

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO AUTOMATIZADO POR GOTEO Y
FERTIRRIEGO EN CAMPO ABIERTO E INVERNADEROS PARA LA ESCUELA
NACIONAL CENTRAL DE AGRICULTURA (ENCA), FINCA BÁRCENA, VILLA
NUEVA, GUATEMALA.

BIANCA ISABEL VILLALOBOS CONCEPCIÓN

CARTAGO, 2025

DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO AUTOMATIZADO POR GOTEO Y
FERTIRRIEGO EN CAMPO ABIERTO E INVERNADEROS PARA LA ESCUELA
NACIONAL CENTRAL DE AGRICULTURA (ENCA), FINCA BÁRCENA, VILLA
NUEVA, GUATEMALA.

Bianca Isabel Villalobos Concepción

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Milton Solorzano Quintana

Asesor

Natalia Gómez Calderón

Directora Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2025

DEDICATORIA

A mis padres, Jovel Villalobos y Yadira Concepción, por su amor incondicional, por acompañarme en cada paso de este largo camino con tanto sacrificio, y por enseñarme que, sin importar la distancia, siempre tendré un hogar al que regresar.

A mis hermanos, María Celeste Villalobos y Miguel Ángel Villalobos, por su apoyo constante y por ser una fuente de motivación y alegría en mi vida.

A mi novio, Sergio Ríos, por ser mi compañero, mi apoyo y mi mayor motivación en todo este proceso. Por su paciencia, su cariño y por recordarme siempre que no debo rendirme. Por ayudarme y cuidarme en todo momento a pesar de la distancia.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios y a la Virgencita, por concederme la fuerza, el valor y la sabiduría para seguir adelante.

A mi mamá, por ser ejemplo de superación; a mi papá, por ser ejemplo de trabajo y dedicación; a mi hermana, por acompañarme siempre; y a mi hermano, por su ejemplo de perseverancia. A todos, por sus palabras de aliento y por ser mi mayor apoyo.

A mis amigos y compañeros de estudio, por compartir tantos años de aprendizaje. A Rolando, por ser un gran compañero y por su valiosa amistad.

A mis amigos chapines, por abrirme las puertas y hacer de mi estancia en Guatemala una experiencia inolvidable.

Al personal de la Escuela de Ingeniería Agrícola, y en especial a mi profesor tutor, Milton Solórzano Quintana, por brindarme su conocimiento y sus consejos durante esta etapa.

Al personal de la Escuela Nacional Central de Agricultura (ENCA), por su apoyo y colaboración.

Índice de Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.	OBJETIVOS.....	6
2.1.	Objetivo general	7
2.2.	Objetivos específicos.....	7
3.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
3.1.	Ambientes protegidos	9
3.1.1.	Estructuras en Ambientes protegidos	9
3.2.	Generalidades de las hortalizas	10
3.2.1.	Descripción del cultivo.....	10
3.2.2.	Requerimientos nutricionales	11
3.2.3.	Requerimiento hídrico	11
3.3.	Riego.....	11
3.3.1.	Riego por goteo	12
3.3.2.	Componentes riego por goteo.....	13
3.4.	Diseño Agronómico del Sistema de riego	14
3.4.1.	Determinación del requerimiento hídrico.....	14
3.5.	Diseño Hidráulico del Sistema de Riego.....	19
3.6.	Fertirriego	19
3.6.1.	Equipamiento en fertirriego.....	20
3.7.	Automatización del sistema.....	22
3.7.1.	Componentes esenciales	22
3.8.	Software para análisis de datos.....	23
3.8.1.	CLIMWAT y CROPWAT	23
3.9.	Análisis económico	24
3.10.	Análisis ambiental y social	25
4.	METODOLOGÍA.....	27
4.1.	Reconocimiento zona de estudio	28
4.2.	Análisis topográfico.....	28
4.3.	Diseño de riego.....	28
4.3.1.	Determinación del requerimiento hídrico.....	28
4.3.2.	Diseño hidráulico del lateral.....	34
4.3.3.	Diseño hidráulico del múltiple	35
4.3.4.	Diseño hidráulico de la principal.....	38
4.3.	Selección del componente de fertilización	39
4.4.	Automatización del sistema de riego.....	39
4.5.	Análisis económico (Costo/Beneficio).....	40
4.6.	Análisis ambiental y social	40
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	42
5.1.	Reconocimiento de campo y análisis topográfico	43
5.2.	Determinación del requerimiento hídrico.....	44
5.2.1.	Textura	44
5.2.2.	Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).....	45
5.2.3.	Densidad aparente.....	45
5.2.4.	Evapotranspiración potencial (Eto) y de cultivo (Etc)	45
5.2.5.	Selección del gotero.....	46

5.2.6.	Porcentaje de área a regar (PAR).....	47
5.2.7.	Demanda hídrica.....	47
5.3.	Diseño hidráulico.....	49
5.3.1.	Laterales.....	50
5.3.2.	Múltiple	51
5.3.3.	Principal.....	52
5.4.	Fertirriego	54
5.5.	Automatización.....	54
5.5.1.	Componentes esenciales	55
5.5.2.	Aplicación de fertilizante.....	58
5.6.	Análisis económico	59
5.7.	Análisis ambiental y social	61
6.	CONCLUSIONES.....	63
7.	RECOMENDACIONES	66
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	ANEXOS	75

Índice de Cuadros

Cuadro 1.	Clasificación de ambientes protegidos.	10
Cuadro 2.	Contenido de humedad en el suelo con respecto a la textura.	16
Cuadro 3.	Densidad aparente promedio según tipo de suelo.....	17
Cuadro 4.	Valores de infiltración según textura del suelo.	17
Cuadro 5.	Coeficiente de cultivo, fracción de agotamiento y profundidad de raíces para hortalizas.....	18
Cuadro 6.	Especificaciones generales de las zonas de riego.	43
Cuadro 7.	Valor de porcentaje de área a regar para cada diseño.	47
Cuadro 8.	Requerimientos hídricos de invernaderos y zona de campo abierto.....	49
Cuadro 9.	Diferencia de altura entre fuente de abastecimiento y zonas de riego.....	50
Cuadro 10.	Parámetros hidráulicos de los laterales.....	51
Cuadro 11.	Parámetros hidráulicos de la tubería múltiple.....	52
Cuadro 12.	Parámetros hidráulicos de la tubería principal.....	54
Cuadro 13.	Lista de materiales esenciales para los sistemas de riego.	59
Cuadro 14.	Costos asociados a la instalación de los 5 sistemas de riego.	60
Cuadro 15.	Análisis costo beneficio para los sistemas diseñados.	61
Cuadro 16.	Evaluación de impactos sociales.....	62

Índice de Figuras

Figura 1.	Triangulo de clases texturales	15
Figura 2.	Imagen satelital del área Proyecto MASHAV.	44
Figura 3.	Valores de precipitación de la estación Ciudad de Guatemala.....	46
Figura 4.	Diagrama de flujo del funcionamiento de la automatización.....	58

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar cinco sistemas automatizados de riego por goteo y fertirriego para el área del Proyecto MASHAV de la Escuela Nacional Central de Agricultura (ENCA), ubicada en la Finca Bárcena, Villa Nueva, Guatemala. Se determinó el requerimiento hídrico a partir del análisis de parámetros edafológicos como textura, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y evapotranspiración (datos proporcionados por la institución), permitiendo adaptar cada diseño a las condiciones específicas de las áreas de riego.

El diseño hidráulico se desarrolló mediante el cálculo de caudales, presiones y pérdidas de carga, seleccionando tuberías, válvulas, filtros y demás componentes esenciales. Asimismo, se integró un sistema de fertirriego mediante un inyector Venturi y una propuesta de automatización basada en un controlador central, sensores y electroválvulas, con el fin de optimizar la eficiencia operativa.

Los resultados incluyeron la determinación de la lámina neta y bruta, tiempo y frecuencia de riego, así como la evaluación económica del sistema. El análisis costo-beneficio indicó una relación de \$0.52 USD de beneficio por cada dólar invertido, junto con una viabilidad ambiental positiva conforme al listado taxativo del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), destacando el potencial del proyecto para fortalecer la sostenibilidad e innovación tecnológica en la ENCA.

Palabras clave: Caudal, diseño hidráulico, automatización, fertirrigación, goteo.

ABSTRACT

The objective of this project is to design five automated drip irrigation and fertigation systems for the MASHAV Project area of the National Central School of Agriculture (ENCA), located in Finca Bárcena, Villa Nueva, Guatemala. The water requirement was determined from the analysis of soil parameters such as texture, field capacity, permanent wilting point and evapotranspiration (data provided by the institution), allowing each design to be adapted to the specific conditions of the irrigation areas.

The hydraulic design was developed by calculating flow rates, pressures and pressure losses, selecting pipes, valves, filters and other essential components. Likewise, a fertigation system was integrated using a Venturi injector and an automation proposal based on a central controller, sensors and solenoid valves, to optimize operational efficiency.

The results included the determination of the net and gross sheet, irrigation time and frequency, as well as the economic evaluation of the system. The cost-benefit analysis indicated a \$0.52 USD benefit ratio for every dollar invested, along with a positive environmental viability according to the exhaustive list of the Ministry of Environment and Natural Resources (MARN), highlighting the potential of the project to strengthen sustainability and technological innovation in the ENCA.

Keywords: Flow, hydraulic design, automation, fertigation, drip.

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia en el uso del agua y los nutrientes representan uno de los principales desafíos de la agricultura moderna, especialmente donde la presión sobre los recursos hídricos es creciente y los requerimientos productivos son altos. Esto se evidencia en ambientes protegidos como invernaderos y en cultivos a campo abierto, donde es necesario tomar medidas para hacer un uso más eficiente del recurso agua. Actualmente, de acuerdo con Vijay et al. (2020), el riego manual —aplicación de agua mediante mangueras o cintas de riego sin apoyo de sistemas presurizados o automatizados— puede resultar ineficiente cuando no se realiza un control adecuado del caudal y del tiempo de aplicación. Esta deficiencia puede ocasionar desperdicio de agua y exceso de humedad en el suelo, lo que dificulta el crecimiento de los cultivos debido a la reducción del oxígeno disponible en la zona radicular, generando pérdidas en las cosechas por encharcamiento. Además, el encharcamiento favorece la compactación del suelo y reduce el oxígeno en las raíces. Respondiendo a estas limitaciones, la automatización del riego y fertirriego ha sido identificada como una estrategia clave para aumentar la precisión en la aplicación de insumos, mejorar el rendimiento de los cultivos y reducir el impacto ambiental, así como para minimizar el costo de monitorear actividades agrícolas, incluidas la gestión del suelo y del recurso hídrico (FAO, 2022). El desarrollo efectivo de un sistema de riego automatizado también presenta desafíos, requiere la integración de sensores para monitorear la humedad del suelo y algunos otros parámetros de gran importancia, así como la optimización de algoritmos de control para garantizar una distribución óptima del recurso hídrico (Cárdenas Reyes et al, 2024). Sin embargo, en muchos entornos agrícolas de América Latina, estos sistemas siguen siendo poco accesibles o subutilizados por falta de criterios técnicos locales o incluso de infraestructura adecuada.

En la Escuela Nacional Central de Agricultura (ENCA), ubicada en Bárcenas, Guatemala, se cultivan diversas hortalizas distribuidas en cuatro invernaderos y en campo abierto. A pesar de contar con infraestructura productiva, los sistemas de riego existentes presentan limitaciones en cuanto al control de tiempos de riego y a la uniformidad de aplicación. Actualmente, el riego se activa manualmente con base en lecturas de tensiómetros, lo cual representa un sistema dependiente de la disponibilidad de mano de obra y, por lo tanto, vulnerable a errores en la gestión del tiempo de riego. Estas condiciones

afectan la uniformidad en la aplicación de agua y nutrientes, reduciendo la capacidad de respuesta frente a las necesidades reales del cultivo.

Además, es importante indicar que los sistemas de riego existentes en la ENCA se instalaron de manera empírica, sin un diseño técnico ni estudios previos que aseguraran su eficiencia. Recurrieron principalmente a los recursos y materiales disponibles en el momento, sin considerar parámetros hidráulicos, agronómicos ni características específicas del suelo. Esta situación genera un uso ineficiente del agua y de los nutrientes, lo que limita el potencial productivo de los cultivos. Cabe destacar que la ENCA es una institución dedicada a la formación de futuros profesionales agrícolas, forestales y agroindustriales, por lo que la ausencia de un sistema de riego eficiente reduce el valor demostrativo de las prácticas agrícolas y la oportunidad de promover tecnologías sostenibles para el manejo del recurso hídrico.

Estudios recientes han demostrado que la incorporación de tecnologías de automatización basadas en sensores del suelo y parámetros agronómicos permite reducir el consumo de agua y fertilizantes, aumentando hasta un 30% la producción de estos (Wei et al., 2020). Sin embargo, aún existen vacíos en la adaptación de estas tecnologías a condiciones específicas de suelo, clima y tipo de cultivo en instituciones educativas y fincas demostrativas, donde también se requiere que estas soluciones sean replicables, de bajo costo y con impacto pedagógico.

En este contexto, el presente Trabajo Final de Graduación propone el diseño de cinco sistemas de riego y fertirriego automatizado, tanto en áreas de invernadero como en campo abierto, con base en parámetros físicos del suelo y requerimientos específicos de los cultivos hortícolas. La propuesta responde a una necesidad identificada junto con personal técnico de la ENCA, donde se busca mejorar la eficiencia de los sistemas de riego para garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola. La implementación se realizará en la sección de investigación en el área del Proyecto MASHAV, el cual promueve el uso de tecnologías sostenibles para la formación de estudiantes y técnicos agrícolas. El desarrollo de esta propuesta busca optimizar el uso del recurso hídrico y mejorar la eficiencia de los fertilizantes. Además, permitirá a la ENCA el uso de criterios técnicos que servirán para la

planificación y ejecución de futuras inversiones en infraestructura agrícola, apoyando la toma de decisiones de manera más informada.

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo general

Diseñar cinco sistemas de riego por goteo y fertirriego automatizados en función de las necesidades hídricas reales de los cultivos de hortalizas, con el fin de optimizar el uso del agua y nutrientes en los cultivos bajo invernadero y campo abierto de la Escuela Nacional Central de Agricultura (ENCA), Finca Bárcena, Villa Nueva, Guatemala.

2.2.Objetivos específicos

- 1) Establecer criterios técnicos para el diseño de cinco sistemas de riego y fertirriego automatizado a partir del análisis de los parámetros fisicoquímicos del suelo y de los requerimientos específicos de los cultivos de hortalizas.
- 2) Proponer el sistema de automatización de los cinco sistemas de riego por goteo y fertirriego, definiendo la estructura de control, componentes electrónicos y la lógica de operación requerida, con el fin de garantizar un funcionamiento autónomo y eficiente.
- 3) Analizar la viabilidad de los sistemas de riego diseñados, mediante criterios económicos, ambientales y sociales, con el fin de evaluar su factibilidad para la ejecución del proyecto.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Ambientes protegidos

De acuerdo con Santos (2010), el desarrollo de una agricultura moderna y competitiva requiere de sistemas de protección de cultivos, ya que los consumidores demandan productos de alta calidad, libres de daños por agentes climáticos, plagas o enfermedades. Por lo tanto, para responder a estas exigencias, los agricultores necesitan mantener una producción constante y eficiente, lo que ha impulsado la adopción de sistemas de cultivos protegidos o semiprotegidos. Es por esto por lo que, se da la incorporación de diversas tecnologías agrupadas bajo el concepto de agricultura protegida.

La agricultura protegida es toda aquella estructura cerrada, cubierta por materiales transparentes o semitransparentes, que permite tener condiciones artificiales de microclima para el cultivo de plantas y flores (Santos et al., 2010). Bajo estas condiciones, se lleva a cabo el control del medio edafoclimático alterando sus condiciones; suelo, temperatura, radiación solar, viento, humedad, entre otros. Lo anterior permite modificar el ambiente natural en el que se desarrollan los cultivos, con el fin de obtener un crecimiento vegetal óptimo, aumentar el rendimiento y mejorar la calidad de los productos.

Según Juárez-López (2011), la agricultura protegida se realiza bajo estructuras construidas con la finalidad de evitar restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas. En los últimos años se han desarrollado varios tipos de estructuras para la protección de estas, que plantean diferentes alternativas para generar condiciones ambientales óptimas en el desarrollo de los cultivos, tomando en cuenta los requerimientos climáticos de cada especie y los factores climáticos de cada región

3.1.1. Estructuras en Ambientes protegidos

En la agricultura protegida se tienen diversas estructuras, las cuales permiten obtener producciones de alto valor agregado, además de proteger el cultivo de bajas temperaturas, reducir la velocidad del viento, reducir daños por plagas y enfermedades, aumentar la producción y producir fuera de época.

Se pueden clasificar por la complejidad de sus estructuras, así como por su mayor o menor capacidad de control ambiental. (Cuadro 1)

Cuadro 1. Clasificación de ambientes protegidos.

Tipo de estructura	Descripción	Principales ventajas
Micro túneles	Pequeñas estructuras de 0.5 a 1 m de altura, hechas con hileras de arcos de PVC, alambre o manguera, cubiertas con malla o plástico. Se usan en etapas iniciales del cultivo contra agentes climáticos, plagas y enfermedades.	Protegen de lluvia, viento, granizo, insectos y animales. Reducen agroquímicos, mejoran rendimientos y calidad. Cosechas en casi cualquier época del año, incluso en menor tiempo.
Macro túneles	Construidos con arcos de bambú, PVC o hierro galvanizado, cubiertos con una o más capas de plástico de tipo invernadero. Altura entre 3 y 3.5 m. Tienen 4 m de ancho y 30 m de longitud. Ventilación pasiva y se desarrolla manualmente.	Protección completa del cultivo. Adecuado para agricultores de bajos y altos recursos económicos. Tiempo de instalación rápido, reduciendo inversión y mano de obra.
Invernaderos	Construcciones altas, cerradas con materiales transparentes (plástico, vidrio, policarbonato). Pueden incluir ventilación pasiva o sistemas de control climático. Sistemas más costosos.	Mayor calidad y rendimiento. Ahorro de agua y fertilizantes. Mejor control de plagas. Posibilidad de varios ciclos de cultivo al año.
Casas malla	Estructuras de malla (blanca, negra o de colores) que proporcionan sombreado del 30–50 %. Pueden ser fijas o móviles.	Reducen radiación y quemaduras solares, disminuyen evaporación y estrés hídrico. Mejoran condiciones para el desarrollo y la producción.

Nota. Elaboración propia con datos de Santos et al. (2010).

3.2. Generalidades de las hortalizas

3.2.1. Descripción del cultivo

Las hortalizas son plantas herbáceas de cultivo intensivo o extensivo, que se cultivan para el aprovechamiento de las partes útiles o comestibles, tales como: hojas, tallos, raíces, frutos y flores.

De acuerdo con Vicente Giaconi M (2001), las hortalizas son cultivos que tienen un ciclo vegetativo corto de aproximadamente 60 a 80 días. Los suelos recomendados para la siembra de hortalizas son los francos (textura media), ya que ofrecen condiciones ideales para la mayoría de las especies hortícolas, combinando exposición, relieve y calidad. En cuanto a la reacción del suelo (pH), en su mayoría prefieren suelos débilmente ácidos o neutros con elevado contenido de materia orgánica. Asimismo, el suelo debe contener bastante humus, como elemento básico que preside las múltiples reacciones químicas y biológicas, con el fin de favorecer el aprovechamiento de los nutrientes.

3.2.2. Requerimientos nutricionales

El crecimiento acelerado y la alta demanda de productividad en las hortalizas implican un consumo intensivo de nutrientes. Según el Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura S.C. (INTAGRI) (2017), la mayoría de las hortalizas y cultivos tienen alta respuesta a tres macronutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en proporciones que varían según la especie y la etapa fenológica, ya que muchos de los suelos tienen escasa cantidad de alguno de ellos.

Por otra parte, de acuerdo con Bautista (2023), los elementos que más necesitan las hortalizas corresponden al nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre (N, P, K, Ca, Mg, S) comúnmente llamados macronutrientes. A su vez, requieren micronutrientes como: hierro, cobre, zinc, manganeso y boro (Fe, Cu, Zn, Mn, B). El nitrógeno favorece el desarrollo vegetativo, sin embargo, en grandes cantidades puede provocar que se retrase la madurez de la planta y si es deficiente, que reduzca su tamaño. El fósforo favorece la acumulación de azúcares en los frutos, su deficiencia causa manchas de color rojizo y necrosamiento de los bordes, mientras que el potasio es clave para la calidad de los frutos y la resistencia a enfermedades.

3.2.3. Requerimiento hídrico

El agua es un factor determinante en el rendimiento de las hortalizas, ya que estas poseen sistemas radiculares poco profundos y un ciclo vegetativo corto que las hace altamente sensibles al déficit hídrico. En ambientes protegidos, el consumo hídrico tiende a ser más controlado debido a la reducción de pérdidas por evaporación, mientras que a “campo abierto” se ve afectado por factores climáticos como la radiación solar, el viento y la temperatura. De acuerdo con Calzada Roviroso (s.f.), para cultivar hortalizas es necesario disponer de suficiente agua para cubrir las necesidades hídricas de las plantas. Entre 4 a 5 litros de agua por día por metro cuadrado.

3.3.Riego

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), (2024) el riego consiste en aportar agua al sustrato, para que las plantas puedan crecer y

desarrollarse de manera óptima. Un sistema de riego está diseñado para mantener de manera intencional y calculada, el flujo de agua que requieran los cultivos. El sistema de riego se diseña en dos etapas: diseño agronómico y diseño hidráulico. A su vez, existen distintos tipos de sistemas de riego en la agricultura, algunos son por gravedad y otros a presión.

El sistema de riego a presión utiliza accesorios como aspersores o goteros para la distribución del agua. Para que estos funcionen correctamente, es necesario que el agua cuente con cierta presión, la cual puede generarse de dos formas: aprovechando el desnivel natural del terreno o mediante una bomba hidráulica. La elección del método de riego es fundamental para el máximo rendimiento del recurso hídrico y del cultivo. Un método inadecuado no solo reduce la eficiencia, sino que también puede provocar fallas en el riego y daños tanto en el suelo como en las plantas. Entre los sistemas de riego a presión más conocidos se encuentran: cañón, aspersión, microaspersión y goteo. (IICA, 2020)

En Guatemala, solamente el 12% del total de áreas con potencial tienen sistemas de irrigación. De esas, el 89% han sido con contribución de empresas agroexportadoras, en tanto el Estado ha contribuido con el 6% de esta cobertura, señala el estudio “Actualización y Análisis del Potencial de Riego en Guatemala”, desarrollado en 2023. (MAGA, 2024)

3.3.1. Riego por goteo

Este tipo de sistema suministra agua directamente a las raíces de las plantas mediante goteros o microtubos. Es una forma eficaz de riego, ya que minimiza el desperdicio de agua y evita que llegue a las hojas, reduciendo el riesgo de enfermedades fúngicas. Es especialmente útil para cultivos de alta densidad, como hortalizas y frutas, en zonas con recursos hídricos limitados. (BASF Agriculture, 2025)

De acuerdo con el IICA (2020) es adecuado para todo tipo de clima, ya que aplica agua en la superficie del suelo bajo el follaje de los cultivos, disminuyendo la evaporación del agua. Asimismo, puede ser utilizado en cualquier tipo de suelo, desde arenosos hasta suelos arcillosos.

Se caracteriza porque requiere de bajas presiones para operar, en un rango de 5 a 10 mca, la eficiencia es sumamente alta, superior al 90 %, y se aplica solamente el agua que se

evapotranspira diariamente. Sus principales características son: se humedece solamente una porción del suelo, los caudales utilizados son pequeños y la aplicación del agua se hace con una alta frecuencia, normalmente en forma diaria. (Valverde Conejo, 2022)

3.3.2. Componentes riego por goteo

De acuerdo con Martínez Huerta (2007) los componentes de un sistema de riego por goteo son:

- *Equipo de bombeo:* compuesto por motor y una bomba que toma el agua de los depósitos. Sin embargo, según Roberti-Pérez (2018), un sistema por gravedad no necesita bombeo mecanizado, ya que pueden aportar la presión necesaria.
- *Cabezal de control:* se encuentra enseguida del equipo de bombeo y está constituido por medidores de caudal; registran el volumen de agua aplicada, filtros de arena; retienen impurezas y evitan obstrucciones, inyector de fertilizante; facilitan el fertirriego, filtros de tela o malla; retienen impurezas, válvulas de control de presión; regulan la presión, válvulas; regulan el paso de agua, manómetros; permiten monitorear la presión en distintos puntos del sistema.
- *Línea principal o primaria:* conduce el agua desde el equipo de bombeo hasta la línea de derivación, la tubería es de polietileno o PVC, normalmente se encuentra enterrada para seguridad del sistema y para facilitar el uso de la maquinaria de trabajo.
- *Líneas de derivación o secundaria:* son tuberías que unen la tubería principal con las tuberías laterales.
- *Líneas laterales o terciarias:* son las mangueras donde van colocados los goteros, se colocan a lo largo de las líneas de derivación siguiendo el espaciamiento de las líneas de cultivo.
- *Goteros:* disipan la presión del agua que conduce la tubería terciaria aplicando cantidades muy pequeñas de ésta en forma constante, el espaciamiento de los goteros se determina por la separación de las plantas en el surco, aunque

también influyen factores como el tipo de suelo, pendiente del terreno y características del emisor. El diámetro del orificio de salida del gotero varía entre 0.3 y 1 milímetros, lo que permite obtener bajos caudales de agua.

3.4.Diseño Agronómico del Sistema de riego

3.4.1. Determinación del requerimiento hídrico

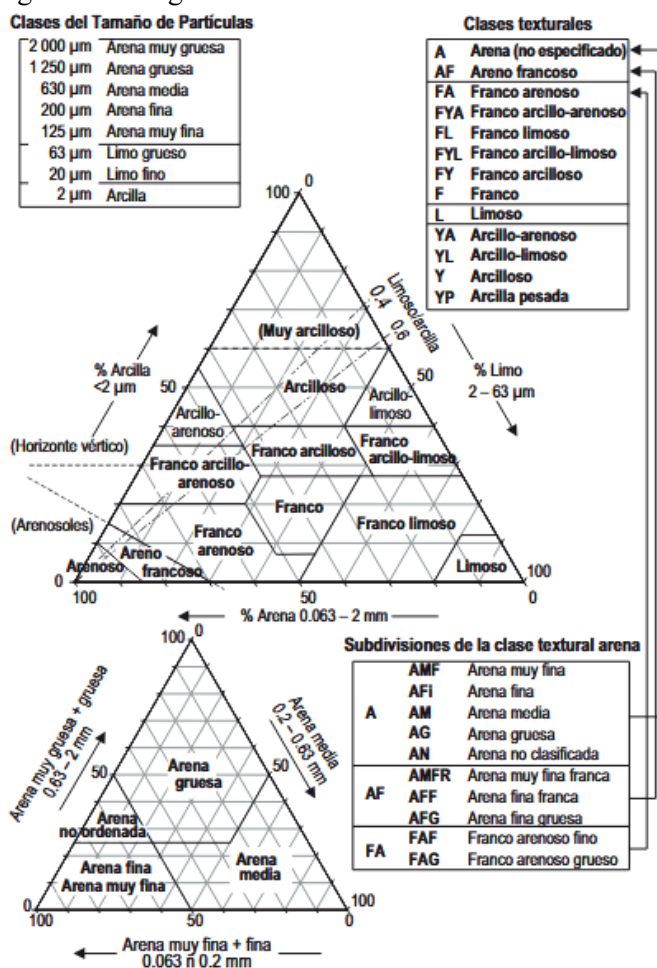
El diseño de un sistema de riego comienza siempre con una etapa clave: definir cuánta agua necesitan los cultivos en el periodo de mayor demanda. A partir de este dato, se calcula la cantidad total de riego que se debe aplicar. Asimismo, se decide la ubicación de los emisores y cuáles serán sus características, de manera que el riego sea eficiente y cumpla con su propósito. Para ello se consideran factores como las necesidades de agua de cada cultivo, la forma en que están sembrados, la calidad del agua disponible y las particularidades del suelo. (Monge Redondo, 2022)

3.4.1.1.Textura

La textura define la proporción de arena, limo y arcilla en el suelo, lo que a su vez influye significativamente en su capacidad para retener agua útil para los cultivos. Según la Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y La Alimentación (FAO), (2009) la textura del suelo se refiere a la proporción relativa de las clases de tamaño de partícula (o separaciones de suelo, o fracciones) en un volumen de suelo dado y se describe como una clase textural de suelo. (Figura 1)

Entre los métodos más comunes para determinar textura se encuentran: el método del tacto, el cual consiste en manipular y presionar con los dedos una muestra de suelo y el método por Bouyoucos, el cual se realiza en el laboratorio y utilizando el triángulo de texturas aplicado por la USDA según sea el tamaño de las partículas.

Figura 1. Triangulo de clases texturales



Fuente. Segundo FAO (1990).

3.4.1.2.Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)

La capacidad de campo es el contenido de agua de un suelo, después que ha sido mojado abundantemente y se ha dejado drenar libremente, evitando pérdidas por evapotranspiración. Corresponde aproximadamente al contenido de agua del suelo a una tensión o potencial mátrico del agua de -0,33 bares. Normalmente este contenido de agua se toma alrededor de 24 a 48 horas después de un riego o lluvia abundante. (Silva et al., 2015)

De acuerdo con la FAO (2005), la capacidad de campo se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. Este drenaje ocurre por la transmisión del agua a través de los poros mayores de 0,05

mm de diámetro; sin embargo, la capacidad de campo puede corresponder a poros que varían entre 0,03 y 1 mm de diámetro. (FAO, 2005)

Por otra parte, el punto de marchitez permanente es el contenido de agua de un suelo al cual la planta se marchita y ya no recobra su turgencia al colocarla en una atmósfera saturada durante 12 horas. Por convención corresponde al contenido de agua a una tensión o potencial mátrico de -15 bares. (Silva et al., 2015)

Los rangos de humedad disponible en el suelo de acuerdo con la textura de este se encuentran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Contenido de humedad en el suelo con respecto a la textura.

Textura	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitez permanente (%)	Agua total disponible (%)
Arenosa	6-12	2-6	4-6
Franco arenosa	10-18	4-8	6-10
Franco	18-26	8-12	10-14
Franco arcillosa	23-31	11-15	12-16
Arcillo arenosa	27-35	13-17	14-18
Arcillosa	31-39	15-19	16-20

Fuente. (Villalobos, 2008).

3.4.1.3.Densidad aparente

La densidad aparente expresa la relación de la masa de suelos seca (partículas minerales y materia orgánica) por unidad de volumen total (volumen ocupado por los sólidos y volumen ocupado por poros). (Gabriels y Lobo, 2011)

De acuerdo con Guardia et al. (2015) los valores de densidad aparente del suelo varían en función de las propiedades de éstos, y fundamentalmente con la textura y el contenido de materia orgánica. Mediante la determinación de la densidad se puede obtener la porosidad total del suelo. Una densidad aparente alta indica un suelo compacto o tenor elevado de partículas granulares como la arena. Una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido para el crecimiento de las plantas. (FAO, s.f.). Se pueden utilizar como valores medios los que se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Densidad aparente promedio según tipo de suelo.

Suelo	Densidad aparente (g/cm³)
Arenas	1.4-1.6
Francos	1.3-1.4
Arcillas	1.1-1.3
Suelos orgánicos	0.7-1.1

Fuente. (Guardia et al., 2015).

3.4.1.4. Infiltración e Infiltración Básica

La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo. La tasa de infiltración, en la ciencia del suelo, es una medida de la tasa a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación o la irrigación. (Úbeda Rivera et al., 2018) Depende de las características intrínsecas del medio, como el contenido de materia orgánica, la porosidad, la textura, la densidad aparente y el contenido de agua, entre otros. (Orjuela et al., 2010)

La infiltración básica está definida como la velocidad de infiltración básica, que es el valor instantáneo que corresponde al tiempo en que la pendiente de la curva de la velocidad de infiltración en función del tiempo es igual a -10% de su valor (Delgadillo y Pérez, 2016). Es decir, la infiltración básica es la velocidad de infiltración registrada cuando, en un periodo de una hora, se produce un cambio igual o menor al 10% en la velocidad de infiltración. El cuadro 4 presenta los valores de infiltración según la textura del suelo.

Cuadro 4. Valores de infiltración según textura del suelo.

Suelo	Infiltración básica (mm/h)
Arenoso	>30
Franco arenoso	20-30
Franco	10-20
Franco arcilloso	5-10
Arcilloso	1-5

Fuente. (Villalobos-Araya & Valverde-Conejo, 2016).

3.4.1.5. Evapotranspiración potencial (Eto) y del cultivo (Etc)

La evapotranspiración se conoce como la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte

mediante transpiración del cultivo. Las unidades en que se representa la evapotranspiración son en mm/día la cual depende de los factores climáticos del lugar, el tipo de cobertura vegetal y la disposición de agua en el suelo. (FAO, 1990).

La evapotranspiración del cultivo (Etc) bajo condiciones estándar se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo con las condiciones climáticas reinantes. (G Allen, et al., 2006)

Para la mayoría de los cultivos, la Etc se estima a partir del enfoque del coeficiente del cultivo (K_c), como el producto de una evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{to}) y el coeficiente del cultivo. (Cenicaña, 2015).

Cuadro 5. Coeficiente de cultivo, fracción de agotamiento y profundidad de raíces para hortalizas.

Cultivo	Coeficiente de cultivo (K_c)	Agotamiento (%)	Profundidad de raíces (m)
Chile	1.05	0.30	0.5-1.0
Pepino	1.00	0.50	0.7-1.2
Tomate	1.15	0.40	0.7-1.5
Apio	1.00	0.20	0.3-0.5
Lechuga	1.00	0.30	0.3-0.5
Cebolla	1.00	0.30	0.3-0.6
Repollo	1.05	0.45	0.5-0.8
Coliflor	0.95	0.45	0.4-0.7

Nota. Elaboración propia con datos de FAO. (2006).

3.4.1.6. Porcentaje de área a regar (PAR)

Representa la relación entre el área humedecida y el área total bajo riego expresada en porcentaje. Dependiendo del área que se desea humedecer y del tamaño del bulbo humedecido, se elegirá el número de cintas de goteo que se ubicaran por cada cama y el distanciamiento entre goteros sobre el mismo lateral. Para las hortalizas, se recomienda un porcentaje de área mojada entre un 70%-90% con una densidad de siembra alta, sin embargo, para el riego por goteo se considera aceptable regar un porcentaje entre 35%-70% del área total. (Valverde Conejo, 2022)

3.5.Diseño Hidráulico del Sistema de Riego

En el diseño hidráulico de los equipos de riego presurizado, la capacidad del sistema se obtiene partiendo de la demanda pico del cultivo en desarrollo pleno; es decir, de los mayores valores de Etc y el porcentaje de cobertura del terreno respectivamente. De acuerdo con Valverde Conejo (2022) el diseño hidráulico permite determinar los diámetros de tubería de conducción y distribución a utilizar, estimando las eficiencias del sistema, las cuales dependen de tres factores: manejo de riego (perdidas de carga, caudal, entre otros), mantenimiento del sistema y el coeficiente de uniformidad.

Previo a ello, es necesario realizar el diseño agronómico. De acuerdo con Monge (2018) el diseño agronómico se define como el conjunto de datos y propuestas referidos al manejo del agua en la agricultura. Es el estudio de las potencialidades y limitaciones de los recursos suelo y agua, bajo las condiciones climáticas del lugar. En otras palabras, consiste en determinar las necesidades hídricas del cultivo, la duración y frecuencia de riego, así como la estrategia de aplicación del recurso hídrico en función de las características del suelo, el clima y características específicas del cultivo. Este diseño constituye la base sobre la cual se dimensiona el sistema hidráulico.

Monge Redondo (2022) indica que en el diseño hidráulico se calcula y se dimensiona la red de riego, de tal forma que se puedan aplicar las necesidades de agua al cultivo en el tiempo establecido en el diseño agronómico previamente realizado. En este se calculan los diámetros de las tuberías y las presiones de operación, se seleccionan los equipos de bombeo, los sistemas de filtración, las válvulas, contadores, piezas y otros accesorios que permitirán aplicar el agua a los cultivos de una manera más eficiente y controlada.

3.6.Fertirriego

El fertirriego es la práctica de inyectar fertilizante líquido en el sistema de riego. Puede utilizarse en todos los tipos de sistemas de riego y se utiliza tanto en viveros que producen plantas a raíz desnuda como aquellos que lo hacen en contenedores. El fertirriego permite aplicar los nutrientes minerales en la cantidad y concentración adecuadas, en el momento justo, de forma fácil y uniforme, junto con el agua. (Dumroese et al. 2012)

Esta técnica permite optimizar el recurso hídrico y al mismo tiempo colocar los fertilizantes en solución cerca del sistema radicular de la planta, con lo cual, se da un contacto más rápido y directo de los elementos nutritivos con las raíces y, por lo tanto, se da una mejor absorción y aprovechamiento de los fertilizantes según la etapa de desarrollo del cultivo.

De acuerdo con Martínez Huerta (2007) es común el uso de tanques de fertilización, por su bajo costo; sin embargo, cada vez se utilizan más los sistemas que introducen los fertilizantes mediante inyectoros Venturi o por bombas de inyección. La utilización de inyectoros implica el uso de tecnologías complementarias. Debido a esto, es necesario incorporar un programa para controlar el funcionamiento del equipo, depósitos para preparar las soluciones de abono, bombas de inyección, contadores de agua, electroválvulas, convertidor de señales y medidores de pH.

Para el correcto manejo del fertirriego es fundamental conocer las características del agua y puede definirse en relación con el manejo del cultivo como dotar a la planta del agua necesaria para la absorción y transporte de nutrientes, disminuir la salinidad de la rizosfera y equilibrar el balance de nutrientes que permita manejar la floración y/o la maduración de los frutos. (Mazuela Águila y de La Riva Morales, 2013)

3.6.1. Equipamiento en fertirriego

De acuerdo con Vega Ravello (2016) la elección del equipo de fertirrigación debe tener en cuenta tanto los requerimientos del cultivo como la capacidad del sistema de riego. A su vez, para su correcto manejo se necesitan; tanque de fertilizante, sistema de filtrado, equipo de inyección y en algunos casos, bomba de succión. Los cuales, según el autor, se definen de la siguiente manera:

- *Tanque de almacenamiento de fertilizante:* es un depósito donde se preparan las soluciones nutritivas. Varían en número y tamaño según el diseño del sistema de fertirriego para el cultivo. El material más usado para su fabricación es el plástico por ser resistente a las soluciones ácidas.
- *Sistema de filtrado:* limpia las impurezas en el agua y en la solución fertirriego; pero no las impurezas de origen químico, las cuales se manejan a

través del pH, este con un rango entre 5.5 y 6 el más favorable para la solución fertirrigadora. Las impurezas de origen biológico se contrarrestan evitando la exposición del agua a la luz o con productos químicos. Es importante tener presente que la presencia de impurezas afecta a los emisores, alterando su descarga o la aplicación de agua a la planta.

- *Equipo de inyección:* es el que permite la aplicación de la solución nutritiva al sistema de distribución. Trabajan con una bomba que eleva la presión de inyección de la solución nutritiva con respecto a la del sistema presurizado. Varía de acuerdo con el volumen y tiempo de inyección. Pueden ser Venturi, dosificadores, tanque de fertilización o bombas inyectoras.

3.6.2. Métodos de inyección en fertirriego

De acuerdo con U. Kafkafi y J. Tarchitzky (2012) la inyección de fertilizante consume energía para superar la presión interna de la red de riego. El equipo de inyección de fertilizantes se clasifica en tres grupos principales, de acuerdo con el medio empleado para obtener la mayor presión para la solución fertilizante:

- *Inyección por un aparato Venturi:* es una unidad que hace uso del principio de succión de Venturi al emplear la presión inducida por el flujo de agua para chupar la solución fertilizante del tanque hacia la línea de riego.
- *Inyección por presión diferencial:* este sistema utiliza un tanque metálico presurizado hermético con protección interna antiácida en sus paredes, donde la presión diferencial se crea por una válvula mariposa que conduce parte del agua de riego hacia el tanque, permite el uso de fertilizantes sólidos como líquidos.
- *Inyección por presión positiva:* las bombas de inyección pueden aumentar la presión en el tanque de la solución madre del fertilizante líquido y llevar a una relación predeterminada entre el volumen de solución fertilizante y el volumen de agua de riego, alcanzando así, por lo tanto, una distribución proporcional de nutrientes en el agua de riego

Las fuentes más comunes de energía para las bombas de fertirrigación son: la energía hidráulica y bombas eléctricas dosificadoras. Son comunes en invernaderos y en áreas donde hay electricidad disponible y confiable. (U. Kafkafi y J. Tarchitzky, 2012)

3.7. Automatización del sistema

Actualmente, se encuentran distintas maneras de controlar el riego que se suministra a un cultivo y en función del que se utilice habrá que controlar una serie de variables. En general, en el riego se puede controlar el tiempo y caudal de agua. En fertilización, se puede controlar la inyección de fertilizantes mediante el pH de la solución nutritiva, la conductividad eléctrica y la inyección de microelementos. (Ruiz & Molina, 2020).

3.7.1. Componentes esenciales

3.7.1.1. Programador de riego

Los controladores inteligentes de riego o programadores de riego basados en datos climáticos o de sensores han demostrado reducir significativamente el consumo de agua. Controladores con algoritmos basados en evapotranspiración y sensores de humedad han logrado ahorros de hasta un 51% en estudios controlados y 30% en aplicaciones residenciales comunes (Williams et al., 2025). Estos sistemas permiten programar, ajustar y optimizar el riego basados en condiciones reales del entorno. Los datos que pueden almacenar son muy variados (CE, pH, temperatura, etc.).

3.7.1.2. Sensores de humedad

Los sensores de humedad miden una señal eléctrica que calcula la cantidad de agua en el suelo, lo cual permite determinar el volumen de agua almacenado en éste después de un riego o lluvia. Generalmente se componen de una sonda con electrodos en un extremo y un sistema de excitación y captura de información. Los electrodos se colocan en el suelo y su longitud oscila entre 5 y 30 cm. (Cenicaña, 2018)

3.7.1.3. Electroválvulas

Permiten abrir y cerrar el paso de agua siguiendo las órdenes de un programador, es decir, actúa como llave de paso de forma automatizada. (Rimesa, 2020) Son importantes en

la automatización del riego, ya que de ellas depende la frecuencia de riego, así como el control y flujo de agua.

3.7.1.4.Módulo de comunicación

Los medios de transmisión inalámbricos realizan la recepción de señales y datos por medio de antenas integradas dentro del sistema automatizado. Pueden ser por Wifi, por GPRS con mensajes cortos, navegación y correo electrónico o también por medio de bluetooth en dispositivos de bajo consumo y cobertura. Estos sistemas de transmisión inalámbrica permiten la comunicación entre el programador de riego y los actuadores o electroválvulas para realizar una acción en específico. En este proyecto se utilizará Home Assistant como plataforma de control centralizada. Este software cuenta con un completo sistema operativo de código abierto, que permite integrar cientos de marcas de dispositivos domóticos, y miles de dispositivos, y todo ello de forma simultánea para tener el control total de la domótica en un proyecto. Una vez que se ha añadido todos los dispositivos al sistema, se puede realizar diferentes automatizaciones para que realicen ciertas acciones. Asimismo, permite unificar de manera centralizada todos los sensores, actuadores y dispositivos de domótica que se tengan con una gestión local y una interfaz gráfica de usuario realmente intuitiva. (De luz, 2024)

3.8.Software para análisis de datos

3.8.1. CLIMWAT y CROPWAT

De acuerdo con la FAO (2023) CLIMWAT es una base de datos climática diseñada para trabajar en conjunto con el programa CROPWAT. Esta base proporciona promedios históricos mensuales de variables meteorológicas (temperatura, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa) de una amplia variedad de estaciones climáticas en todo el mundo. Por otra parte, CROPWAT se utiliza para calcular las necesidades hídricas y de riego de los cultivos a partir de datos edafológicos, climáticos y del cultivo. Además, permite desarrollar programas de riego para diferentes condiciones de gestión y calcular el suministro de agua del sistema para patrones de cultivo variables. Permite evaluar las prácticas de riego de los agricultores y estimar el rendimiento de los cultivos tanto en condiciones de secano como de riego.

En cuanto a su funcionamiento, CLIMWAT no calcula directamente la evapotranspiración de referencia (Eto), sino que genera archivos exportables con los datos climáticos de la estación más cercana a la zona de estudio. Estos archivos se importan a CROPWAT, donde se aplica el método de Penman-Monteith FAO-56, el cual está estandarizado internacionalmente y recomendado por la FAO para el cálculo de la Eto diaria o mensual. Con esos datos, CROPWAT combina la Eto con los coeficientes de cultivo (Kc) para estimar la evapotranspiración del cultivo (Etc) y así determinar los requerimientos netos de riego.

3.9. Análisis económico

Comparar los costos estimados sobre presupuestos de construcción entre las distintas alternativas facilita la toma de decisiones técnicas con base en criterios de eficiencia económica. Por lo tanto, con el fin de determinar si es viable realizar el proyecto económicamente, se llevará a cabo un análisis costo-beneficio (ACB).

3.9.1. Análisis Costo-Beneficio

De acuerdo con Castro-Rosales y Rahal (2018) el Análisis Costo Beneficio (ACB) es una herramienta analítica que pone en una balanza los costos y beneficios de un proyecto. Este tipo de análisis puede aplicarse tanto a proyectos privados como públicos. Desde el punto de vista privado, el ACB consiste en evaluar la rentabilidad financiera de un proyecto, es decir de examinar las ganancias privadas que recibe la entidad encargada de ejecutar el proyecto o de quienes invierten en el mismo.

Desde la perspectiva social, el análisis de viabilidad de un proyecto no se limita al criterio económico, sino que también como una herramienta de priorización técnica y social, lo que permite seleccionar aquella opción que ofrezca un mayor beneficio neto para la comunidad ENCA en relación con el costo de implementación.

3.9.2. Costos Directos e Indirectos

Según la Escuela de Posgrado de Economía y Finanzas (2025) los costos directos corresponden a aquellos que se pueden asociar específicamente a una actividad o partida de

obra, como la compra de materiales y mano de obra. Por otra parte, los costos indirectos incluyen gastos generales necesarios para la ejecución del proyecto, pero que no se asocian directamente a un producto o servicio.

3.10. Análisis ambiental y social

La ejecución de proyectos de riego agrícola no solo implica un diseño técnico-hidráulico, sino que también requiere la atención de aspectos ambientales y sociales para garantizar su viabilidad. Algunos autores destacan que incluir estas dimensiones permite anticipar conflictos, aumentar beneficios comunitarios y minimizar los efectos adversos sobre los recursos naturales. (Arboleda, 2008)

Costa Rica ha desarrollado instrumentos institucionalizados a través de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), que establece procedimientos de evaluación de impacto ambiental (EIA) mediante el uso de matrices y plantillas estandarizadas. Dichos instrumentos permiten clasificar los proyectos en función de su nivel de impacto y definen los requisitos ambientales que deben cumplirse antes de su ejecución. Sin embargo, en Guatemala, el organismo rector en materia ambiental es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), el cual regula el proceso mediante el Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental (RECSA, Acuerdo Gubernativo 137-2016). Este reglamento establece un Listado Taxativo que clasifica los proyectos según categorías (A, B1, B2, C), cada una de las cuales exige un instrumento ambiental específico que puede ir desde un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) completo hasta una Ficha Ambiental acompañada de un Plan de Gestión Ambiental (PGA) para proyectos de bajo impacto, como los sistemas de riego agrícola de pequeña y mediana escala (MARN, 2016).

En cuanto al análisis social, este permite identificar los posibles impactos negativos de un proyecto con el fin de poder anticiparlos, atenuar sus efectos y maximizar sus impactos positivos. Diversos organismos internacionales han resaltado la importancia de incorporar variables socioeconómicas y de desarrollo humano en la evaluación de proyectos agrícolas.

En Costa Rica, SETENA incluye dentro de sus instrumentos de evaluación la valoración de impactos sociales asociados a la ejecución de proyectos, particularmente en lo relacionado con la generación de empleo, la percepción comunitaria y la afectación de

medios de vida (SETENA, 2006). De forma similar, en Guatemala el RECSA del MARN contempla la necesidad de identificar y mitigar impactos sociales, estableciendo como requisito la consulta con actores locales y la incorporación de medidas compensatorias.

4. METODOLOGÍA

4.1.Reconocimiento zona de estudio

Se realizó una visita de campo en las instalaciones del proyecto MASHAV con la finalidad de observar las necesidades de cada uno de los invernaderos y zona de campo abierto en cuanto al sistema de riego. Con la ayuda de la herramienta GPS se obtuvieron los puntos georreferenciados de interés como la ubicación de los invernaderos, zona de campo abierto, pozo y tanques de almacenamiento para posteriormente convertirlos a coordenadas UTM y poder modelarlos y obtener una visualización más clara de su ubicación con la herramienta QGis.

4.2.Análisis topográfico

Para el levantamiento de las diferencias de altura entre los puntos de interés de la zona de estudio, se empleó un receptor GPS Garmin 66s, el cual incorpora un altímetro barométrico. Este dispositivo se calibra de manera automática, aunque también permite un ajuste manual. Su precisión varía entre $\pm 1-3$ m y puede verse influenciada por factores como cambios en la presión atmosférica o limitaciones en la señal satelital. En este caso, al ser un área en su mayoría plana, dicha precisión se consideró adecuada. Posteriormente, el procesamiento y representación cartográfica de los datos se efectuó mediante el software QGIS (QGIS, 2020).

4.3. Diseño de riego

4.3.1. Determinación del requerimiento hídrico

4.3.1.1. Textura

Para determinar la textura del suelo se utiliza el método de Bouyoucos descrito por Andrades et al. (2015), el cual consiste en medir durante un tiempo determinado, la sedimentación de las partículas del suelo en el laboratorio de las muestras disturbadas de la zona de estudio. Este procedimiento permite estimar el porcentaje de partículas presentes en las muestras de suelo se determina mediante las ecuaciones (1)(2)(3)(4):

$$\%(Limo + Arcillas) = \frac{L_{c40s}}{PM} * 100 \quad (1)$$

$$\%Limo = 100 - (\%Arenas + \%Arcillas) \quad (2)$$

$$\%Arcilla = \left(\frac{L_{c2h}}{PM} \right) * 100 \quad (3)$$

$$\%Arenas = 100\% - \%(Limo + Arcilla) \quad (4)$$

Donde,

L_c = Lectura corregida a los 40s y 2h

PM = Peso de la muestra seca (g)

Con los porcentajes de partículas obtenidos, se utiliza la Figura 1 para determinar la textura del suelo en estudio. En este caso, los resultados fueron suministrados por el personal técnico de la ENCA.

4.3.1.2. Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)

Para la determinación de la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), se emplea el método gravimétrico utilizando muestras de suelo indisturbadas y disturbadas. Las muestras se saturan durante 24 horas y posteriormente se colocan en ollas de presión con una presión de succión de 0,33 atm para estimar CC y de 15 atm para las de PMP. Las muestras permanecen en las ollas durante 72 horas y luego se deben pesar para obtener el valor de peso de suelo húmedo. Posterior a esto, se llevan al horno a temperatura de 110°C durante 24 h, se pesan nuevamente para obtener el valor de peso de suelo seco y se calcula el contenido de humedad gravimétrica mediante la ecuación (5).

$$CC, PMP = \left(\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right) * 100 \quad (5)$$

Donde,

P_{sh} = Peso de suelo húmedo(g)

P_{ss} = Peso de suelo seco (g)

CC= Capacidad de campo (%)

PMP = Punto de marchitez permanente (%)

En este caso, los resultados de CC y PMP fueron proporcionados por el personal técnico de la ENCA.

4.3.1.3. Densidad aparente

Para obtener el valor de densidad aparente se toman muestras indisturbadas de suelo en cilindros. Posteriormente, se determina el volumen de los cilindros de las muestras de suelo midiendo con una regla la altura y diámetro de cada cilindro para utilizar la ecuación (6).

$$V = \frac{\pi * D^2 * h}{4} \quad (6)$$

Donde,

V = Volumen interno del cilindro (cm³)

D = Diámetro (cm)

h = Altura (cm)

Posteriormente, se colocan las muestras en el horno a 105 °C durante 24 horas y pasado ese tiempo, se pesan en una balanza digital. Se utiliza la ecuación (7) para determinar la densidad aparente para cada una de las muestras.

$$Da = \frac{Pss}{V} \quad (7)$$

Donde,

Da = Densidad aparente (g/cm³)

Pss = Peso del suelo seco (g)

V = Volumen interno del cilindro (cm³)

Estos valores se compararon con los valores medios de densidad aparente según la textura del suelo que propone (Guardia et al., 2015) en el Cuadro 3. En este caso, los resultados obtenidos fueron proporcionados por el personal técnico de la ENCA.

4.3.1.4. Evapotranspiración potencial (Eto) y del cultivo (Etc)

El valor de la evapotranspiración potencial se determinó haciendo uso de los programas Climwat y Cropwat mediante datos meteorológicos medios de la zona de estudio. La evapotranspiración de cultivo se obtuvo haciendo uso de la ecuación (8).

$$Etc = Kc * Eto \quad (8)$$

Donde,

Etc = Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

Eto = Evapotranspiración potencial (mm/día)

Kc = Coeficiente de cultivo (adimensional)

4.3.1.5. Selección del gotero

El gotero se seleccionó considerando el caudal nominal de acuerdo con las características del suelo y las necesidades hídricas del cultivo, presión de operación, así como criterios disponibilidad en el mercado, costo y calidad del material.

4.3.1.6. Porcentaje de área a regar (PAR)

El Porcentaje de área a regar se determinó por medio de la ecuación (9), descrita por Valverde Conejo (2022). Teniendo en cuenta que con riego por goteo no se humedece totalmente el 100% del área, un valor aceptable para obtener buenos resultados está en un PAR de 35%-70%.

$$PAR = \frac{A_H}{A_T} * 100 \quad (9)$$

Donde,

PAR = Porcentaje de área a regar (%)

A_H : Área húmeda (m²)

A_T : Área total (m²)

4.3.1.7. Lámina neta para riego por goteo

La lámina neta se obtuvo haciendo uso de la ecuación (10), la cual considera el porcentaje de área a regar (PAR), dado que el sistema de riego por goteo el agua se aplica únicamente en la zona radicular del cultivo.

$$Ln = \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) * Da * Prof * Ag * PAR \quad (10)$$

Donde,

Ln = Lámina neta (mm)

CC = Capacidad de campo (%)

PMP = Punto de marchitez permanente (%)

Da = Densidad aparente (g/cm³)

Prof = Profundidad radicular (mm)

Ag = Agotamiento (decimal)

PAR = Porcentaje de área a regar (decimal)

4.3.1.8. Frecuencia de riego

La frecuencia de riego se obtuvo mediante la ecuación (11). Se redondea al valor inferior más cercano. Sin embargo, dado que el sistema se diseñará automatizado, los inicios de riego no necesariamente se ajustarán al cálculo realizado.

$$Fr = \frac{Ln}{Etc} \quad (11)$$

Donde,

Fr = Frecuencia de riego (días)

Ln = Lámina neta (mm)

Etc = Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

4.3.1.9. Lámina bruta

Por medio de la ecuación (12) se determinó la lámina bruta de riego. Tomando en consideración la eficiencia de aplicación y la lámina neta.

$$Lb = \frac{Ln}{Ef} \quad (12)$$

Donde,

Lb = Lámina bruta (mm)

Ln = Lámina neta (mm)

Ef = Eficiencia de aplicación (%)

4.3.1.10. Intensidad de aplicación

Para determinar la intensidad de aplicación se utilizó la ecuación (13). La cual es necesaria para determinar el tiempo de riego.

$$Ia = \frac{q_{got}}{E_{got} * E_{líneas}} \quad (13)$$

Donde,

Ia: Intensidad de aplicación (mm/h)

q_{got} : Caudal del gotero (L/h)

E_{got} : Espaciamiento entre goteros (m)

$E_{líneas}$: Espaciamiento entre líneas de goteo (m)

El tiempo de riego se determinó mediante la ecuación (14).

$$Tr = \frac{Lb}{Ia} \quad (14)$$

Donde,

Tr = Tiempo de riego (h)

Lb = Lámina bruta (mm)

Ia: Intensidad de aplicación (mm/h)

4.3.1.11. Número máximo de operaciones por área

Para diseñar los bloques de riego es necesario calcular el número máximo de divisiones por área. Se utilizó la ecuación (15).

$$N = \frac{(Fr * H_{ef})}{Tr} \quad (15)$$

Donde,

N = Número máximo de operaciones por área para regar

Fr = Frecuencia de riego (días)

H_{ef} = Horas efectivas para regar diarias (h)

Tr = Tiempo de riego (h)

4.3.2. Diseño hidráulico del lateral

4.3.2.1. Número de goteros

La cantidad de goteros en todo el lateral se determinó en función de la longitud de los laterales, es decir, de la longitud de las eras. Se calcula mediante la ecuación (16).

$$N_g = \frac{L_{lat}}{E_g} \quad (16)$$

Donde,

N_g = Número de goteros

L_{lat} = Longitud del lateral (m)

E_g = Espaciamiento entre goteros (m)

4.3.2.2. Caudal

Tomando en cuenta el caudal del gotero seleccionado se determinó el caudal del lateral mediante la ecuación (17).

$$Q_{lat} = q_{got} * N_{got} \quad (17)$$

Donde,

Q_{lat} = Caudal del lateral (m³/s)

q_{got} = Caudal del gotero (m³/s)

N_{got} = Número de goteros

4.3.2.3. Número de laterales

Por medio de la ecuación (18) se obtuvo el número de laterales necesarios por bloque de riego para el diseño.

$$N_{lat} = \frac{L_m}{E_{lat}} \quad (18)$$

Donde,

N_{lat} = Número de laterales

L_m = Longitud del múltiple (m)

E_{lat} = Espaciamiento entre laterales (m)

4.3.2.4. Presión a la entrada del lateral

Se determinó la presión a la entrada de la tubería lateral con la ecuación (19).

$$P_e = P_o + 0.77 * Hf + 0.23 * \Delta z \quad (19)$$

Donde,

P_e = Presión a la entrada del lateral (mca)

P_o = Presión de operación (mca)

Hf = Pérdidas por fricción (mca)

Δz = Pendiente (m/m)

En este caso, no se obtienen las pérdidas por fricción mediante la ecuación de Hazen-Williams, ya que el coeficiente de rugosidad no es conocido para el material del lateral. Por esta razón, se consideró como presión de entrada la presión máxima de operación ($P_{\text{máx}}$).

4.3.3. Diseño hidráulico del múltiple

4.3.3.1. Longitud

La longitud del múltiple se obtuvo mediante la ecuación (20).

$$L_m = (N_{lat} - 1) * E_{lat} \quad (20)$$

Donde,

L_m = Longitud del múltiple (m)

N_{lat} = Número de laterales

E_{lat} = Espaciamiento entre laterales

4.3.3.2. Pérdidas admisibles

Se calcularon las pérdidas admisibles en el múltiple, tomando en cuenta las pérdidas totales y las pérdidas en el lateral calculadas anteriormente, ecuación (21).

$$P_{adm} = 0.2 * P_o \pm \Delta_{zlat} \pm \Delta_{zm} - Hf_{lat} \quad (21)$$

Donde,

P_{adm} = Pérdidas admisibles en el múltiple (mca)

P_o = Presión de operación del gotero (mca)

Hf_{lat} = Pérdidas en el lateral (mca)

Δ_{zlat} = Diferencia de altura en el lateral (m)

Δ_{zm} = Diferencia de altura en el múltiple (m)

4.3.3.3. Diámetro teórico

Mediante la ecuación (22) se determinó el diámetro teórico que debe tener la tubería múltiple. Dicha ecuación se deriva de la ecuación de Hazen-Williams. Además, este valor se usó como referencia para seleccionar el diámetro comercial que mejor se ajuste a las necesidades del diseño.

$$D = \left(\frac{1.131 \times 10^9 * \left(\frac{Q_{lat}}{C} \right)^{1.852} * L * f}{P_{adm}} \right)^{0.205254} \quad (22)$$

Donde,

D = Diámetro del múltiple (mm)

Q_{lat} = Caudal del múltiple (m^3/s)

P_{adm} = Pérdidas admitidas en el múltiple (mca)

C = Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)

L = Longitud del múltiple (m)

f = Coeficiente de fricción (adimensional)

4.3.3.4. Pérdidas por fricción

Para determinar las pérdidas por fricción en la tubería del múltiple y principal se utilizó la ecuación (23) de Hazen-Williams.

$$Hf = 1.131 \times 10^9 * \left(\frac{Q_{lat}}{C} \right)^{1.852} * D^{-4.872} * L_{lat} * f \quad (23)$$

Donde,

Hf = Pérdidas por fricción (mca)

Q_{lat} = Caudal del múltiple/ principal (m^3/s)

C = Coeficiente de Hazen- Williams (adimensional)

D = Diámetro del múltiple/principal (mm)

L_{lat} = Longitud del múltiple/principal (m)

f = Coeficiente de fricción (adimensional)

4.3.3.5. Caudal

El caudal del múltiple se obtuvo por medio de la ecuación (24).

$$Q_m = N_{lat} * Q_{lat} \quad (24)$$

Donde,

Q_m = Caudal del múltiple (m³/s)

N_{lat} = Número de laterales

Q_{lat} = Caudal del lateral (m³/s)

4.3.3.6. Presión en las válvulas

La presión de las válvulas se determinó mediante la ecuación (25).

$$P_v = P_e + 0.77 * Hf_m + 0.23 * \Delta_{zm} \quad (25)$$

Donde,

P_v = Presión en la válvula (mca)

P_e = Presión de entrada del lateral (mca)

Hf_m = Pérdidas admisibles en el múltiple (mca)

Δ_{zm} = Diferencia de altura en la tubería múltiple (m)

4.3.3.7. Presión distal

Se obtuvo la presión distal en el múltiple con la ecuación (26).

$$P_d = P_v - Hf_m - Hf_{lat} \pm \Delta_{zm} + \Delta_{zlat} \quad (26)$$

Donde,

P_d = Presión distal (mca)

P_v = Presión en la válvula (mca)

Hf_m = Pérdidas por fricción el múltiple (mca)

Hf_{lat} = Pérdidas por fricción en el lateral (mca)

Δ_{zm} = Diferencia de altura en la tubería múltiple (m)

Δ_{zlat} = Diferencia de altura en la tubería lateral (m)

4.3.4. Diseño hidráulico de la principal

4.3.4.1. Caudal de la tubería principal

El caudal de la tubería principal corresponde al de todo el sistema, al regar simultáneamente, sería el mismo caudal obtenido para el múltiple.

4.3.4.2. Diámetro teórico de la principal

El diámetro de la principal se obtuvo mediante la ecuación (27). Se tomó una velocidad admisible de 1,5 m/s según el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (2017). Con este valor de diámetro teórico se seleccionó el diámetro comercial de la tubería principal, tomando el valor superior más cercano al obtenido.

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q_p}{\pi * v}} * 1000 \quad (27)$$

Donde,

D = Diámetro de la tubería principal (mm)

Q_p = Caudal en la principal (m³/s)

v = velocidad (m/s)

Con el diámetro comercial seleccionado se recalculó la velocidad del flujo para tener certeza de que se encontrará dentro del rango permitido establecido.

4.3.4.3. Carga dinámica

La carga dinámica total se calculó haciendo uso de la ecuación (28).

$$CD = P_v + 0.05 * (P_v + Hf_p) + Hf_p \pm \Delta_{zP} \quad (28)$$

Donde,

CD = Carga dinámica (mca)

P_v = Presión en la válvula (mca)

Hf_p = Pérdidas por fricción en la tubería principal

Δ_{zP} = Diferencia de altura en la tubería principal (m)

4.3.4.4. Potencia de la bomba

La potencia de la bomba que se requiere para abastecer el sistema se determinó mediante la ecuación (29).

$$P_b = \frac{Q_s * CD}{270 * Ef} \quad (29)$$

Donde,

P_b = Potencia de la bomba (hp)

CD = Carga dinámica (mca)

Q_s = Caudal del sistema (m³/h)

Ef = Eficiencia de la bomba (%)

4.3. Selección del componente de fertilización

La selección de los componentes del sistema de fertirrigación se realizó con base en criterios técnicos que garantizan su operatividad y eficiencia. Para el equipo de inyección se consideraron aspectos como la disponibilidad comercial, los rangos de presión mínima y máxima de operación, el caudal de succión, así como las características constructivas en cuanto a materiales y dimensiones. Asimismo, se verificó la diferencia de presión entre la entrada y la salida del inyector, asegurando que cumpliera con el requisito mínimo equivalente al 20% de la presión de entrada en cada sistema de riego.

En cuanto al tanque de almacenamiento, este se dimensionó de acuerdo con la demanda habitual de fertilizantes en cultivos hortícolas y en función del área cubierta. Finalmente, el plan de fertirriego se estructuró considerando las fases fenológicas de las hortalizas en cada invernadero, identificando los nutrientes esenciales en cada etapa y la duración correspondiente.

4.4. Automatización del sistema de riego

La automatización de cada sistema se estableció tomando en cuenta la extensión, disponibilidad de corriente eléctrica y la inversión inicial. Posteriormente, se identificó todos los componentes de automatización como programador, sensores, válvulas y módulo de comunicación involucrados y siguiendo el orden de activación se explicó el funcionamiento

de cada uno desde la fuente de agua hasta los emisores para optimizar el control del sistema. El consumo de los componentes se determinó mediante la ecuación (30). Por otra parte, la potencia se calculó mediante la ecuación (31).

$$C = \frac{P}{1000} * t \quad (30)$$

Donde,

C = Consumo diario/mensual (kW)

P = Potencia (W)

t = horas de uso (h)

$$P = V * I \quad (31)$$

Donde,

P = Potencia (W)

V = Voltaje (V)

I = Corriente (A)

4.5. Análisis económico (Costo/Beneficio)

Se utilizó la formula general del análisis costo-beneficio, expresada como:

$$RCB = \frac{B_{total}}{C_{total}} \quad (32)$$

Donde,

B_{total} : Beneficios acumulados

C_{total} : Costo total

4.6. Análisis ambiental y social

Para determinar el impacto ambiental del proyecto se utilizó como referencia el Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental (RECSA), Acuerdo Gubernativo 137-2016 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), que establece los procedimientos de evaluación según la categoría del proyecto. En este caso, el sistema de riego diseñado por goteo en invernaderos y zona de campo abierto corresponde a

la Categoría C, para la cual se emplea la Ficha Ambiental acompañada de un Plan de Gestión Ambiental (PGA).

Al aplicar este instrumento se valoran parámetros como: uso del agua, afectación de suelo, manejo de residuos plásticos, consumo energético y posibles riesgos para la salud humana. A cada uno de estos se le asigna una calificación relativa y posteriormente un criterio de ponderación, con el fin de determinar la viabilidad ambiental del proyecto.

Por otra parte, para el análisis social se evaluaron los riesgos y beneficios asociados al proyecto de riego, en pro del bienestar de la comunidad académica y agrícola vinculada a la ENCA. Entre los aspectos positivos se consideró la generación de oportunidades de capacitación y empleo temporal, particularmente relevantes en un área rural donde gran parte de los habitantes dependen de la agricultura como principal medio de subsistencia.

Asimismo, se analizó el Índice de Desarrollo Humano Municipal (IDH-M) publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2022), con el fin de correlacionar las condiciones sociales del municipio de Villa Nueva con la implementación del proyecto. Este indicador permitió contextualizar los posibles efectos sociales del sistema de riego, evidenciando que el acceso a tecnologías agrícolas sostenibles puede contribuir a mejorar el bienestar y la seguridad alimentaria de la población local.

Cabe destacar que el análisis social se vinculó al análisis ambiental y económico mediante la Matriz de Arboleda (Arboleda, 2005), lo que permitió una valoración integral de los impactos, considerando la interacción entre factores físicos, bióticos y sociales.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los cinco diseños de sistemas de riego por goteo y fertirriego se ven involucrados cuatro invernaderos y una zona de campo abierto del área abarcada por el Proyecto MASHAV en la Escuela Nacional Central de Agricultura (ENCA), Finca Bárcena, Villanueva, Guatemala. Cabe destacar que tanto los invernaderos como la zona de campo abierto tienen como fuente de agua un pozo para abastecer los sistemas. (Figura 2)

5.1.Reconocimiento de campo y análisis topográfico

El invernadero 1, destinado al cultivo de pepino, posee la mayor superficie (388 m²), mientras que los invernaderos 2 y 3, dedicados al cultivo de chile pimiento, cuentan con áreas de 122 m² cada uno. El invernadero 4, donde se cultiva tomate, tiene un área de 243.41 m², y finalmente, el campo abierto ocupa 225 m² y en este se cultivan diversas hortalizas como apio, lechuga, coliflor, cebolla y repollo.

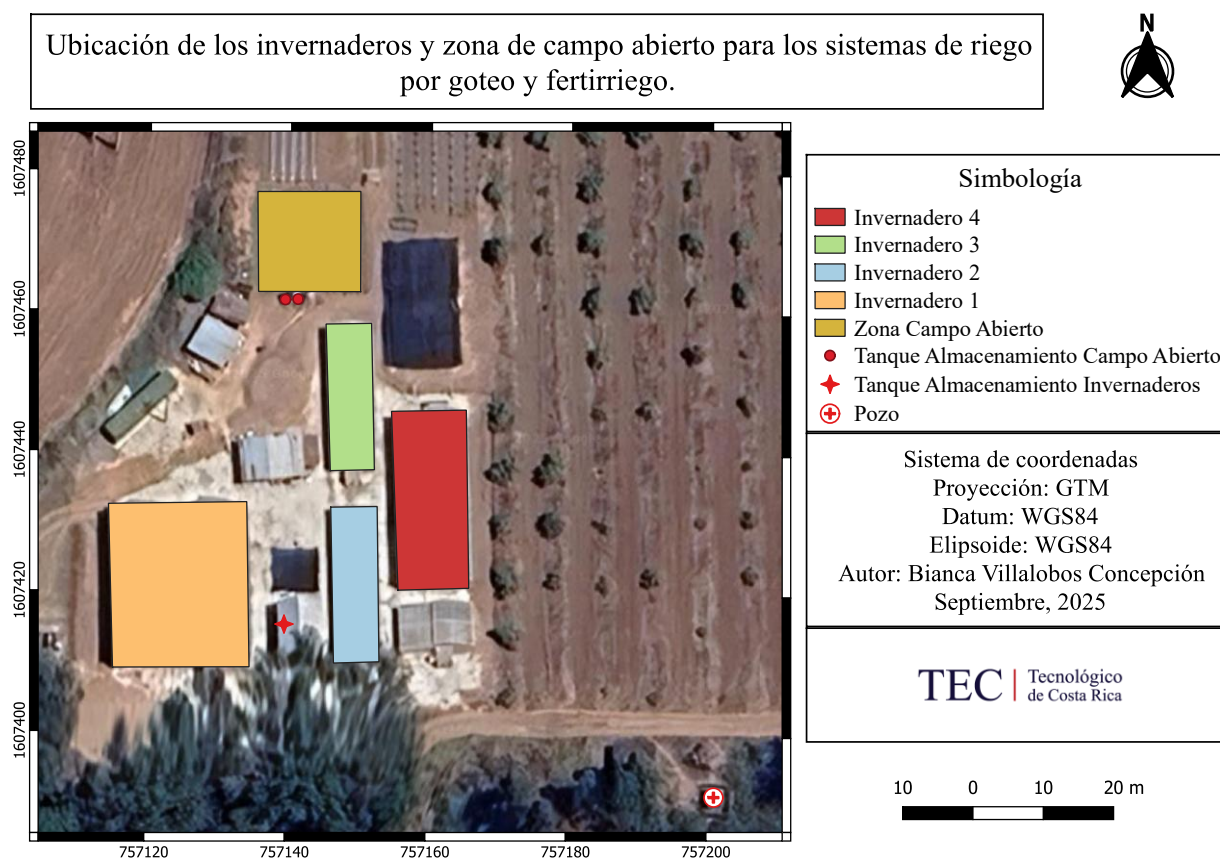
En cuanto a la altimetría del terreno, las cotas varían entre 1.429 y 1.435 m.s.n.m, siendo la zona de campo abierto la zona más baja (1.429 m.s.n.m) y el invernadero 3 la de mayor elevación (1.435 m.s.n.m). Estas cotas se tomaron con base al centro de cada área de riego y son relevantes para realizar el análisis hidráulico, puesto que este determina la carga estática disponible entre el pozo (1.432 m.s.n.m) y cada una de las zonas de riego. (Cuadro 6)

Cuadro 6. Especificaciones generales de las zonas de riego.

Zona	Cultivo	Dimensiones (m)	Área total (m²)	Cota (m.s.n.m)
Invernadero 1	Pepino	20,0 × 19,4	388	1.433
Invernadero 2	Chile pimiento	20,0 × 6,10	122	1.431
Invernadero 3	Chile pimiento	20,0 × 6,10	122	1.435
Invernadero 4	Tomate	24,10 × 10,10	243.41	1.434
Campo Abierto	Apio, lechuga, coliflor, cebolla y repollo	15,0 × 15,0	255	1.429
Pozo	-	-	-	1.432

Además, en la Figura 2 se muestra la ubicación de los tanques de almacenamiento correspondientes a la zona de campo abierto, así como el tanque destinado al abastecimiento de los cuatro invernaderos.

Figura 2. Imagen satelital del área Proyecto MASHAV.



Fuente. Elaboración propia.

5.2.Determinación del requerimiento hídrico

5.2.1. Textura

De acuerdo con el Ingeniero Félix Martínez el método utilizado para determinar la textura del suelo es mediante Bouyoucos (Martínez, 2025). Los porcentajes de partículas se determinaron mediante las ecuaciones (1)(2)(3) y (4) descritas antes en la metodología.

El área del Proyecto MASHAV se encuentra dentro de una zona dedicada a cultivos extensivos. Tanto para los invernaderos como para la zona de campo abierto se obtiene una textura Franco Arenosa, caracterizada por tener un contenido de arena superior al 50% y una mezcla equilibrada de limos y arcillas. Esto le proporciona condiciones favorables como una adecuada estructura, buen drenaje y fertilidad alta. Los resultados específicos de la

composición granulométrica fueron: 12,46% de arcilla, 10,38% de limo y 77,16% de arena. (Véase Anexo 1)

5.2.2. Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)

Para el área de cultivos extensivos se obtuvo el porcentaje de capacidad de campo y punto de marchitez permanente por medio de la ecuación (5) descrita en metodología. El valor obtenido para CC es de 30,24% y para PMP se tiene un valor de 18,95%. El porcentaje de agua útil es de 11,29%. (Véase Anexo 1) Estos resultados son más altos de lo que se indica en la teoría (Cuadro 2).

5.2.3. Densidad aparente

El resultado obtenido de densidad aparente para el área de los invernaderos y la zona de campo abierto es de 1,00 g/cc. Este dato puede parecer muy bajo en comparación con los rangos teóricos establecidos para suelos con textura Franco Arenosa, sin embargo, este valor se atribuye a suelos con alto contenido de materia orgánica, según afirma Guardia et al. (2015) en el Cuadro 3.

Al tener mayor contenido de materia orgánica, aumenta la capacidad de retención de agua en los suelos.

5.2.4. Evapotranspiración potencial (Eto) y de cultivo (Etc)

De acuerdo con los valores de precipitación proporcionados por el software CROPWAT de la FAO, se estableció una evapotranspiración potencial (Eto) para los 5 diseños de 4,59 mm/día, correspondiente al mes de abril. Según los datos climáticos, este se considera el mes con un valor más elevado de Eto en el año para la estación de Ciudad de Guatemala, puesto que es la estación más cercana al lugar de estudio. Además, se utiliza este valor como referencia para asegurar que el sistema esté dimensionado para cubrir las necesidades hídricas del cultivo en las condiciones más demandantes. (Figura 3)

La evapotranspiración de cultivo (Etc) se obtuvo de acuerdo con la ecuación (8) descrita en la metodología. La Etc obtenida fue 4,59 mm/día, utilizando un coeficiente de cultivo de 1 para pepino. Para los cultivos de chile pimiento se obtuvo una Etc de 4,82

mm/día, con un coeficiente de cultivo de 1,05. Para el cultivo de tomate, se obtuvo una Etc de 5,28 mm/día con un coeficiente de cultivo de 1,15. Finalmente, una Etc de 4,82 mm/día para la zona de campo abierto, en este caso se utiliza el coeficiente de cultivo del repollo (1,05) puesto que de la mezcla de hortalizas que se siembra en el área es la que tiene mayor demanda (cultivo crítico). Estos coeficientes se pueden observar en el Cuadro 5.

Figura 3. Valores de precipitación de la estación Ciudad de Guatemala.

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind m/s	Sun hours	Rad MJ/m²/day	ETo mm/day
January	11.6	23.6	100	5.9	8.4	18.6	2.34
February	11.9	25.0	100	5.4	8.9	20.8	2.83
March	13.2	26.5	86	5.1	8.7	22.2	4.10
April	14.4	27.4	83	4.7	9.0	23.3	4.59
May	15.3	26.9	96	3.9	9.8	24.4	4.05
June	15.5	24.5	100	3.5	8.6	22.4	3.38
July	15.2	24.4	100	4.4	8.1	21.6	3.09
August	15.1	24.8	100	4.0	8.1	21.8	3.22
September	15.2	24.3	100	3.2	6.9	19.5	2.99
October	14.6	23.5	100	4.3	7.3	18.9	2.62
November	12.9	22.8	100	5.6	8.1	18.5	2.28
December	12.0	23.1	100	5.8	8.8	18.5	2.25
Average	13.9	24.7	97	4.6	8.4	20.9	3.15

Fuente. Elaboración propia con datos climáticos de CLIMWAT 2.0 procesados en CROPWAT 8.0 (FAO, 2025).

5.2.5. Selección del gotero

Se seleccionó una línea de riego con gotero integral TYPHOON PLUS, caracterizada por un caudal de 1 L/h, con un espaciamiento de 0,3 m entre emisores y un rango de presión de operación de 0,6 a 3,0 bar. Este gotero es ideal para cultivos de hortalizas y riego en múltiples temporadas. Tiene un único diseño de filtro que toma el agua desde el centro del tubo, lo que evita la entrada de sedimentos en el gotero y prolongar la vida útil del sistema. Además, su construcción por inyección garantiza goteros uniformes y para su correcta operación, se recomienda el uso de un filtro de malla de 80 Mesh. Las especificaciones técnicas del gotero se encuentran en el Anexo 10 y 11.

5.2.6. Porcentaje de área a regar (PAR)

De acuerdo con la ecuación (9), se determinó el porcentaje de área a regar (PAR) en cada uno de los sistemas a evaluar. En el caso de los invernaderos, se consideró que los cultivos están sembrados en camas de 1,10 m de ancho, cada una con dos laterales de riego y pasillos de 0,50 m de ancho, destinados al desplazamiento y a las labores de manejo. Por otra parte, para la zona de campo abierto, se consideró un marco de siembra conformado por camas de 1,20 m de ancho y pasillos de 0,6 m de ancho.

Se obtiene un PAR de 69% para cada invernadero y un PAR de 67% para la zona de campo abierto. Esta diferencia se asocia principalmente a la variación en las dimensiones de las camas y pasillos, lo que influye directamente en la proporción de área efectivamente cubierta por el riego frente al área total disponible. (Cuadro 7)

Cuadro 7. Valor de porcentaje de área a regar para cada diseño.

Zona	Área húmeda m²	Área total m²	PAR (%)
Invernadero 1	266,8	388	69
Invernadero 2	83,9	122	69
Invernadero 3	83,9	122	69
Invernadero 4	167,3	243,41	69
Campo abierto	150	225	67

5.2.7. Demanda hídrica

Las láminas neta y bruta se determinaron por medio de las ecuaciones (10) y (12), respectivamente. La frecuencia de riego mediante la ecuación (11), el tiempo de aplicación de riego por medio de la ecuación (14) y el número máximo de bloques en que se puede dividir el área con la ecuación (15). Los valores obtenidos permiten establecer los requerimientos hídricos asociados al suelo y cultivo, los cuales se detallan en el Cuadro 8.

El invernadero 1 presentó la lámina neta más alta (27,17 mm) debido a que el cultivo establecido en este posee la mayor profundidad de raíces en comparación con los cultivos presentes en los demás invernaderos. Por otra parte, los invernaderos 2 y 3 registraron valores similares (11,64 mm), lo cual responde a que ambos poseen la misma área y están destinados

al establecimiento de hortalizas de fruto (chile pimiento). El área de campo abierto mostró un valor intermedio (16,94 mm) atribuida a la siembra de cultivos hortícolas de raíces poco profundas y ciclos cortos.

En cuanto a la lámina bruta, los resultados reflejan la cantidad de agua que debe aplicarse realmente para compensar pérdidas por evaporación, percolación profunda y distribución no uniforme. El invernadero 1 requiere 30,19 mm, mientras que el campo abierto demanda un valor intermedio de 18,82 mm. En contraste, los invernaderos 2 y 3 muestran valores significativamente menores (12,94 mm), correspondientes al chile pimiento, cultivo con menor demanda de agua.

La frecuencia de riego se estableció de manera diaria, por lo que fue necesario recalcular los valores de lámina neta y lámina bruta. Los valores recalculados presentan una reducción significativa respecto a los estimados inicialmente, ya que al aplicar el riego con mayor frecuencia se requiere una lámina menor para mantener la humedad dentro del rango óptimo de disponibilidad para el cultivo. El invernadero 1 (pepino) presenta la lámina bruta recalculada más baja (4,59 mm), mientras que el invernadero 4 (tomate) presenta la mayor lámina bruta recalculada (5,87 mm) en comparación con las demás zonas. En campo abierto se obtiene un valor de 5,36 mm, calculado con base en el repollo, puesto que este cultivo presenta la mayor demanda hídrica dentro de la mezcla de hortalizas cultivadas en el área.

El tiempo de riego varía entre 0,56 y 0,65 horas (33,6 a 39 minutos), dependiendo del requerimiento hídrico y del caudal disponible, mientras que el número máximo de operaciones por área, lo que indica la capacidad de dividir la superficie total en sectores de riego, permitiendo optimizar el manejo del sistema y la programación del riego.

Cuadro 8. Requerimientos hídricos de invernaderos y zona de campo abierto.

Descripción	Invernadero 1	Invernadero 2	Invernadero 3	Invernadero 4	Campo abierto
Lamina neta (mm)	27,17	11,64	11,64	21,73	16,94
Lamina bruta (mm)	30,19	12,94	12,94	24,15	18,82
Frecuencia de riego redondeada (días)	1	1	1	1	1
Lamina neta recalculada(mm)	4,59	4,82	4,82	5,28	4,82
Lamina bruta recalculada (mm)	5,10	5,36	5,36	5,87	5,36
Tiempo de riego (h)	0,56	0,59	0,59	0,65	0,59
Número máximo de operaciones por área	2	2	2	2	2

5.3.Diseño hidráulico

Se determinó que la diferencia de altura entre la fuente de abastecimiento (pozo) y los distintos invernaderos es limitada: se tiene un metro para los diseños 1 y 2, 3 metros en el diseño 3; 2 metros en el diseño 4 y de 3 metros para el diseño 5. (Cuadro 9) Estas diferencias generan presiones estáticas entre 0,1 a 0,3 bar, valores muy por debajo de la presión mínima requerida por los emisores seleccionados (alrededor de 0,6 bar).

Estas condiciones sugieren que los sistemas necesitan la instalación de una bomba que permita dirigir el agua hasta los tanques de almacenamiento y posteriormente, carguen las tuberías de distribución con la presión adecuada. Si bien es cierto, estas condiciones también podrían permitir la circulación de agua por gravedad; sin embargo, no garantiza el caudal nominal ni la uniformidad de riego esperada. Esto compromete la aplicación efectiva de la lámina como la precisión de la eficiencia del fertirriego.

Cuadro 9. Diferencia de altura entre fuente de abastecimiento y zonas de riego.

Zona	Diferencia de altura (m.s.n.m)
Diseño 1 (Invernadero 1)	1
Diseño 2 (Invernadero 2)	1
Diseño 3 (Invernadero 3)	3
Diseño 4 (Invernadero 4)	2
Diseño 5 (Campo Abierto)	3

5.3.1. Laterales

De acuerdo con las ecuaciones descritas en metodología, se determinó el número de goteros a lo largo de cada lateral con la ecuación (16); la longitud de cada lateral (longitud de eras); el caudal a conducir en cada lateral por medio de la ecuación (17); el número de laterales por bloque con la ecuación (18); las pérdidas admisibles mediante la ecuación (21), y la presión a la entrada del lateral (presión máxima de lavado). Cabe destacar que, se seleccionó línea de goteo con un diámetro de tubería de 16 mm para los laterales del cada diseño. El diseño hidráulico correspondiente a los laterales de cada bloque por invernadero y zona de campo abierto se detalla en el Cuadro 10.

Los diseños se ajustaron a la forma de siembra establecida en cada área de riego, con el propósito de optimizar la distribución del recurso hídrico según las necesidades específicas de las hortalizas. En los cuatro invernaderos y en la zona de “campo abierto” se dispusieron tres laterales por era, con una separación entre goteros de 0,3 m, distancia que coincide con el espaciamiento usual de siembra en cultivos hortícolas.

La longitud de los laterales se definió en función de las dimensiones físicas de cada área de riego, con el objetivo de garantizar una cobertura uniforme y una distribución eficiente del agua a lo largo de cada era. En este caso, el área de menor extensión corresponde a campo abierto, donde los laterales presentan una longitud de 15 m. Por otra parte, el número de goteros por lateral varía entre 50 goteros (campo abierto) y 80 (invernadero 4). En los invernaderos 1, 2 y 3 se tiene un caudal en cada lateral de 0.07 m³/h, mientras que en el invernadero 4 dicho caudal aumentó a 0,08 m³/h. En el caso de la zona de campo abierto, se obtuvo el menor caudal por lateral, con un valor de 0,05 m³/h.

En cuanto a las pérdidas por fricción, los valores obtenidos son despreciables, representando una fracción mínima respecto a las pérdidas admisibles establecidas (2,86 mca para cada área). Esto indica un dimensionamiento adecuado de la tubería y una presión de entrada constante de 14,28 mca (presión máxima de lavado), asegurando un funcionamiento homogéneo del sistema.

Cuadro 10. Parámetros hidráulicos de los laterales.

Descripción	Invernadero 1	Invernadero 2	Invernadero 3	Invernadero 4	Campo Abierto
Longitud de cada lateral (m)	20	20	20	24	15
Número de goteros por lateral	67	67	67	80	50
Caudal de cada lateral (m ³ /h)	0,07	0,07	0,07	0,08	0,05
Número de laterales por bloque	13	13	13	15	8
Pérdidas admisibles lateral (mca)	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86
Presión de entrada lateral (mca)	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28

5.3.2. Múltiple

Se determinó la longitud de la tubería múltiple utilizando la ecuación (20); las pérdidas admisibles por medio de la ecuación (21); pérdidas admisibles ocasionadas por fricción por medio de la ecuación (23). Por otra parte, el diámetro teórico se obtuvo a partir de la ecuación (22); el caudal del múltiple con la ecuación (24); la presión en las válvulas y la presión distal haciendo uso de las ecuaciones (25) y (26) respectivamente. La caracterización hidráulica del múltiple se muestra en el Cuadro 11.

En los invernaderos 1, 2 y 3 se obtuvo un caudal en el múltiple de 0,83 m³/h, correspondiente a 13 laterales por bloque. En el invernadero 4, el caudal aumentó a 1,20 m³/h debido a que presenta el mayor número de laterales, mientras que para campo abierto se tiene el menor caudal (0,42 m³/h).

Con respecto al diámetro teórico calculado, se obtuvo un valor inferior a 12 mm en todas las áreas de riego; sin embargo, se seleccionó una tubería de PVC con un diámetro de 1 ¼" (31,00 mm). Con el fin de facilitar la instalación del sistema, se seleccionó un diámetro mayor, lo cual permite la inserción adecuada de los acoples de manguera y evita posibles fugas de agua. Las pérdidas admisibles son de 2,86 mca, y las ocasionadas por fricción son

inferiores a 0,05 mca en todas las áreas, lo cual confirma una correcta selección del diámetro de la tubería al mantenerse dentro del rango permitido.

La presión en las válvulas es de 16,48 mca en todos los casos, lo cual es coherente con el rango de presión de operación del sistema (6,12 a 30,59 mca). Por otra parte, la presión distal (presión en el extremo final del múltiple) presentó valores ligeramente menores, lo cual es esperado y atribuible a las pérdidas generadas a lo largo de la tubería.

Cuadro 11. Parámetros hidráulicos de la tubería múltiple.

Descripción	Invernadero 1	Invernadero 2	Invernadero 3	Invernadero 4	Campo Abierto
Longitud del múltiple (m)	9,70	3,05	3,05	5,05	7,50
Pérdidas admisibles en el múltiple (mca)	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86
Caudal del múltiple (m ³ /h)	0,83	0,83	0,83	1,20	0,42
Diámetro teórico (mm)	10,56	8,33	8,33	10,59	7,76
Diámetro comercial (mm)	31	31	31	31	31
Pérdidas por fricción (mca)	0,04	0,01	0,01	0,05	0,01
Presión en la válvula (mca)	16,48	16,48	16,48	16,48	16,48
Presión distal (mca)	16,43	16,46	16,46	16,43	16,47

5.3.3. Principal

Según las ecuaciones descritas anteriormente en la metodología, se determinó el caudal para la tubería principal (caudal del múltiple) por medio de la ecuación (24); el diámetro teórico necesario utilizando la ecuación (27). Las pérdidas admisibles y las provocadas por fricción con las ecuaciones (21) y (23). Finalmente, la carga dinámica mediante la ecuación (28) y la potencia necesaria de la bomba mediante la ecuación (29). El Cuadro 12 muestra los parámetros hidráulicos de la tubería principal.

El caudal de la tubería principal coincide con el de la tubería múltiple, con un valor de 0,83 m³/h para los invernaderos 1, 2 y 3. En el invernadero 4 se obtuvo un caudal de 1,20 m³/h, mientras que en el área de campo abierto fue de 0,42 m³/h.

El diámetro teórico requerido para abastecer cada sistema se determinó considerando una velocidad máxima de flujo de 1,5 m/s, con el fin de evitar presiones excesivas y prolongar la vida útil de la tubería. Los resultados obtenidos indican diámetros teóricos de 14,02 mm

para los invernaderos 1, 2 y 3, y de 16,82 mm para el invernadero 4. No obstante, se seleccionó una tubería de PVC de 1 ¼" (31,00 mm) para todos los diseños, al igual que en el múltiple, con el objetivo de estandarizar materiales y facilitar la instalación del sistema.

A partir del diámetro comercial seleccionado, se calcularon las velocidades reales de flujo, obteniéndose valores de 0,31 m/s para los invernaderos 1, 2 y 3; 0,44 m/s para el invernadero 4, y 0,15 m/s en campo abierto. Estos valores confirman que el diseño hidráulico de la tubería mantiene velocidades dentro del rango recomendado, minimizando pérdidas de energía y evitando golpes de ariete ocasionados por cierres repentinos de válvulas o variaciones súbitas de caudal.

Las pérdidas por fricción resultaron mayores en el invernadero 4 (0,25 mca) debido al mayor caudal conducido, mientras que en los demás se mantuvieron por debajo de dicho valor. Todas las pérdidas se encuentran dentro del rango admisible, lo que evidencia un correcto dimensionamiento de la tubería principal.

Respecto a la carga dinámica, esta dio como resultado 17,44 mca para los invernaderos 1, 2 y 3, mientras que para el invernadero 4 y el campo abierto se estimaron 17,57 mca y 17,34 mca, respectivamente. Con base a estos valores, la potencia necesaria de la bomba fue de 0,060 hp para los primeros tres invernaderos, 0,087 hp para el invernadero 4 y 0,030 hp para campo abierto. La selección del equipo se realizó en función de las demandas hidráulicas calculadas. Para una operación por bloques se propone una bomba centrífuga de 0,5 hp, con una curva que garantice la mayor demanda (invernadero 4) de 1,2 m³/h a aproximadamente 18 mca. La bomba se selecciona de acuerdo con la disponibilidad del mercado, margen operativo frente a pequeñas variaciones del sistema y su eficiencia energética en el rango de trabajo previsto. Las especificaciones técnicas de la bomba se detallan en el Anexo 12.

Finalmente, se elaboró un plano a escala donde se representa la disposición general de cada sistema de riego, incluyendo la tubería principal, múltiples y laterales de riego para cada invernadero y campo abierto. Los diseños detallados se presentan en los Anexos 16, 17, 18, 19 y 20.

Cuadro 12. Parámetros hidráulicos de la tubería principal.

Descripción	Invernadero 1	Invernadero 2	Invernadero 3	Invernadero 4	Campo Abierto
Caudal en la principal (m ³ /h)	0,83	0,83	0,83	1,20	0,42
Diámetro en la principal (mm)	14,02	14,02	14,02	16,82	9,91
Diámetro comercial (mm)	31	31	31	31	31
Presión en la entrada (mca)	14,38	14,38	14,38	14,48	14,31
Pérdidas por fricción (mca)	0,13	0,13	0,13	0,25	0,04
Velocidad recalculada (m/s)	0,31	0,31	0,31	0,44	0,15
Carga dinámica (mca)	17,44	17,44	17,44	17,57	17,34
Potencia calculada de la bomba (hp)	0,060	0,060	0,060	0,087	0,030

5.4.Fertirriego

Para el componente de fertirriego se seleccionó un inyector Venturi Mazzei modelo 584 con conexión de 1/2”, el cual opera de manera eficiente en un rango de caudal de 420 a 1200 L/h (0,42 a 1,20 m³/h). Este modelo fue elegido por su compatibilidad con los caudales manejados en los diferentes sistemas de riego (invernaderos y campo abierto), así como por su capacidad de generar una succión adecuada del fertilizante mediante la diferencia de presión entre la entrada y la salida del inyector. (Véase Anexo 13)

De acuerdo con la tabla de desempeño del fabricante, el modelo 584 opera adecuadamente con presiones de entrada de entre 20 y 30 PSI, presentando un caudal de accionamiento de 4,2 a 5,1 GPM (equivalente a 0,95–1,15 m³/h) y una capacidad de succión de aproximadamente 24-25 GPH (0,09–0,10 m³/h). (Véase Anexo 14)

En los sistemas diseñados, la presión disponible en la línea principal es de 14,31-14,48 mca (alrededor de 20,35-20,59 PSI) y la presión de salida estimada del inyector es de 14–15 PSI, lo cual garantiza una diferencia de presión suficiente para generar el efecto Venturi requerido para la inyección del fertilizante.

5.5.Automatización

La automatización de los distintos sistemas de riego tiene como propósito optimizar el uso del recurso hídrico y de los fertilizantes mediante la programación, monitoreo y control en tiempo real de los distintos componentes del sistema. Esto permite reducir pérdidas por

escorrentía o percolación, mejorar la eficiencia energética y garantizar la aplicación precisa del riego y del fertirriego según las necesidades de cada cultivo.

5.5.1. Componentes esenciales

5.5.1.1. Controlador central

Para el control de la automatización de los sistemas de riego se seleccionó un ESP32 el cual estará ubicado en cada área de riego. Este dispositivo es un microcontrolador, que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, permitiendo la comunicación inalámbrica entre los sensores, actuadores y la interfaz de usuario. Su bajo consumo y su alto rendimiento, lo hace idóneo para sistemas agrícolas que requieran un monitoreo constante y preciso en tiempo real.

A diferencia de controladores comerciales preconfigurados, el ESP32 no posee un software de control o monitoreo integrado, sino que el propio usuario debe cargar la programación deseada utilizando algún entorno de desarrollo, por ejemplo, Arduino IDE, lo que permite tener una alta flexibilidad de programación y personalización. Esta característica permite el desarrollo de sistemas adaptados a las necesidades específicas de cada módulo de riego, facilitando la integración de múltiples sensores (humedad del suelo, presión, caudal, temperatura, entre otros). Además, permite la utilización de actuadores de distintas marcas, sin tener restricciones por compatibilidad.

5.5.1.2. Sensores

Para la medición de humedad del suelo se consideró la profundidad efectiva de las raíces de los cultivos, las cuales oscilan entre 0,3 y 0,7 metros en el caso de hortalizas. Con base a esto, se seleccionó el sensor Capacitivo de Humedad de Suelo V1.2 (HW-101 HW-moisture sensor V1.2), el cual es ideal para monitorear la zona radicular superficial (hasta 0,1 metros). Se instalarán cinco de estos sensores dispuestos en forma de zigzag, distribuidos estratégicamente dentro de los invernaderos y zona de campo abierto para obtener un muestreo representativo de la humedad en el perfil superficial. Adicionalmente, se emplearán dos sensores Vegetronix VH400, que permiten un rango de medición de hasta 0,9 metros, con el propósito de monitorear la humedad en capas más profundas del suelo y complementar la información de los sensores superficiales. Esta combinación permitirá obtener una

caracterización más completa del comportamiento hídrico del sustrato, facilitando la gestión automatizada del riego según las condiciones reales del suelo. En este caso, los sensores de humedad miden de manera continua el contenido de humedad presente en el sustrato. Posteriormente, el sistema compara las lecturas con los umbrales de humedad previamente establecidos. Cuando el contenido de agua cae por debajo del límite mínimo, el sistema activa las electroválvulas para suministrar agua hasta alcanzar el nivel óptimo; de lo contrario el sistema se detiene.

5.5.1.3.Electroválvulas

Para controlar la apertura y cierre del flujo de agua, se seleccionó una electroválvula de $\frac{3}{4}$ " con bobina de 24V AC, modelo Netafim Series 80 2W-200-20 (véase anexo 15), la cual responde a las órdenes del controlador central mediante señales eléctricas generadas a partir de la información de los sensores. La válvula permite operar con presiones 0,7 y 10 bar, lo que garantiza un funcionamiento adecuado dentro del sistema de riego. Además, se incorporó un relé como elemento intermedio entre la electroválvula y el microcontrolador, evitando sobrecargas eléctricas con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo.

5.5.1.4.Software

Se utilizará el microcontrolador ESP32 integrado con la herramienta "Home Assistant", la cual actuará como el sistema central de control. Esta herramienta permite gestionar el riego tanto de forma automática como manual, a través de una interfaz intuitiva accesible desde dispositivos móviles o computadoras, facilitando el monitoreo remoto del sistema.

El módulo ESPHome será el encargado de establecer la comunicación entre los sensores y el ESP32, permitiendo la configuración y lectura de los parámetros en tiempo real. Se recibirán los datos provenientes de los sensores instalados en los distintos invernaderos y campo abierto:

- Sensor de humedad: Envía lecturas continuas las cuales permiten determinar el momento adecuado para activar las electroválvulas, garantizando que el riego se

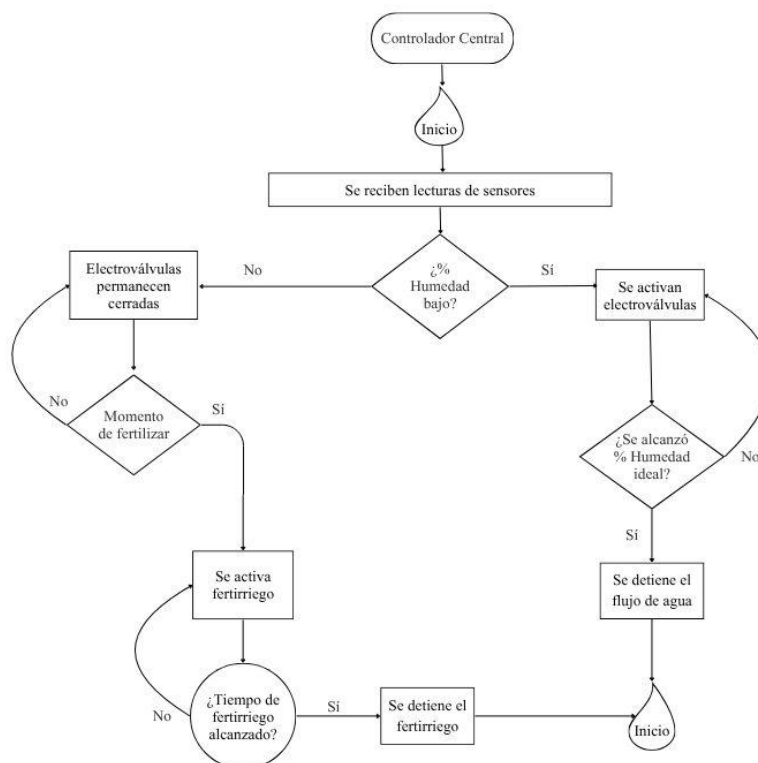
realice únicamente cuando el contenido de agua en el suelo sea menor al umbral definido.

A partir de las lecturas recibidas, el microcontrolador ejecuta las órdenes de riego de acuerdo con las condiciones preestablecidas en el software. En caso de requerirse, el usuario puede intervenir manualmente desde la interfaz de Home Assistant para activar o desactivar el riego, modificar umbrales de humedad o revisar registros históricos de funcionamiento.

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al funcionamiento del sistema automatizado de riego y fertirriego. El proceso inicia en el controlador central, el cual recibe continuamente las lecturas de los sensores de humedad del suelo. A partir de estos datos, el sistema evalúa si el porcentaje de humedad se encuentra por debajo del umbral establecido. Cuando este porcentaje es bajo, el controlador envía la señal de apertura a las electroválvulas, permitiendo el flujo de agua hacia el sistema de riego, este flujo se mantiene hasta que se cumpla el tiempo de riego determinado previamente, alcanzando el valor mínimo de humedad a capacidad de campo. A partir de ese momento, las válvulas se cierran y se detiene el flujo de agua.

Ahora bien, si el porcentaje de humedad no es bajo, las electroválvulas permanecen cerradas. En ese estado, el sistema verifica si es momento de realizar la fertilización. De ser así, se activa la electroválvula del baypass, permitiendo la inyección de fertilizante disuelto en el agua. El fertirriego se mantiene activo hasta alcanzar el tiempo programado de aplicación, una vez finalizado, se detiene y retorna al estado inicial de monitoreo.

Figura 4. Diagrama de flujo del funcionamiento de la automatización.



Fuente. Elaboración propia.

5.5.2. Aplicación de fertilizante

La aplicación de fertilizante se realizará mediante un inyector Venturi instalado directamente en la línea de riego. Este dispositivo genera un vacío que permite succionar y mezclar de manera homogénea el fertilizante con el agua de riego. Para controlar su operación, el Venturi estará ubicado en un bypass equipado con una electroválvula “2W-200-20”, la cual se encargará de regular el flujo de agua hacia el inyector, permitiendo que el fertilizante se incorpore de manera precisa en el sistema de riego.

La dosificación será por medio del controlador central, que activará la electroválvula según un calendario y tiempo predefinido, permitiendo la automatización del fertirriego. Esta

estrategia garantiza una distribución uniforme de los nutrientes, optimiza el uso de insumos y reduce la exposición del operador a químicos.

5.6. Análisis económico

Con el fin de evaluar la viabilidad financiera, se realizó para los cinco diseños una lista de componentes estándar y de automatización requeridos, incluyendo los costos unitarios y totales obtenidos de cotizaciones a diferentes distribuidores nacionales, expresados en dólares (USD). El costo total asciende a \$3.284,60 USD, donde los componentes de automatización representan la mayor inversión, seguidos por la infraestructura hidráulica principal. Este valor refleja el conjunto de materiales necesarios para el monitoreo y control automatizado del riego y fertirriego. (Cuadro 13)

Cuadro 13. Lista de materiales esenciales para los sistemas de riego.

Material	Unidades requeridas	Costo por unidad (USD)	Costo total (USD)
Cinta de goteo (Rollo 2400 m)	1	334,20	334,20
Tubería PVC 31 mm (6m)	42	9,07	381,07
Bomba	1	118,80	118,80
Filtro malla	1	51,01	51,01
Manómetro	1	10,10	10,10
Válvula de aire	5	78,33	391,64
Válvula reguladora de presión	5	71,80	359,01
Conector inicial	102	0,80	81,63
Tapón final	102	1,31	133,16
Tee PVC lisa	4	0,45	1,81
Codo PVC 45°	12	0,49	5,84
Automatización			
ESP32	5	16,32	81,59
Sensor de humedad superficial	25	5,48	137,08
Sensor de humedad profundidad	10	90,08	900,78
Electroválvula	6	49,48	296,87
Total			3.284,60

Los costos de instalación y mantenimiento para los cinco sistemas de riego automatizado se realizaron tomando en cuenta un equipo de seis peones durante cinco días y una jornada diaria de ocho horas, con el fin de optimizar el tiempo total de montaje sin incrementar significativamente los costos laborales. Asimismo, se consideró una

capacitación previa dirigida hacia el personal encargado, con el objetivo de garantizar el uso adecuado y el monitoreo eficiente de los sistemas. (Cuadro 14)

Cuadro 14. Costos asociados a la instalación de los 5 sistemas de riego.

Detalle	Descripción	Costo estimado (USD)
Capacitación	Manejo intermedio del sistema automatizado (2 personas, 1 día)	120
Consultoría servicios técnicos	Configuración del sistema, calibración de sensores y pruebas de riego	400
Técnico para automatización	Instalación de controladores, sensores y programación del sistema (1 técnico, 2 días)	180
Peones	Apoyo en instalación de tuberías, válvulas y otros componentes (6 peones, 5 días)	580
Total		1.280
Mantenimiento anual	Revisión de sensores, limpieza filtros, calibración de válvulas	150
Imprevistos	Repuestos menores, adaptaciones o reparaciones no previstas	60
Total, general estimado		1.490

El análisis costo-beneficio realizado se muestra en el Cuadro 15. Se logra apreciar que se representa una relación inferior a 1, con un valor de 0,52, esto significa que por cada dólar invertido se recuperan solamente \$0,52 en beneficios.

El beneficio acumulado \$2.460,00 USD se estimó suponiendo que la automatización reduce la necesidad de una persona durante una jornada al mes, ahorro de agua/energía y fertilizantes. Tomando en cuenta que el salario mínimo de un peón agrícola en Guatemala ronda los \$15,50 USD y teniendo una reducción mínima de 10% en fertilizantes y en el consumo de agua y energía.

Es importante destacar que estos resultados se basan únicamente en beneficios económicos directos y no se contemplan otros aportes cualitativos y cuantitativos, tales como el ahorro de tiempo en la gestión del riego, la mejora en la uniformidad de aplicación, la optimización del uso de recursos, la disminución de pérdidas por exceso o déficit de humedad. Por tanto, el valor real de la inversión podría ser significativamente mayor si se integraran estos factores en la evaluación.

Cuadro 15. Análisis costo beneficio para los sistemas diseñados.

Concepto	Valor (USD)	Beneficio acumulado en 10 años	RCB (relación B/C)
Costo total de los 5 sistemas	4.774,60	2.460	0,52

5.7. Análisis ambiental y social

Según el Listado Taxativo de Proyectos, Obras, Industriales o Actividades del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), los cinco diseños corresponden al Sector 01: Agrícola, Subsector K: Actividades de apoyo a la Agricultura. De acuerdo con este listado, el proyecto se clasifica como categoría C. (Véase Anexo 16).

Esta clasificación indica que los riesgos asociados al proyecto sobre los principales componentes ambientales (aire, agua y suelo) son mínimos, siempre y cuando se apliquen las medidas preventivas correspondientes. En cuanto al aire, el proyecto no genera emisiones significativas de contaminantes, polvo u olores. En relación con el agua, no se esperan vertidos contaminantes a fuentes superficiales o subterráneas, lo que minimiza el riesgo de contaminación química o biológica; además, al conducir el agua por medio de tuberías y regar únicamente lo necesario, se evita la escorrentía. Por último, la actividad no provoca alteraciones importantes en el suelo como su estructura, fertilidad o cobertura, ni genera problemas de erosión o compactación.

Con respecto al análisis social, la ENCA es una institución educativa con orientación técnico-agrícola, conformada por estudiantes, catedráticos, personal administrativo y trabajadores agrícolas que participan activamente en los procesos de enseñanza y producción de las distintas áreas de trabajo. Los impactos sociales son mayormente positivos, destacando la creación de empleos, la formación técnica y la contribución educativa. Además, se fortalece la capacidad institucional y promueve la innovación tecnológica en la enseñanza agrícola. Por otra parte, aunque el análisis económico muestra una relación costo-beneficio relativamente baja, este resultado se explica por el carácter educativo de la institución. En la ENCA, el mayor valor del proyecto radica en la capacitación del personal y la formación de estudiantes en producción agrícola en ambientes protegidos, más que en los réditos financieros directos. Finalmente, el impacto negativo más notable se asocia con la seguridad

ocupacional durante las labores de instalación y de mantenimiento, el cual se puede mitigar mediante protocolos de seguridad y salud ocupacional. (Cuadro 16)

Cuadro 16. Evaluación de impactos sociales.

Aspecto	Indicador	Tipo de impacto		Descripción del impacto
		Positivo	Negativo	
Trabajo y condiciones laborales	Empleos permanentes/largo plazo	X		Se generan empleos relacionados con mantenimiento, monitoreo y operación de los sistemas de riego.
	Empleos temporales/corto plazo	X		Se promueve la contratación temporal de mano de obra para la calibración e instalación de los sistemas de riego y fertirriego.
	Seguridad ocupacional		X	Pueden presentarse riesgos asociados a la manipulación de equipos, tuberías o productos químicos, por lo que se requiere capacitación constante y medidas de seguridad.
Educación y capacitación	Difusión de conocimiento	X		El proyecto fomenta la transferencia de conocimientos sobre tecnologías de automatización y fertirriego, beneficiando a toda la población de la ENCA.
	Servicios educativos	X		El proyecto se integra como herramienta para la enseñanza práctica de temas relacionados a riego y automatización.
Bienestar social	Desarrollo comunitario y social	X		Contribuye al fortalecimiento institucional y comunitario mediante la adopción de tecnologías sostenibles, mejorando la eficiencia y reduciendo el esfuerzo físico en las labores agrícolas.
Valor social vs rentabilidad económica	Capacitación y formación	X		La relación costo-beneficio es baja, sin embargo, el proyecto aporta un valor significativo en la formación de estudiantes y capacitación del personal de la ENCA, justificando su implementación pese a tener un retorno financiero bajo.
Patrimonio	Afectación a patrimonio cultural, histórico o religioso		NA	El impacto es no aplicable.

Fuente. Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

OE1: Establecer criterios técnicos para el diseño de sistemas de riego y fertirriego a partir del análisis de los parámetros físicoquímicos del suelo.

- En los cinco sistemas se obtuvo una lámina bruta recalculada que varía entre 5,10 mm y 5,87 mm, con un tiempo de aplicación de 0,56 horas y 0,65 horas y una frecuencia de riego diaria. Los resultados aseguran un manejo óptimo del recurso hídrico de acuerdo con las necesidades fisiológicas de las plantas y las condiciones del suelo del área en estudio.
- En relación con el diseño hidráulico, los sistemas requieren un caudal en la tubería principal entre 0,42 m³/h y 1,20 m³/h, y un caudal en cada lateral de riego que varía entre 0,05 m³/h y 0,07 m³/h. Para la conducción de agua se seleccionó una tubería de PVC con un diámetro de 1 ¼" (31,00 mm) en las líneas principales y múltiples. Además, se seleccionó una línea de riego de 16 mm con gotero integrado de 1L/h para los laterales.
- El sistema de fertirriego se implementará conforme el ciclo fenológico y las necesidades nutricionales de las hortalizas, utilizando un recipiente de 20 litros para la disolución de los fertilizantes y un inyector Venturi Mazzei modelo 584 con conexión de 1/2", el cual opera eficientemente dentro de un rango de 0,42 m³/h a 1,20 m³/h.

OE2: Optimizar el uso del recurso hídrico mediante el diseño de un sistema de riego automatizado.

- La automatización propuesta contempla el uso de un microcontrolador ESP32 para cada área de riego, permitiendo su funcionamiento de manera independiente. Además, el sistema integra sensores de humedad de suelo y electroválvulas que posibilitan el monitoreo en tiempo real de las condiciones hídricas y el control automático del flujo del agua. Esto permite la optimización en la gestión del recurso hídrico, reduce la intervención manual y fortalece la capacidad para implementar prácticas agrícolas modernas y sostenibles.

OE3: Analizar la viabilidad de los sistemas de riego diseñados, mediante criterios económicos, ambientales y sociales.

- De acuerdo con el análisis económico realizado se obtiene una inversión inicial aproximada de \$4.564,60 USD, correspondiente a la adquisición de materiales, equipo y costos de instalación. Asimismo, se estimó una inversión anual de \$210 USD destinada al mantenimiento preventivo e imprevistos. A su vez, se obtiene un valor de \$0,52 USD por cada dólar invertido según el análisis costo-beneficio.
- Desde el punto de vista ambiental, el proyecto se considera viable al clasificarse como categoría C2 según el listado taxativo del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Esta clasificación indica que la implementación de los sistemas no genera impactos ambientales significativos sobre los factores agua, aire y suelo.
- En el aspecto social, el proyecto representa un aporte significativo para la ENCA. Aunque los beneficios económicos son secundarios, el valor educativo y social prevalece, consolidando su relevancia dentro del entorno académico. Por otra parte, el impacto social negativo identificado puede abordarse de manera eficaz mediante medidas de seguridad adecuadas.

7. RECOMENDACIONES

- Ajustar la operación del sistema de riego para cada zona según los datos proporcionados por los sensores de humedad del suelo, frecuencia y duración de riego, con el fin de mantener niveles óptimos de humedad y evitar tanto déficit como exceso de agua en los cultivos.
- Organizar los cultivos por edad y tipo en bloques o eras dentro de los invernaderos y en la zona de campo abierto, evitando la mezcla de especies o etapas fenológicas. Esto permite la aplicación de riego y fertilizantes según las necesidades específicas de cada cultivo y etapa de desarrollo.
- Se recomienda que la instalación del sistema de automatización sea realizada por un técnico especializado en electrónica, con el objetivo de asegurar un funcionamiento correcto y minimizar el riesgo de fallos en el sistema.
- Para ampliar el monitoreo a otros campos o parámetros, se recomienda la incorporación de sensores adicionales, tales como medidores de pH, presión, caudal y temperatura, que permitan un control más integral de las condiciones del cultivo.
- Debido a la limitada cantidad de entradas analógicas disponibles en el microcontrolador, se sugiere implementar un sistema distribuido con múltiples microcontroladores y un dispositivo principal que funcione como “maestro” para centralizar la información y control.
- Capacitar a los usuarios del sistema de fertirrigación en su operación y manejo adecuado, asegurando la correcta utilización de la tecnología y sostenibilidad del sistema a largo plazo.
- Establecer un programa de mantenimiento preventivo del sistema que incluya limpieza periódica de filtros y válvulas, así como inspección del estado de tuberías y conexiones, para prevenir bloqueos y garantizar la eficiencia del sistema.
- Monitorear periódicamente los costos operativos (mantenimiento, insumos, energía, mano de obra, entre otros) para actualizar la evaluación de viabilidad económica y asegurar la sostenibilidad del sistema de fertirrigación a largo plazo.
- Realizar análisis periódicos de suelo y agua para detectar posibles acumulaciones de sales o nutrientes asociadas al fertirriego.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andía-Valencia, W. A. (2011). *Valor actual neto (VAN) y su aplicación en la evaluación de proyectos de inversión*. Revista Industrial Data, 14(2), 45-53. <https://doi.org/10.15381/idata.v14i2.7452>
- Andrade Pinelo, A. M. (2021). Aplicación del índice de rentabilidad (IR) y el período de recuperación de la inversión (PRI). *Revista de Ciencias Empresariales y Economía*, 10(2), 45–55.
- Andrades, C., Pacheco, J., & López, D. (2015). *Manual de laboratorio de suelos*. Editorial Universitaria.
- Arboleda, J. (2005). *La matriz de impacto ambiental como herramienta de evaluación*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- BASF Agriculture. (2025, febrero 27). *Sistemas de riego: uso del agua en la agricultura*. <https://agriculture.basf.com/mx/es/contenidos-de-agricultura/sistemas-de-riego-uso-del-agua-en-la-agricultura>
- Bautista, E. (2023, noviembre 16). *Manejo y nutrición de hortalizas*. Factor Productivo. <https://factorproductivo.com.mx/2023/11/16/manejo-y-nutricion-de-hortalizas>
- Calzada Roviroso, J., Martínez, A., & López, H. (s.f.). *Manual técnico para la producción de hortalizas, huevo de gallina y carne de conejo en unidades de producción familiar*. Portal Frutícola. <https://cdn.portalfruticola.com/2017/07/Manual-T%C3%A9cnico-Producci%C3%B3n-Hortalizas.pdf>
- Cárdenas Reyes, J. A., López Sánchez, J. R., García Almazán, B., Alcocer Lizardi, A. R., & Jiménez Castillo, O. R. (2024). Mejora en la eficiencia del riego agrícola mediante un sistema automatizado. *Memorias del Concurso Lasallista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 10(1), 58–62. <https://doi.org/10.26457/mclidi.v10i1.3789>
- Cenicaña. (2015). *Evapotranspiración de referencia (ET_o) y coeficientes de cultivo (K_c)*. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. <https://www.cenicana.org>

- Cenicaña. (2018, julio 3). *ABC de los sensores de humedad en las labores de riego*. <https://www.cenicana.org/abc-de-los-sensores-de-humedad-en-las-labores-de-riego>
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2017). *Código de instalaciones hidráulicas y sanitarias*. San José, Costa Rica.
- Castro, R., Rosales, R., & Rahal, A. (2008). *Metodologías de preparación y evaluación de proyectos de inversión pública*. (Colección CEDE 50 años). Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/flip/?pdf=/bitstreams/97dd160a-5c9d-4417-9860-5075cb136291/download>
- De Luz, S. (2024, junio 5). *Qué es Home Assistant, para qué sirve y tipos de instalación*. RedesZone. <https://www.redeszone.net/tutoriales/domotica/home-assistant-que-es-tipos-instalacion>
- Dumroese, R. K., Landis, T. D., & Wilkinson, K. M. (2012). Riego y fertirriego. En L. Contardi & H. Gonda (Coords.), *Producción de plantas en viveros forestales* (pp. 115-125). Consejo Federal de Inversiones.
- Delgadillo, O., Pérez, L. (2016). Medición de la infiltración del agua en el suelo. *Centro andino para la gestión y uso del agua. Centro agua. Facultad deficiencias agrícolas, pecuarias y forestales universidad mayor de san simón. Cochabamba, Bolivia*.
- Escuela de Posgrado de Economía y Finanzas. (2025, 13 de enero). *Costes directos e indirectos: qué son, sus diferencias y ejemplos*. <https://postgradoeconomia.com/costes-directos-e-indirectos-diferencias-ejemplos/>
- FAO. (1990). *Guía para la descripción de suelos*. FAO.
- FAO. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: El significado de la porosidad del suelo*. FAO. <https://www.fao.org/4/y4690s/y4690s02.htm>
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*.

- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. FAO.
- FAO. (2022). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>
- FAO. (s.f.). *Portal de suelos de la FAO*. <https://www.fao.org/soils-portal/>
- FAO. (2023). *CLIMWAT y CROPWAT*. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/es/>
- Giaconi, V. (2001). *Cultivo de hortalizas*. Editorial Universitaria.
- Guardia, Y., Rodríguez, S., Pacheco, R., Ramos, Y., & Palma, L. (2015). Análisis estructural de un biorreactor anaerobio de fibrocemento por el método de los elementos finitos. *Ingeniería Agrícola*, 19(2), 34–42.
- INTAGRI [Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura S.C.]. (2017). *Fuentes orgánicas de N-P-K para la nutrición de los cultivos*.
- IICA. (2020). *Sistemas de riego por goteo, microaspersión y aspersión*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Juárez López, P., Bugarín Montoya, R., Castro Brindis, R., Sánchez Monteón, A. L., Cruz Crespo, E., Juárez Rosete, C. R., & Balois Morales, R. (2011). *Estructuras utilizadas en la agricultura protegida*. CONACYT.
- Kafkafi, U., & Tarchitzky, J. (2012). *Fertirrigación: Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua*. International Fertilizer Association. https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2012_ifa_fertigation_spanish.pdf
- Li, W., Awais, M., Ru, W., Shi, W., Ajmal, M., Uddin, S., & Liu, C. (2020). Review of sensor network-based irrigation systems using IoT and remote sensing. *Journal of Sensors*, 2020, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2020/8396164>

- MAGA. (2024, abril 18). *Sistemas de riego en el país son fundamentales en la agricultura*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala. <https://www.maga.gob.gt/sistemas-de-riego-en-el-pais-son-fundamentales-en-la-agricultura>
- MAGA. (2024). *Beneficios de la tecnificación del riego*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala. <https://www.maga.gob.gt/beneficios-de-la-tecnificacion-del-riego>
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2016). *Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental – RECSA (Acuerdo Gubernativo 137-2016)*. Gobierno de Guatemala.
- Martínez Huerta, R. (2007). *El proceso de producción y las oportunidades de innovación tecnológica en la horticultura sinaloense de exportación*. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Martínez, F. (27 de Agosto de 2025). Consulta sobre métodos utilizados en Laboratorio de Suelos. (B. Villalobos, Entrevistador)
- Mazuela Águila, P., & De la Riva Morales, F. (2013). *Manual de fertirriego*. Universidad de Tarapacá. <http://sb.uta.cl/libros/30846%20manual%20fertirriego%20web.pdf>
- Monge Redondo, M. (2018). *Diseño agronómico e hidráulico de riegos agrícolas a presión*. Editorial Agrícola Española, S.A.
- Monge Redondo, M. (2022). *Diseño agronómico e hidráulico de riegos agrícolas a presión* (2.a ed.). Editorial Agrícola Española, S.A.
- Orjuela, H. M., Rubiano, Y., & Camacho, J. (2010). Modelos de infiltración. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(1), 31–39.
- Rimesa. (2020). *¿Cómo funciona una electroválvula de riego?* <https://rimesa.es/blog/como-funciona-una-electrovalvula-de-riego/>

- Ruiz, A., & Molina, J. M. (2020). *Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización*. InfoAgro.
https://www.infoagro.com/documentos/fundamentos_sistemas_control_del_riego_y_fertilizacion_parte_i.asp
- Roberti, L. (2018). Conducción por gravedad. *SSWM: Tecnologías de abastecimiento de agua*.
- Santos, B. M., Obregón-Olivas, H. A., & Salamé-Donoso, T. P. (2010). Producción de hortalizas en ambientes protegidos: Estructuras para la agricultura protegida (HS1182). *EDIS*, 3–10.
- Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag Puelma, J. M. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (6.a ed.). McGraw-Hill.
- Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA). (2006). *Manual de instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación del Impacto Ambiental (Manual de EIA)- Parte IV*. Gobierno de Costa Rica.
- Silva, P., Silva, H., Garrido, M., & Acevedo, E. (2015). *Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos*.
- Úbeda Rivera, J. S., & Delgado Dallatorre, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Revista Iberoamericana De bioeconomía Y Cambio climático*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- Valencia, W. A. (2011). Indicador de rentabilidad de proyectos: El valor actual neto (VAN) o el valor económico agregado (EVA). *Industrial Data*, 14(1), 15–18.
<https://doi.org/10.15381/idata.v14i1.7190>
- Valverde Conejo, J. (2022). *Sistemas de riego por goteo*. Editorial Tecnológica.
- Vega Ravello, R. (2016). *Manual práctico de fertirrigación*. Editorial Académica Española.

- Vijay, A. K., Kumar, S., & Prasad, R. (2020). An IoT-instrumented smart agricultural monitoring and irrigation system. *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing*, 48273, 907–912.
<https://doi.org/10.1109/AISP48273.2020.9073605>
- Villalobos, M. (2008). *Fundamentos de riego*. Editorial Tecnológica.
- Villalobos-Araya, M., & Valverde-Conejo, J. (2016). Infiltración básica en suelos agrícolas. *Revista Agronomía Costarricense*, 40(2), 23–31.
- Wei, Y., Li, J., & Zhang, H. (2020). Smart irrigation systems based on soil sensors and IoT technology: A review. *Agricultural Water Management*, 240, 106267.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106267>
- Williams, B., Taylor, J., & Smith, R. (2025). Smart irrigation controllers in residential applications and the potential of integrated water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(1).
<https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5871>

ANEXOS

Anexo 1. Informe de resultados de análisis de suelos.

INFORME: DE RESULTADOS N° 0324--13

Guatemala 12 de marzo del 2024

Empresa: ENCA

Persona responsable: Félix Martínez, Docente ENCA

Finca:

Localización: Bárcena, Villa Nueva.

Estimado Ing. Félix Martínez

El motivo de la presente es para informarle los resultados obtenidos del análisis realizado a (7) muestras de suelo provenientes de las áreas productivas de la ENCA obteniendo los siguientes resultados:

		Retención de humedad (%) Gravimétrico ATMs				Densidad g/cc	
Categoría	Identificación	0	0.33	15	Humedad aprovechable %	Real	Aparente
N° Laboratorio							
0224/46	Cultivos Extensivos	73.10	30.24	18.95	11.29	2.19	1.00
0224/47	PINFOR	74.97	30.65	16.02	14.63	2.31	1.01
0224/48	Frutales	60.52	27.48	14.77	12.71	2.18	1.00
0224/49	Polideportivo	59.70	26.88	12.94	13.94	2.11	1.03
0224/50	Limón, Consulados	54.90	26.84	13.17	13.67	2.10	1.15
0224/51	Maíz, Consulados	53.39	25.22	11.55	13.67	2.02	1.13
0224/52	Zacatera	55.04	28.56	15.76	12.80	2.08	1.15

Categoría	Identificación	%			CLASE TEXTURAL
		ARCILL A	LIM O	AREN A	
0224/46	Cultivos Extensivos	12.46	10.38	77.16	Franco Arenoso
0224/47	PINFOR	14.4	12.36	73.23	Franco Arenoso
0224/48	Frutales	12.49	12.49	75.02	Franco Arenoso
0224/49	Polideportivo	6.18	8.24	85.58	Arena Franca
0224/50	Limón, Consulados	16.55	10.34	73.11	Franco Arenoso
0224/51	Maíz, Consulados	14.44	12.37	73.13	Franco Arenoso
0224/52	Zacatera	16.71	16.71	66.59	Franco Arenoso



Ingeniero José Jesús Chonay

Jefe de laboratorio

Anexo 2. Informe de resultados de análisis de suelos.

	LABORATORIO DE SUELOS PLANTAS Y AGUAS/ENCALAB			DÍA: MES:		
	FORMATO DE CONSTANTES DE HUMEDAD A 1/3 ATM			AÑO:		
	Identificación	Numero Caja	Peso Caja	Pc+mh	Pc+ms	% Humedad
0224/30		4	15.50	25.11	20.66	86.20
0224/30		22	15.38	24.31	20.41	77.50
0224/46		22	15.35	32.75	25.71	30.24
0224/47		50	15.32	35.95	31.11	30.65
0224/48		44	15.36	33.50	29.59	27.73
0224/49		29	15.19	32.04	28.47	26.33
0224/50		10	15.50	35.09	33.31	26.34
0224/51		60	15.36	36.86	32.53	25.22
0224/52		04	15.49	41.51	35.73	28.56
0324/57		34	15.29	46.63	40.93	

Anexo 3. Informe de resultados de análisis de suelos.

	LABORATORIO DE SUELOS PLANTAS Y AGUAS/ENCALAB			DÍA:	MES:	
	FORMATO DE CONSTANTES DE HUMEDAD A 15 ATM			AÑO:		
	Numero de Laboratorio	Identificación	Numero Caja	Peso Caja	Pc+mh	Pc+ms
0224/30		29	15.19	23.14	19.79	48.43
0224/30		23	15.26	23.90	19.68	48.84
02.24/46		20	15.41	37.25	33.77	18.95
02.24/47		23	15.25	34.85	32.17	16.02
02.24/48		47	15.35	36.17	33.49	14.77
02.24/49		09	11.22	29.99	27.84	12.94
02.24/50		32	15.31	34.64	32.39	13.17
02.24/51		27	15.31	35.20	33.14	11.55
02.24/52		52	15.32	35.30	32.58	15.76
0324/57		32	15.30	43.59	41.46	

Anexo 4. Tabla para estimar PAR.

PORCENTAJE DEL AREA HUMEDECIDO EN EL RIEGO POR GOTEO															
Espacia-miento entre laterales (m)	Descarga del Gotero (l/h)														
	Menos de 1,5			2			4			8			Mas de 10		
	Textura del Suelo														
	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina
	Espaciamiento de los goteros sobre el lateral (m)														
	0,2	0,5	0,9	0,3	0,7	1	0,6	1	1,3	1	1,3	1,7	1,3	1,6	2
Porcentaje del área bajo riego (estimado) (%)															
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	100
2	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	100
2,5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	100
3	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	68
4	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	53
5	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6	5	12	20	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	40

Anexo 5. Invernadero 1 para diseño 1.



Anexo 6. Invernadero 2 para diseño 2.



Anexo 7. Invernadero 3 para diseño 3.



Anexo 8. Invernadero 4 para diseño 4.



Anexo 9. Zona de campo abierto para diseño 5.



Anexo 10. Especificaciones técnicas de la línea de goteo TYPHOON PLUS.

BENEFICIOS Y CARACTERÍSTICAS

Altos y uniformes rendimientos año tras año

- Innovador laberinto TurbuNext™ con amplísimos pasos de agua y gran área de la sección transversal del gotero, que permiten el uso de agua de baja calidad, utilizando sistemas de filtración estándar para la agricultura.
- Amplia área de filtrado que asegura un óptimo desempeño del gotero aún en condiciones de baja calidad de agua.
- Único diseño de filtro que toma el agua desde el centro del tubo, lo que evita la entrada de sedimentos en el gotero.
- El exponente X del Typhoon Plus es 0.45, lo cual significa que existe una mínima variación de flujo a lo largo de la regante con los cambios en la presión de trabajo, dando como resultado un riego más uniforme y por lo tanto un mayor rendimiento en el cultivo.

Confiabilidad

- El Typhoon Plus™ es fabricado de acuerdo al estándar internacional ISO 9261.
- Construcción del gotero por inyección, asegurando goteros uniformes y un muy bajo CV.

ESPECIFICACIONES

- 5 diferentes caudales: 0.5, 0.7, 1.0, 1.60, 2.20 l/h.
- Presión máxima del sistema: de acuerdo con los diámetros y el espesor de pared.
- Filtración recomendada: según el caudal del gotero.
- Método de filtración: a seleccionar en función del tipo y concentración de los contaminantes existentes en el agua.
 - Cuando la concentración de arena en el agua de riego excede las 2 ppm, se debe instalar un hidrociclón antes del filtro principal.
 - Cuando la concentración de sólidos como arena, limo y/o arcilla exceda 100 ppm, el pretratamiento debe ser aplicado de acuerdo con las recomendaciones del equipo de expertos de Netafim™.
- Amplio rango de diámetros y espesores de pared.
- Diámetro: de 16 a 25 mm.
- Espesor de pared: de 0.20 a 0.40 mm (8 a 15 mil).
- Gotero integrado, CV muy bajo.
- Resistente a los rayos UV.
- Resistente a los químicos estándar utilizados en la agricultura.

 **ESCANEA ESTE CÓDIGO
CON TU SMARTPHONE
PARA VER EL VIDEO**



Fuente. Netafim, 2025.

Anexo 11. Especificaciones técnicas de la línea de goteo TYPHOON PLUS.

INFORMACIÓN TÉCNICA DEL GOTERO

CAUDAL* (L/H)	PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO (BAR)**	DIMENSIÓN DE LOS PASOS DE AGUA (ANCHO-PROFUNDIDAD- LONGITUD) (MM)	ÁREA DE FILTRACIÓN (MM ²)	CONSTANTE K	EXPONENTE X	FILTRACIÓN RECOMENDADA (MICRONES) / (MESH)
0.50	De 0.6 hasta 3.0	0.45 x 0.45 x 34	21	0.177	0.45	130/120
0.70	De 0.6 hasta 3.0	0.52 x 0.51 x 34	22	0.247	0.45	130/120
1.00	De 0.6 hasta 3.0	0.60 x 0.59 x 34	24	0.355	0.45	200/90
1.60	De 0.6 hasta 3.0	0.66 x 0.63 x 18	24	0.567	0.45	200/90
2.20	De 0.6 hasta 3.0	0.77 x 0.72 x 18	24	0.780	0.45	200/90

*Caudal dados a 1.0 bar de presión **De acuerdo al diámetro y espesor de la regante.

CAUDAL (L/H) VS. PRESIÓN (BAR)

PRESIÓN (BAR)										
CAUDAL* (L/H)	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2	2.5	2.8	3.0
0.50	0.33	0.42	0.50	0.56	0.62	0.67	0.71	0.75	0.79	0.82
0.70	0.46	0.59	0.70	0.78	0.86	0.93	0.99	1.05	1.11	1.14
1.00	0.66	0.85	1.00	1.13	1.24	1.34	1.43	1.51	1.59	1.64
1.60	1.06	1.36	1.60	1.80	1.97	2.13	2.28	2.41	2.54	2.62
2.20	1.46	1.87	2.20	2.47	2.72	2.93	3.13	3.32	3.49	3.60

*Caudal Nominal a 1.0 bar de presión.

INFORMACIÓN TÉCNICA DEL GOTERO

MODELO	DIÁMETRO INTERNO (MM)	ESPESOR DE PARED (MM)	DIÁMETRO EXTERNO (MM)	MÁXIMA PRESIÓN DE TRABAJO (BAR)	PRESIÓN MÁXIMA DE LAVADO (BAR)	KD
16080	16.2	0.20	16.60	1.0	1.2	0.10
16100	16.2	0.25	16.70	1.2	1.4	0.10
16125	16.2	0.31	16.82	1.8	2.1	0.10
16150	16.2	0.38	16.96	2.2	2.5	0.10
22080	22.2	0.20	22.60	0.8	0.9	0.02
22100	22.2	0.25	22.70	1.0	1.2	0.02
22125	22.2	0.31	22.82	1.4	1.6	0.02
22135	22.2	0.34	22.88	1.5	1.7	0.02
22150	22.2	0.38	22.96	1.8	2.1	0.02
25080	25.0	0.20	25.40	0.6	0.7	0.01
25100	25.0	0.25	25.50	0.8	0.9	0.01
25125	25.0	0.31	25.62	1.0	1.2	0.01
25135	25.0	0.34	25.68	1.2	1.4	0.01
25150	25.0	0.38	25.76	1.4	1.6	0.01

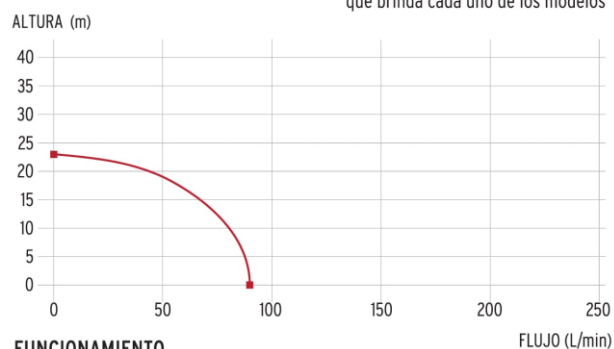
Fuente. Netafim, 2025.

Anexo 12. Especificaciones técnicas de la bomba seleccionada.

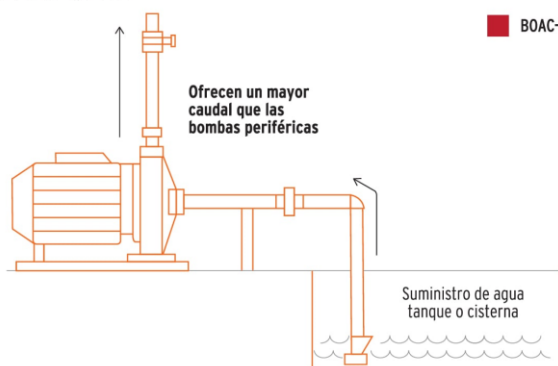
Potencia	1/2 HP (375 W)
Altura máxima	23 m
Flujo máximo	90 L/min
Máxima profundidad de succión	8 m
Ciclo de trabajo	50 minutos de trabajo por 20 minutos de descanso. Máximo diario 6 horas
Diámetro de Entrada / Salida	1" NPT
Tensión /Frecuencia	127 V / 60 Hz
Corriente	5 A
Velocidad	3450 rpm
Dimensiones(Base x Altura x Fondo)	17 x 22 x 28 cm
Peso	16.28 lb

CURVA DE RENDIMIENTO

Para una mejor selección de acuerdo a sus necesidades compare el rendimiento entre **Altura y Flujo** que brinda cada uno de los modelos

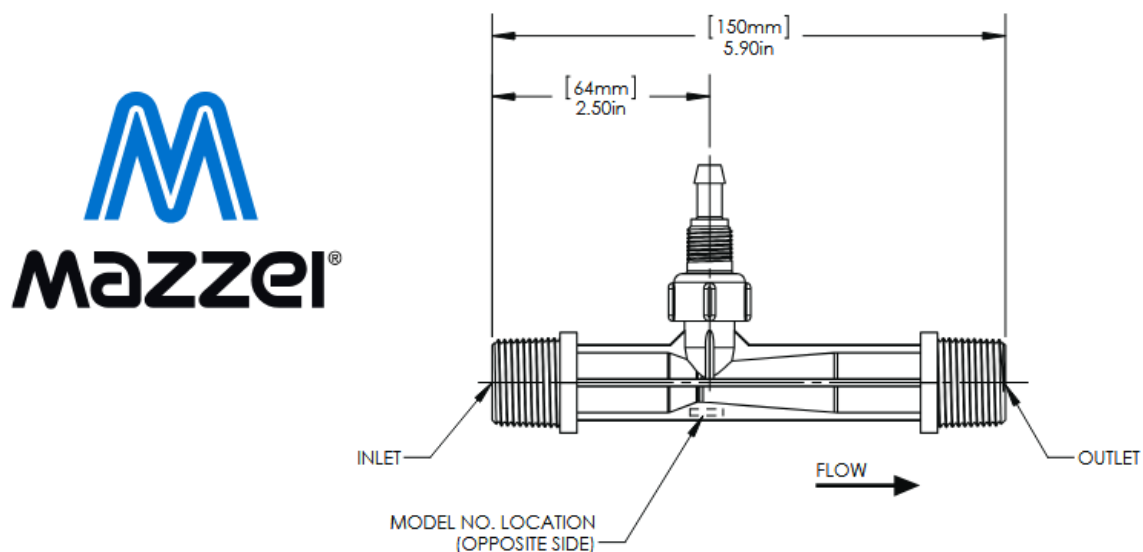


FUNCIONAMIENTO



Fuente. Seir, Guatemala.

Anexo 13. Inyector Ventury Mazzei ½”.



CONSTRUCCIÓN		
Material Disponible	Polipropileno (PP) - NEGRO	Fluoruro de Polivinilideno (PVDF) - NEGRO & NATURAL
Peso de Unidad (con caja)	0.07 kg	0.10 kg
Conexiones de Entrada y Salida	0.75" NPT macho	
Conexión de la Tapa del Puerto de Succión - Predeterminado (Diámetro Interior)	0.25" púa de tubería	
Conexión de la Tapa del Puerto de Succión - Alternativa	0.25" NPT macho	
Temperatura Máxima de Operación	100° C	
Presión Máxima de Operación (a 20° C)	8.44 bar	

Anexo 14. Tabla de desempeño Ventury según fabricante.

 Injector Performance Table													
Water Suction Capacity • Injector Inlet Pressure 5-50 PSIG													
Operating Pressure PSIG		Model 584 1/2" & 3/4" Threads		Model 684 3/4" Threads		Model 878-2 1" Threads		Model 885X-2 1" Threads		Model 1078-2 1" Threads		Model 1583 1.5" Threads	
Injector Inlet	Injector Outlet	Motive Flow GPM	Water Suction GPH	Motive Flow GPM	Water Suction GPH	Motive Flow GPM	Water Suction GPH	Motive Flow GPM	Water Suction GPH	Motive Flow GPM	Water Suction GPH	Motive Flow GPM	Water Suction GPH
5	0	2.1	29.2	3.5	27.4	3.7	62.9	3.6	78.1	5.5	101.5	10.7	135.8
	1		28.9		20.3		36.1		62.6		46.4		84.5
	2		28.5		13.8		23.8		42.7		22.2		53.3
	3		25.4		6.6		7.3		15.5		2.7		
	4		(4.4)		(4.3)		(4.0)		(4.0)		(4.0)		(4.4)
10	0	3.0	28.3	5.0	27.2	5.2	93.8	5.0	115.9	7.7	105.8	15.2	219.9
	2		28.2		27.3		62.0		90.8		75.7		143.8
	5		27.5		18.5		36.5		44.8		41.8		78.8
	7		13.3		10.9		15.8		19.4		19.2		42.0
	8		(9.0)		(8.5)		(8.7)		(7.5)		(8.1)		(8.6)
15	0	3.6	28.2	6.1	26.1	6.3	87.4	6.2	135.3	9.5	101.3	18.6	225.2
	5		27.9		26.1		62.1		83.2		79.9		163.8
	7		28.0		25.1		45.5		58.0		64.7		124.4
	10		14.0		12.9		23.6		19.2		34.3		86.5
	12		(13.5)		(13.0)		(12.5)		(11.0)		(13.1)		(13.0)
20	0	4.2	24.8	7.0	25.1	7.3	82.9	7.1	141.9	11.0	98.2	21.5	228.0
	5		24.8		25.2		80.5		117.4		95.4		205.4
	10		23.7		25.2		48.6		57.7		70.0		143.5
	12		19.2		18.4		33.6		36.2		51.5		131.7
	15		(18.0)		(16.5)		(16.5)		(14.0)		(17.3)		(17.9)
25	0	4.7	25.2	7.8	24.8	8.2	82.3	8.0	142.7	12.2	96.0	24.0	226.8
	5		25.2		24.9		81.3		135.8		96.7		226.4
	10		25.1		24.9		73.2		96.5		89.4		193.9
	15		20.8		24.4		45.3		38.4		68.2		148.1
	20		(22.0)		(21.0)		(21.0)		(17.0)		(21.9)		(22.1)
30	0	5.1	25.3	8.6	24.5	9.0	79.9	8.7	144.1	13.4	94.4	26.3	226.5
	5		25.4		24.6		79.2		140.7		94.5		226.4
	10		24.9		24.6		77.0		125.3		94.5		211.6
	15		25.2		24.6		65.4		69.3		82.1		167.3
	20		18.2		14.7		35.4		14.3		55.4		125.5
	25		(27.0)		(26.0)		(26.1)		(20.5)		(26.0)		(26.0)

Anexo 15. Ficha técnica de electroválvula Series 80 Netafim.

PRESSURE CONTROL

2W-200-20

Valvula solenoide de latón, conexión de 3/4" NPT, FKM, 220Vac

- Tipo de Válvula: Uso general.
- Modo de trabajo: Aire, agua y aceite.
- Rango de Presión: Aire (0-8bar), Agua(0-6bar) Aceite(0-4bar).
- Material: Latón.
- Tipo de accionamiento: Directo.
- Orificio: 20mm.
- Conexión: 3/4" NPT.
- Temperatura del fluido: -5 - 80°C.
- Bobinas: 1 (simple solenoide).



Cód: 2W-200-20

Anexo 16. Listado taxativo de proyectos (MARN).

SECTOR 01. AGRÍCOLA; SUBSECTOR K. ACTIVIDADES DE APOYO A LA AGRICULTURA															
No.	ACTIVIDAD ECONÓMICA (CIU)	DESCRIPCIÓN	FACTOR DE IMPACTO	UNIDAD DE MEDIDA	CIU- 4	Categoría C		Categoría C con PGA		Categoría B2		Categoría B1		Categoría A	
						Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Actividades de apoyo a la agricultura.	Manejo de sistemas de riego para fines agrícolas.	Área	Hectárea	0161	X		<=50		>50					
2	Actividades de apoyo a la agricultura.	Empresas que se dedican a la aspersión aérea.	Área	Hectárea	0161									>0	
3	Actividades de apoyo a la agricultura.	Implementación de macro túneles y sistemas de mallas.	Área	Hectárea	0161			<=50		>50					