
155 while (valor_0>=30 && valor_1<50 )
156 {
157
158   FC_2=0;
159 Lectura1=digitalRead(Final_C1);
```

```
160 Lectura2=digitalRead(Final_C2);
161 valor_0 = map(analogRead(sensor_0), 0, 1023, 100, 0);
162 valor_1 = map(analogRead(sensor_1), 0, 1023, 100, 0);
163
164 Serial.print("Humedad_0: ");
165 Serial.print(valor_0);
166 Serial.print("% ");
167 Serial.print("Humedad_1: ");
168 Serial.print(valor_1);
169 Serial.print("% ");
170
171 if (Lectura2==0)
172 {
173
174
175 Serial.print("RELE APAGADO_2 MOVIENDO");
176 Serial.print(" FC_1 ");
177 Serial.print(Lectura1);
178 Serial.print(" FC_2 ");
179 Serial.println(Lectura2);
180
181 digitalWrite(in1, HIGH);
182 digitalWrite(in2, LOW);
183 analogWrite(enA, pwmVal);
184 digitalWrite(Rele, LOW);
185 delay(100);
186 }
187 if(Lectura2==1)
188 {
189 Serial.print("REGANDO_2 Y MOTOR APAGADO");
190 Serial.print(" FC_1 ");
191 Serial.print(Lectura1);
```

```
191     Serial.print(Lectura1);
192     Serial.print("    FC_2 ");
193     Serial.println(Lectura2);
194
195     digitalWrite(Rele, HIGH);
196     digitalWrite(in1, LOW);
197     digitalWrite(in2, LOW);
198     delay(100);
199
200     }
201     valor_0 = map(analogRead(sensor_0), 0, 1023, 100, 0);
202     valor_1 = map(analogRead(sensor_1), 0, 1023, 100, 0);
203 }
204
205 ///////////////////////////////////////////////////
206
207
208 while ( valor_1>50  && FC_2==0)
209 {
210     Lectura1=digitalRead(Final_C1);
211     Lectura2=digitalRead(Final_C2);
212     valor_0 = map(analogRead(sensor_0), 0, 1023, 100, 0);
213     valor_1 = map(analogRead(sensor_1), 0, 1023, 100, 0);
214
215     Serial.print("Humedad_0: ");
216     Serial.print(valor_0);
217     Serial.print("%    ");
218     Serial.print("Humedad_1: ");
219     Serial.print(valor_1);
220     Serial.print("%    ");
221
222
```

```
223     digitalWrite(in1, LOW);
224     digitalWrite(in2, HIGH);
225     analogWrite(enA, pwmVal);
226     Serial.println("REGRESANDO");
227     digitalWrite(Rele, LOW);
228
229     if(Lectura1==1)
230     {
231         Serial.print("LLEGO AL INCIO");
232         terminado=1;
233         Serial.print(" FC_1 ");
234         Serial.print(Lectura1);
235         Serial.print("  FC_2 ");
236         Serial.println(Lectura2);
237
238         digitalWrite(Rele, LOW);
239         digitalWrite(in1, LOW);
240         digitalWrite(in2, LOW);
241         delay(100);
242         FC_2=1;
243
244         }
245     valor_0 = map(analogRead(sensor_0), 0, 1023, 100, 0);
246     valor_1 = map(analogRead(sensor_1), 0, 1023, 100, 0);
247 }
248
249 }
250
251     terminado=0;
252
253 }
```