

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**ESTRATEGIA DE RIEGO BASADA EN LA ACUMULACIÓN DE JOULES Y SU
EFICIENCIA EN PIMIENTO MORRON (CAPSICUM ANNUUM) BAJO
INVERNADERO**

TRABAJO PROFESIONAL SUPERVISADO

Presentado como requisito parcial previo a la obtención del Título de
Ingeniero Agrónomo

Por:

JOHAN ANTONY GÓMEZ MENDOZA

CATACAMAS

OLANCHO

MAYO, 2026

**ESTRATEGIAS DE RIEGO Y SU EFICIENCIA EN PIMIENTO MORRON (*Capsicum
annuum*) BAJO INVERNADERO**

Por:

JOHAN ANTONY GÓMEZ MENDOZA

MIGUEL ÁNGEL COREA ÁLVAREZ, Dr.

Asesor principal

TRABAJO PROFESIONAL SUPERVISADO PRESENTADO A LA UNIVERSIDAD
NACIONAL DE AGRICULTURA COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO

CATACAMAS

MAYO,2026

OLANCHO

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico principalmente a **DIOS**, quien me dio fortaleza, guiándome por el camino correcto e inspirándome para poder hacer realidad este trabajo, por haberme dado sabiduría, paciencia y sobre todo perseverancia para poder llegar a este momento tan importante en mi formación profesional. El camino hasta aquí no ha sido fácil, pero él nunca me dejó solo, siempre estuvo ahí para ayudarme a superar cada obstáculo, he sido muy afortunado porque puso en mi camino personas muy especiales que hicieron que el proceso fuera una de las mejores etapas en mi vida.

A mis padres **SUYAPA ANTONIA COLINDRES Y FRANCISCO SOLANO GARCÍA** por su apoyo incondicional, por siempre velar por mi bienestar en todo este proceso, ellos han sido mi más grande motivación y la razón por la cual sigo adelante cada día, han confiado en mí como nadie lo hizo y hoy gracias a su apoyo este sueño se ha convertido en una realidad.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres **SUYAPA ANTONIA COLINDRES Y FRANCISCO SOLANO GARCÍA** quienes han sido el motor de mis sueños, porque han confiado en mí como nadie lo hizo y no solo eso, me han apoyado en cada uno de mis pasos, enseñándome a luchar por mis sueños por difíciles que parezcan, no hay nadie a quien le deba más amor y gratitud como a ellos.

A mis amigos de la **UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA YASLÍN GUTIÉRREZ, ROCÍO FLORES, SECIA MARADIAGA, JOSEPH AVILEZ, MILTON LEMUS; MANUEL LÓPEZ**, gracias por el apoyo y por brindarme su amistad haciendo que estos años de formación sean una de las mejores etapas de mi vida, han sido personas muy importantes en este proceso.

A mis compañeros de cuarto y amigos **RONEN LEMUS Y VICTOR INTERIANO**, por haber sido parte de este proceso y haber hecho que la rutina sea un poco más ligera, gracias por brindarme su apoyo y amistad.

A mi asesor Dr. **MIGUEL ÁNGEL COREA ÁLVAREZ**, por todo el apoyo para desarrollarme profesionalmente, por su orientación y guía en todo el proceso para el desarrollo de este trabajo. Así también agradezco al Dr. **JOSÉ SANTIAGO MARADIAGA SALINAS** y al M.Sc. **MANUEL ALBERTO-CHAVARRÍA SIERRA**, por haberme apoyado en el desarrollo de este trabajo.

A la **UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA** por abrirme sus puertas para poder cumplir mi tan anhelado sueño.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS.....	1
LISTA DE ANEXOS.....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo General.....	3
2.2. Objetivos Específicos	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1. Eficiencia en el uso del agua.	4
3.2. Eficiencia en el uso del agua por las plantas	5
3.3. Soluciones nutritivas.....	5
3.4. pH	6
3.5. Conductividad eléctrica	7
3.6. Relación de absorción de Sodio (RAS)	8
3.7. Salinidad	8
3.8. Indicadores de sodicidad.....	8
3.9. Sustratos.....	9
3.9.1. Función y criterios para la elección de un sustrato	10
3.9.2. Características de un buen sustrato	10
3.9.3. Características del espacio poroso	11
3.9.4. Movimiento del agua dentro de un sustrato.....	11
3.9.5. Curvas de retención de humedad	12
3.9.6. Relaciones hídricas sustrato-planta.....	13
3.9.7. Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	14
3.10. Requerimientos edafoclimáticos.....	14
3.10.1. Temperatura	14
3.10.2. Humedad Relativa	15
3.10.3. Luz.....	15
3.11. Riego.....	16

3.11.1.	Fertilización	16
3.11.2.	Fertirriego	17
3.12.	Estrategias de riego	18
3.12.1.	Riego por monitoreo	18
3.12.2.	Riego automatizado	18
3.12.3.	Riego por pulsos	19
3.12.4.	Riego por radiación acumulada	19
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
4.1.	Lugar de desarrollo de la práctica.....	23
4.2.	Materiales y Equipo	24
4.2.1.	Materiales	24
4.2.2.	Métodos	24
4.3.	Desarrollo de la práctica	24
4.3.1.	Fase I: Inducción.....	24
4.3.2.	Fase II: Aplicación de la estrategia de riego	25
4.3.3.	Fase III: Prácticas de manejo agronómico al cultivo	27
4.3.4.	Fase IV: Monitoreo de parámetros fisiológicos	28
4.3.5.	Variables para evaluar, tipo descriptivas.....	29
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
5.1.	Estrategia de riego por radiación acumulada	31
5.2.	Crecimiento vegetativo del cultivo	32
5.3.	Diámetro del tallo	33
5.4.	Cuaje y número de frutos por metro cuadrado	35
5.5.	Porcentaje de frutos Premium.....	37
VI.	CONCLUSIONES	39
VII.	RECOMENDACIONES	41
7.1.	Recomendaciones a la Exportadora del Atlántico	41
7.2.	Recomendaciones a la Universidad Nacional de Agricultura.....	42
VIII.	ANEXOS.....	43
IX.	BIBLIOGRAFÍA	48

LISTA DE CUADROS

Tabla 1: Parámetros promedio del control de riego por radiación acumulada-----	30
Tabla 2. Crecimiento vertical promedio del cultivo por semana-----	31
Tabla 3: Diámetro del tallo-----	34
Tabla 4: Peso promedio del fruto por variedad en etapa de plena de producción3-----	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la empresa	-----23
Figura 2: Estación meteorológica	-----25
Figura 3: Software priva office direct	-----26
Figura 4: Cabezal de riego	-----26
Figura 5: Crecimiento vertical promedio por semana	-----33
Figura 6: Plantas con diámetro menor a 5mm y mayor a 5mm por muestra	-----34
Figura 7: Número de frutos por m² a lo largo del ciclo	-----35
Figura 8: Peso promedio del fruto por variedad (g)	-----37

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Cosecha de fruta -----	40
Anexo 2: Monitoreo de parámetros fisiológicos -----	40
Anexo 3: Pesado el fruto -----	41
Anexo 4: Poda de hoja -----	41
Anexo 5: Colocación de planta en tutorado -----	42
Anexo 6: Aplicación de productos químicos -----	42
Anexo 7: Recolección de drenaje -----	43
Anexo 8: Muestreo de plagas -----	43
Anexo 9: Pantallas -----	44
Anexo 10: Control de malezas -----	44

I. INTRODUCCIÓN

El pimiento (*Capsicum annuum*) es uno de los cultivos hortícolas de mayor relevancia agronómica a nivel nacional e internacional, debido a su elevado valor nutricional y a su alta demanda en la alimentación humana (Castellanos, 2026). Su producción se extiende en extensas zonas agrícolas, constituyendo una fuente significativa de ingresos y empleo para el sector agrícola y campesino (Castellanos, 2026). No obstante, los sistemas de producción convencional enfrentan limitaciones asociadas a la eficiencia en el uso del recurso hídrico y a la optimización del rendimiento (Maia, 2014). En este contexto, la implementación de su producción bajo condiciones de invernadero se presenta como una alternativa tecnológica viable, al permitir un manejo más eficiente del agua y los nutrientes, contribuyendo al incremento en la productividad y sostenibilidad del cultivo (Sánchez, 2017).

Dentro de los sistemas de producción protegida, el uso de sustratos constituye un elemento fundamental (Fernández, 2018). Un sustrato es todo material sólido distinto del suelo, ya sea natural o de síntesis, residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor o recipiente, en forma pura o en mezcla, proporciona soporte físico a la planta y permite el desarrollo del sistema radicular (Barbaro, 2023). Su funcionamiento se puede comprender como un sistema trifásico: una fase sólida que garantiza el anclaje del sistema radical y la estabilidad de la planta, una fase líquida que asegura el suministro de agua y nutrimentos a la planta y una fase gaseosa que facilita el intercambio de oxígeno y bióxido de carbono entre las raíces y el medio externo. El equilibrio entre estas tres fases determina en gran medida las condiciones en las que se desarrolla el cultivo (Serrano, 2004).

El cultivo de pimiento se desarrolla en este tipo de sistema, el cual es particularmente sensible al estrés hídrico, tanto por exceso como por déficit de humedad en el sustrato (Zambrano, 2019). Un suministro irregular de agua ya sea por exceso o por deficiencia, puede provocar serios

problemas en el desarrollo natural del cultivo. Por ello, se recomienda la aplicación de riegos frecuentes y de baja intensidad (Núñez, 2017).

Bajo este planteamiento, la práctica profesional supervisada se enmarcó en el análisis de las Estrategias de riego y su eficiencia en pimiento morrón (*Capsicum annuum*) cultivado bajo condiciones de invernadero. El estudio busca generar información técnica para optimizar el uso del recurso hídrico, mejorar el desarrollo del cultivo y maximizar la productividad en condiciones controladas.

II. OBJETIVOS

2.1.Objetivo General

Evaluar la influencia de la estrategia de riego basada en la acumulación de Joules sobre el desarrollo vegetativo y generativo del cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum*) bajo condiciones de invernadero.

2.2.Objetivos Específicos

Desarrollar y ejecutar prácticas de manejo agronómico del cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum*) bajo condiciones controladas de invernadero.

Monitorear parámetros fisiológicos del pimiento morrón como respuesta a la estrategia de riego utilizada.

Analizar el efecto de la frecuencia y volumen de riego en el crecimiento vegetativo del cultivo.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

La investigación sobre el manejo del agua en sistemas de producción bajo invernadero se orienta a la identificación y optimización de recursos tecnológicos que permitan satisfacer de manera eficiente los requerimientos hídricos de las plantas. (Aguliar, 2014). Los resultados obtenidos han impulsado el desarrollo y la adopción de técnicas avanzadas como la hidroponía, la cual constituye un sistema de producción agrícola en el que las raíces de las plantas reciben una solución nutritiva compuesta por elementos minerales esenciales disueltos en agua. En este sistema, el suelo es reemplazado por sustratos inertes y estériles, o bien por la propia solución nutritiva, lo que permite un control preciso del suministro de agua y nutrientes, mejorando la eficiencia en el uso del recurso hídrico y el rendimiento del cultivo (Salazar, 2014).

3.1.Eficiencia en el uso del agua.

El aumento de la eficiencia en el uso del agua para la producción de cultivos es necesario, ya que el nivel de consumo por parte de la agricultura no es sustentable. El crecimiento que se proyecta de la población requiere que una mayor cantidad de agua sea usada para las necesidades domésticas y ambientales (Guzmán, 2013). La solución para cubrir esta demanda de agua consiste en redistribuir el agua usada por la agricultura, reduciéndola al 70%. Con esto sería posible aumentar hasta un 50% la cantidad de agua disponible para otros usos, como los domésticos y ambientales. Con el aumento de la población es necesario aumentar la producción de alimentos, esto requiere mejorar la productividad del uso del agua en la agricultura (Hamdy, 2003).

3.2.Eficiencia en el uso del agua por las plantas

Las plantas han desarrollado mecanismos que les permiten controlar la pérdida de agua mientras continúan fijando carbono en la fotosíntesis, esto se considera como un factor esencial para su supervivencia (Azcón, 2008). La apertura estomática que propicia la entrada de CO₂ necesario para la fotosíntesis de la planta, resulta en una pérdida inevitable de agua. La eficiencia en el uso de agua es un parámetro útil que relaciona los dos flujos y muestra el total de CO₂ fijado(beneficio) por unidad de agua perdida (Jones, 2004).

A nivel de planta completa, la eficiencia del uso del agua a largo plazo es definida como el cociente de la ganancia neta de materia seca en un periodo de tiempo dado entre el agua perdida durante el mismo tiempo (Jones, 2004). Las definiciones anteriores mencionan una relación estrecha entre la transpiración y la fijación de carbono, esta relación puede ser manipulable a través de cambios en la fisiología de la planta, resultado de las alteraciones en la conductancia estomática o fijación de carbono.

3.3.Soluciones nutritivas

La solución nutritiva es la mezcla de agua y nutrientes esenciales para las plantas en una concentración y proporción adecuada que favorece a su absorción. Entre los factores que la caracterizan se encuentra el pH, el cual está determinado por su composición mineral (Olvera, 2016). Este parámetro influye en los procesos de combinación y disociación dentro de la solución, afectando la distribución de los elementos y, en consecuencia, la biodisponibilidad de los nutrientes para las plantas (Mendez, 2015).

La nutrición que la Secretaría de Agricultura y Ganadería propone en Hidroponía por los excelentes resultados que ha mostrado es la siguiente: solución nutritiva “A” a base de 600 gr de Fosfato Aniónico, 1,630 gr de Fosfato de Magnesio, 30 gr de Sulfato de Potasio, 2,500 gr de Nitrato de Potasio. En cuanto a la solución nutritiva “B” es la mezcla de 177.8 gr de Fertilom Combi y 1.5 gr de Ácido Bórico. Por último, la solución nutritiva “C” se utiliza únicamente 2,380 gr. Las tres

soluciones se disuelven cada una en 10 litro de agua, se etiquetan los recipientes y se guardan. Por metro cuadrado se aplica 5 cc de la solución A, 2 cc de B y 5 cc de C, disueltos en tres litros de agua (Banegas, 2003).

La composición de la solución hidropónica es el factor que presenta más variaciones; a lo largo de la historia, investigadores y agricultores han desarrollado sus propias formulaciones acorde a la demanda nutricional de la especie y el sistema hidropónico utilizado (Chávez, 2006). Esta composición debe mantener una proporción que permita suplir de forma no limitante la extracción de los nutrientes requeridos por el cultivo. Se estudian diferentes proporciones de los iones que la componen, asegurando que los cultivos podrían crecer bien al manejar un correcto balance entre cationes y aniones (Mendez, 2015).

3.4.pH

Las plantas pueden sobrevivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desórdenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando todos los nutrientes se suministren en forma asimilable. No obstante, el crecimiento y desarrollo de la planta se ven reducidos de manera apreciable en condiciones de acidez o alcalinidad extremas, el pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la CIC y la actividad biológica. En el caso del cultivo hidropónico de hortalizas, el valor óptimo del pH (solución del sustrato) se sitúa entre 5,5 y 6,8 (Quintero, 2001).

El pH actúa manteniendo los iones solubles para la planta y, por tanto, mejorando su nutrición. Valores extremos pueden provocar la precipitación de los iones. Con un pH superior a 7.5 puede verse afectada la absorción de fósforo, de calcio, de hierro y de manganeso, la corrección del pH puede evitar los estados carenciales. Cuando el pH pasa de 6.5 se producen precipitados y por debajo de 5 puede verse deteriorado el sistema de raíces de las plantas, y más en sistemas de cultivo sin suelo en los que se emplean sustratos con bajo poder tampón (Aguilar, 2002).

3.5. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es uno de los parámetros más importantes para tener en cuenta bajo condiciones de producción hidropónica ya que es un indicativo de la concentración de sales en soluciones acuosas. Altas conductividades eléctricas en el sustrato y la solución pueden afectar el desarrollo y desempeño de las plantas y hacerlas más susceptibles a plagas y enfermedades (Cabrera, 2009).

Es una medida que determina la capacidad de una solución para conducir electricidad, la cual depende directamente de la cantidad de sales disueltas, principalmente fertilizantes, presentes en el agua. En términos prácticos, la conductividad eléctrica indica la concentración total de nutrientes disponibles para el cultivo en la solución nutritiva y se expresa, de manera habitual, en milisiemens por centímetro (mS/cm) o microsiemens por centímetro (μ S/cm) (Gilsanz, 2007). Otra unidad que puede emplearse, aunque con menor frecuencia, es el decisiemens por metro (dS/m). Su valor es equivalente al de los milisiemens por centímetro, por lo que los rangos recomendados para los cultivos hidropónicos son los mismos (Villaseñor, 2024).

En sistemas hidropónicos, la CE generalmente debe mantenerse entre 1 y 3 mS/cm, aunque el valor exacto varía según el tipo de cultivo, su etapa de desarrollo y las condiciones ambientales (Gilsanz, 2007). La conductividad eléctrica para el cultivo de pimiento varía según la etapa de desarrollo en que se encuentre, cuando el cultivo está en la etapa de plántula es permisible un rango de 1.0-1.5 mS/cm, en desarrollo vegetativo la CE debe estar entre 2.0-2.5 mS/cm y en la etapa de floración y fructificación el cultivo necesita una CE de 2.5-3.0 mS/cm (Villaseñor, 2024).

Una lectura baja de CE indica insuficiencia de nutrientes, lo que provoca deficiencias y limita la disponibilidad de macro y micronutrientes, afectando el desarrollo del cultivo. Por el contrario, cuando la CE es demasiado alta, la acumulación de sales genera estrés, reduciendo la capacidad de la planta para absorber agua y nutrientes (Villaseñor, 2024).

3.6. Relación de absorción de Sodio (RAS)

Es un índice de calidad del agua utilizado para evaluar el riesgo de sodificación asociado a un suministro de agua de riego, indicando el peligro potencial para la estructura del suelo. Un exceso de sodio en el agua provoca efectos negativos en las propiedades del suelo reduciendo su permeabilidad. Además, de limitar la absorción de agua y nutrientes por parte del suelo, esto evita que el agua llegue a las hojas de las plantas e impida el metabolismo vegetal (Granada, 2019).

Un alto nivel de sodio en el agua también puede llevar a la formación de suelos alcalinos. Método para calcular el índice RAS que relaciona la medida de la proporción relativa de iones de sodio con respecto a los iones de calcio y magnesio presentes en una muestra de agua. Esta puede ser calculada utilizando la ecuación 1, proporcionada por el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de EE. UU (Granada, 2019).

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Mg^{3+} + Ca^{2+}}{2}}} \quad 1$$

3.7. Salinidad

Representa la cantidad de sales disueltas en el agua, expresada en partes por trillón (ppt), principalmente iones como sodio, calcio, magnesio, cloruros y sulfatos. En concentraciones elevadas afectan el crecimiento de las plantas, disminuyen la productividad y alteran la estructura del suelo debido a la acumulación de sales influyendo en la calidad del agua, como para consumo humano y riego agrícola (Fernández, 2014).

3.8. Indicadores de sodicidad

El aumento de la proporción de sodio retenido, con respecto a otros cationes en el complejo de intercambio del suelo, se le conoce como sodificación. Las causas más frecuentes son la utilización

de aguas de mala calidad en el riego. Por lo general, los suelos sódicos se desarrollan cuando son sometidos al riego con agua que tiene alta relación de adsorción de sodio (mayor a 5) y/o una alta proporción de sales de bicarbonato. También se forman por el movimiento ascendente del agua subterránea (Roblero, 2021).

La disminución progresiva de iones Ca^{2+} en las soluciones de los suelos y aguas de riego conlleva a que la relación Na/Ca se incremente. En estas condiciones, los procesos de sodificación de los suelos como la dispersión, pérdida de permeabilidad, solubilidad de moléculas orgánicas y aumento de pH, se desarrollan con mucha intensidad (Roblero, 2021).

3.9.Sustratos

El cultivo de chile bajo condiciones de invernadero puede cultivarse directo en suelo o bien usando un sustrato y un contenedor para su desarrollo. Existe una variedad de sustratos y estos se clasifican en orgánicos e inorgánicos. Entre los orgánicos dos de los más usados son la fibra de coco y la turba; mientras que los inorgánicos comprenden a la roca volcánica o tezontle, piedra pómez, grava, perlita, vermiculita y arena de río (Castorena E. A., 2014).

La fibra de coco es un material muy ligero que se obtiene como residuo de la industria textil de las fibras del mesocarpio de los frutos del cocotero. Tiene una gran capacidad de retención de agua (tres o cuatro veces su peso) combinado con una alta porosidad (>94%), lo cual permite una excelente aireación y oxigenación del sistema radicular (García, 2015). La Turba es un sustrato, constituida principalmente por restos de musgos y de otras plantas superiores, los cuales están medianamente descompuestos a causa del exceso de agua y falta de oxígeno, tienen bajo contenido de sales solubles, una porosidad mayor al 90% por lo que proporcionan buen drenaje y aireación, y constan de una baja densidad aparente (0.07 a 0.14 g cm^{-3}) (Castorena E. A., 2014).

Dentro de los sustratos más utilizados en Honduras tenemos la cascarilla de arroz, arena y grava, aserrines u virutas preferiblemente de maderas de color, ladrillo y tejas molidas, plumavit y carbón.

Para que el sustrato sea aprovechado de la mejor manera se recomiendan las siguientes mezclas: 50% de cáscara de arroz con 50% de carbón limpio, 80% de cascara de arroz con 20% de arena, 60% de cáscara de arroz con 40% de aserrín de color (Banegas, 2003).

3.9.1. Función y criterios para la elección de un sustrato

Se denomina sustrato a un medio sólido inerte que cumple con dos funciones esenciales las cuales deben ser: la de anclar las raíces para protegerlas de la luz y permitirles respirar, así mismo debe de retener el agua y los nutrimentos que las plantas necesitan (Bartolón, 2022). Los gránulos componentes del sustrato deben permitir la circulación del aire y de la solución nutritiva. Se consideran buenos aquellos que permiten la presencia entre 15 y 35% de aire y entre 20 y 60 % de agua en relación con el volumen total (Cázares, 2004).

Los sustratos para la siembra de cultivos hidropónicos deben ser materiales inertes y debe tener características como las siguientes: retención de humedad, permitir buena aireación, físicamente estables, química y biológicamente inertes, tener buen drenaje y capilaridad, ser liviano, de bajo costo y, sobre todo, estar disponible en la zona. Las características antes mencionadas le permitirán a la planta tener su desarrollo en condiciones apropiadas (Banegas, 2003).

3.9.2. Características de un buen sustrato

Debe anclar a las raíces protegiéndolas de la luz, debe ser químicamente inertes, es decir no suministrar ni absorber ningún elemento nutritivo, ya que esto alteraría la composición de la solución nutritiva, debe retener adecuadamente la humedad, en forma homogénea y sin que obstruya la parte porosa ocupada por el aire. Debe permitir una buena aireación para favorecer la respiración de las raíces. Debe proporcionar un buen drenaje, para permitir una adecuada respiración de las raíces y evitar la muerte inmediata de las plantas. Debe tener capilaridad, es decir, capacidad de absorber la solución nutritiva a través de los microporos y de transportarlas a todas las direcciones. Debe ser liviano, de bajo costo y fácilmente disponibles (Cázares, 2004).

3.9.3. Características del espacio poroso

El espacio poroso está formado por los espacios conformados por la superposición de dichas partículas, y en su caso, por los poros internos de las propias partículas. La distribución del tamaño de las partículas y de los poros determina el balance entre el contenido en agua y en aire del sustrato, a cualquier nivel de humedad (Ansonera, 1994).

La forma, tamaño y distribución de los poros va a condicionar las propiedades hídricas del sustrato del sustrato, y por ende el manejo del agua de riego. El control de riego de un sustrato será más eficaz cuando sepamos cuanto y cuando regar. Las propiedades hídricas del medio poroso dan información sobre la evolución de las relaciones aire-agua en el entorno radical, la disponibilidad de ambos componentes va a marcar el momento del riego y la cantidad de agua a aplicar. (Ansonera, 1994).

3.9.4. Movimiento del agua dentro de un sustrato

El movimiento del agua en el sustrato se da por la variación potencial, esto produce una situación de desequilibrio, la transformación reversible de energía potencial en cinética actúa como medio para restablecer el equilibrio (García, 2015). El agua con más energía potencial transforma gran parte en cinética y se da el desplazamiento hasta los puntos con potencial más bajo, de esta manera genera un nuevo equilibrio. El movimiento se detiene cuando el potencial de los dos puntos se iguala. El flujo de agua para el restablecimiento se produce a través de los poros, que actúan como conducciones hidráulicas (Chamú, 2010)

Desde una situación de equilibrio en la que el potencial hídrico es igual en todo el suelo. La absorción de agua por las raíces hace que el potencial en esa zona baje, mientras que el resto del sustrato permanece con el potencial momentáneamente elevado. El riego se aplica cuando la disponibilidad de agua es baja, siendo esto consecuencia del bajo contenido y potencial hídricos (Campos, 2024). El potencial hídrico del agua del riego es superior a la contenida en el sustrato.

La transformación de energías reversible realiza la redistribución del agua en todo el sustrato y con esto aumenta la disponibilidad de agua para las plantas (Chamú, 2010).

La falta de agua en las plantas afecta la calidad del producto y la producción final, y el exceso de riego provoca desperdicio del agua y además afectaciones al cultivo por enfermedades. Por ello conocer la cantidad precisa de agua que requiere la planta, nos permite planificar y escoger un sistema de riego que pueda determinar la cantidad y frecuencia optima de la lámina de riego y además de tener un mayor control en la aplicación de los nutrientes (Morales, 2002).

3.9.5. Curvas de retención de humedad

Las curvas de retención de humedad (CRH) en el suelo expresan la relación existente entre el contenido de humedad y su potencial matricial, además reflejan la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión; dicha relación depende de los factores relacionados con la porosidad del suelo (Casanova, 2018).

La retención de humedad está en función de la granulometría y porosidad de las partículas del sustrato, determinando la posibilidad a la planta de utilizar el agua como medio para sus funciones metabólicas (Torres, 2022). Es importante conocer la cantidad total de agua que el sustrato puede contener y la cantidad que retiene después de que el líquido ha sido eliminado por gravedad a tensión cero. Este último dato nos dice en qué medida el material mantiene la humedad alrededor de las raíces y hasta qué punto permite que circule el aire. Mientras más elevada sea la capacidad de retención de agua de los sustratos, menos frecuentes deben ser los riegos (Sáenz, 2021).

La curva de retención de agua permite conocer las relaciones agua en condiciones de equilibrio estático, es decir cuando se cumple que, para todas y cada una de las partículas de agua presentes en el sustrato, es igual la suma de todas las fuerzas que inciden en cada una de ellas (potencial hídrico) (Valenzuela, 2013). Cuando se realiza un riego o cuando se inicia la actividad absorbente de las raíces, intervienen nuevas fuerzas que rompen el equilibrio existente y se inicia un

movimiento de agua que tiende a alcanzar un nuevo equilibrio. La información aportada por la curva de retención de agua puede explicar satisfactoriamente el comportamiento hídrico de un sustrato y por lo tanto es importante conocer su significado (Sáenz, 2021).

La tensión de humedad es la fuerza con la que el agua está retenida en el sustrato. Usualmente se mide en centibares y para caso específico del sustrato, se mide en cm de agua. A medida que las plantas extraen agua del sustrato, la tensión de humedad va aumentando y llega al punto que las plantas ya no pueden extraer más agua. La tensión de agua ideal para un cultivo hidropónico en sustratos es la comprendida entre 10 y 50 cm de c.a. Tensiones fuera de este rango puede afectar desfavorablemente el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Sáenz, 2021).

3.9.6. Relaciones hídricas sustrato-planta

La absorción de agua por las raíces de la planta depende de la capacidad de la planta para absorber agua, del sustrato para suministrar a la raíz y de la interacción entre el sistema radical y el sustrato (Azcón, 2008). El agua se almacena en los poros del sustrato, las raíces absorben el agua de los poros más cercanos, esta debe ser repuesta transportándola desde los poros más alejados. La capacidad para transportar agua y reponer el equilibrio, es una característica del sustrato y depende de las características del espacio poroso y la conductividad hidráulica (Chamú, 2010)

El consumo de oxígeno produce una asfixia radical, que reduce la capacidad de la planta para absorber el agua disponible en el sustrato. Para un sustrato, cuanto más elevada sea la disponibilidad de agua, menor será la del aire y es posible que se presente esta situación de asfixia, en la que toda el agua disponible no es útil para la planta, por la reducción de la capacidad de absorción (Baldares, 2002). Las características de la planta determinan las condiciones físicas, disponibilidad de aire y agua que debe haber en el entorno radical para cubrir las necesidades de esta, para conseguir esto dependemos de las características físicas del sustrato y el manejo del agua de riego (Chamú, 2010).

3.9.7. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Es un proceso reversible mediante el cual las partículas sólidas del suelo o sustrato adsorben iones de la fase acuosa y desadsorben al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes para establecer el equilibrio entre ambas fases (Baldares, 2002). Esta CIC es una medida de la aptitud de un sustrato para contener los nutrientes que se encuentran en él. En los sustratos orgánicos, la CIC procede de las superficies y las zonas de ruptura de las moléculas de celulosa, hemicelulosa y lignina, que constituyen las paredes celulares de las células vegetales (Quintero, 2001).

La CIC es la suma de todos los cationes intercambiables o complejo de cambio. La CIC depende del pH, los sustratos muy ácidos, o que tienen el complejo de cambio saturados de H^+ , liberan iones H^+ que se intercambian con los iones de la solución. Se podría saturar el complejo de cambio de un sustrato con iones determinados mediante una titulación, los cuales pueden mantenerse mediante aportes continuos de una misma solución (Avila, 2015). En los sustratos con CIC elevada, conviene cargar el complejo de cambio con cationes en equilibrio compatibles con la solución nutritiva. Estos cationes están disponibles para la planta y no son lixiviados por efecto del riego (Quintero, 2001).

3.10. Requerimientos edafoclimáticos

3.10.1. Temperatura

La temperatura promedio del pimiento oscila entre los 22°C a 28°C. El cultivo se vuelve muy vulnerable a bajas temperaturas debidas a que estas incitan la creación de frutos a una inferior dimensión, lo que puede ocasionar: alteraciones, baja calidad de polen y un menor cuajado de frutos el pimiento es una planta exigente en temperatura, las altas temperaturas provocan la caída de flores y frutos. La combinación de temperaturas de 15.6°C en la noche y 21.1°C en el día, unido a un alto nivel de humedad en el suelo, incrementa los niveles de fructificación (ortiz, 2020).

Las temperaturas óptimas para crear un buen equilibrio entre el crecimiento vegetativo y la fructificación están entre 22-23°C por el día y 18- 19°C por la noche, debiendo oscilar entre 15 y 20°C la temperatura del suelo (Sádaba, 2011). Por lo tanto, el pimiento necesita una temperatura alta para asegurar su primer crecimiento vegetativo y una temperatura más baja para la formación de las flores, teniendo en cuenta que durante el desarrollo de los frutos la temperatura del aire puede bajar hasta los 15-17°C por la noche. Las temperaturas inferiores a 10-12°C o superiores a 35°C son desfavorables para el desarrollo del fruto de cualquier modo (Palacios, 2023).

3.10.2. Humedad Relativa

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura. El cultivo de pimiento demanda de una HR en su periodo de crecimiento superior al 70% (Castorena M. V., 2008). Sin embargo, en periodo de floración y cuajado de fruto requiere de una HR óptima que está entre el 50-70%. Teniendo en cuenta si se presentan humedades relativas superiores a los rangos establecidos tiende a provocar enfermedades. Si existe una menor humedad relativa produce frutos azotados, también llamados soleados. (Placencia, 2023).

3.10.3. Luz

Es un factor imprescindible para llevar adelante una serie de procesos fisiológicos en las plantas, siendo el más importante de todos la "fotosíntesis". Los pigmentos vegetales involucrados en la fotosíntesis son las antocianinas (azul, hoja y púrpura en color), los carotenoides (naranjas y amarillos en color) que absorben 450-500 nm (azul y verde) y pueden cambiar energía con la clorofila para ayudar en la fotosíntesis; los fitocromos que absorben la luz roja (660 nm) y la luz roja extrema (730 nm) siendo responsables por la foto morfogénesis y por las respuestas de fotoperiodismo (Caldari, 2007).

La luz actúa sobre la asimilación de carbono, la temperatura de las hojas y en el balance hídrico, y en el crecimiento de órganos y tejidos, principalmente en el desarrollo de tallos, expansión de hojas

y en la curvatura de tallos, interviene también, en la germinación de semillas y en la floración (Navarrete, 2024). La luz y la temperatura están directamente correlacionadas. En mayores niveles de luz hay mayor temperatura y a mayores niveles de temperatura hay mayor transpiración y consumo de agua. A mayor luminosidad en el interior del invernadero se debe aumentar la temperatura, la humedad relativa (HR) y el gas carbónico (CO₂), para que la fotosíntesis sea máxima; por el contrario, si hay poca luz pueden descender las necesidades de otros factores (Caldari, 2007).

Es una planta exigente en luminosidad sobre todo en las primeras fases del crecimiento y en la floración, requiriéndose de 6-8 horas/sol/día.

3.11. Riego

El riego es un componente en el desarrollo de la agricultura que proporciona un equilibrio en la producción, en ese sentido la productividad de un cultivo se relaciona directamente con la cantidad de riego que recibe, por consiguiente, necesita ser tan uniformemente posible porque ese porcentaje representa el agua utilizada en el uso consuntivo del agua aplicada (Pereira, 2010). La aplicación de agua de riego es prioritaria para alcanzar grandes rendimientos en los cultivos, la programación del riego se hace en función de reponer la humedad del suelo antes de llegar al agotamiento crítico, es eficiente y no disminuye la producción del cultivo de pimiento (Palacios, 2023).

3.11.1. Fertilización

Es un tipo de sustancia o mezcla química o sintética utilizada para enriquecer el suelo y favorecer el crecimiento vegetal. Las plantas no necesitan compuestos complejos, del tipo de las vitaminas o los aminoácidos, esenciales en la nutrición humana, pues sintetizan todos los que precisan. Sólo exigen una docena de elementos químicos, que deben presentarse en una forma que la planta pueda absorber (Basantes, 2007). Dentro de esta limitación, el nitrógeno, por ejemplo, puede administrarse con igual eficacia en forma de urea, nitratos, compuestos de amonio o amoníaco

puro. Un fertilizante químico es un producto que contiene, por los menos, un elemento químico que la planta necesita para su ciclo de vida (Calero, 2013).

La característica más importante de cualquier fertilizante es que debe tener una solubilidad mínima en agua, para que, de este modo pueda disolverse en el agua de riego, ya que la mayoría de los nutrientes entran en forma pasiva en la planta, a través del flujo del agua. Estos elementos químicos o nutrientes pueden clasificarse en: macronutrientes y micronutrientes (Calero, 2013).

3.11.2. Fertirriego

El fertirriego es una técnica que por medio del desarrollo de un diseño hidráulico conduce una mezcla del fertilizante y agua de riego con el objetivo de dosificar uniformemente la aplicación del fertilizante en los cultivos. Para cumplir con el objetivo principal de esta técnica se debe tener conocimiento sobre el requerimiento de nutrientes, calidad de agua, consumo de agua, eficiencia de riego, solubilidad de los fertilizantes (Ulloa, 2016).

La fertirrigación comienza en el cabezal de riego, en donde son mezclados los fertilizantes (solución madre) e inyectados al sistema. Posteriormente esta disolución es conducida por tuberías y localizada en el suelo, donde puede ser absorbida por las plantas. Además, se ha aprovechado la misma red para aplicar los fertilizantes que van disueltos en el agua de riego lo que se ha denominado fertirrigación (Vidal, 2019). Sin embargo, el manejo requiere de mano de obra calificada que lo ejecute pues cualquier inexactitud puede ocasionar problemas graves al cultivo en especial durante los períodos en que la planta es más sensible (Ferreyra, 2005).

El pimiento es una planta muy exigente en N durante las primeras fases del cultivo, decreciendo la demanda de este tras la recolección de los primeros frutos en verde. La máxima demanda de fósforo coincide con la aparición de las primeras flores y con el periodo de maduración de las semillas. El potasio es determinante sobre la precocidad, coloración y calidad de los frutos, aumentando

progresivamente su necesidad, hasta que la planta se encuentra en plena producción donde se equilibra (Valencia, 2016).

El pimiento también es muy exigente en cuanto a nutrición de magnesio, aumentando su absorción durante la maduración (Rodríguez, 2021). Los fertilizantes de uso más extendido son los abonos simples en forma de sólidos solubles (Nitrato cálcico, nitrato potásico, nitrato amónico, fosfato mono potásico, fosfato monoamónico, sulfato potásico, y sulfato magnésico) y en forma líquida (ácido fosfórico y ácido nítrico), debido a su bajo coste y a que permiten un fácil ajuste de la solución nutritiva, aunque existen en el mercado abonos complejos sólidos cristalinos y líquidos que se ajustan adecuadamente (Valencia, 2016).

3.12. Estrategias de riego

3.12.1. Riego por monitoreo

La integración de estrategias de riego basadas en sensores y monitoreo en tiempo real puede optimizar el consumo de recursos, reduciendo tanto la demanda de agua como la energía asociada al bombeo y procesamiento de esta (Perea, 2023). Esto es esencial para lograr una producción eficiente y ambientalmente responsable en sistemas hidropónicos. Esta estrategia consiste en aplicar riegos de manera intermitente y evaluar en tiempo real el desarrollo vegetativo y generativo del cultivo, pudiendo aplicarlos cada dos horas durante 15 minutos, cada tres horas durante 30 minutos o de manera constante. Las tres alternativas funcionan, sin embargo, debemos elegir según la cantidad de agua de las que dispongamos (Ocaña, 2025).

3.12.2. Riego automatizado

El sistema de riego automatizado permite optimizar el uso del agua en cultivos a través de sensores que miden la humedad y la temperatura en la zona radicular de las plantas. La ventaja de regar cuando se ha excedido una temperatura determinada o bien por la detección o falta de humedad, permite que el cultivo no entre en estrés, con lo que se garantiza el mejor producto agrícola posible

(Araúz, 2023). Consiste en una red de unidades de sensores inalámbricos (USI), una unidad remota de información (URI) y un panel de control (PC), los cuales están enlazados por radio módems que permiten la transferencia de datos (Gándara, 2012).

3.12.3. Riego por pulsos

Esta técnica consiste en la aplicación de la solución nutritiva en intervalos cortos y de manera frecuente, varias veces por día. El riego por pulsos asegura una disponibilidad constante de agua para el cultivo, así como una conductividad eléctrica baja cercana a la raíz y a su vez mantiene fresca el área radicular, favoreciendo así una adecuada oxigenación. De esta manera, esta estrategia permite mantener una humedad superior al 95% dentro del cajón de cultivo y una temperatura estable entre 18 y 20 °C. Para lograr estos parámetros, se emplean nebulizadores que generan una neblina fina, favoreciendo la oxigenación de las raíces y una óptima absorción de nutrientes (Ocaña, 2025).

3.12.4. Riego por radiación acumulada

En los meses de verano, cuando no hay nubosidad es cuando se obtiene una mayor radiación y la evapotranspiración también mayor. Esto hace que la demanda de vapor de agua de la planta sea más alta, y que la frecuencia de riego sea más corta (Araúz, 2023). La activación del riego en base al parámetro de radiación acumulada es posible a través de los equipos de control. Con estos controladores se puede programar el riego en base a un valor de radiación acumulada que se debe alcanzar. De tal forma que el riego comenzará cuando se alcance ese valor. Cada vez que se comience un riego, el contador de radiación acumulada se reiniciará (0 Wh/m²) y comenzará a acumular radiación de nuevo (Marcilla, 2023).

En este método el riego se controla a partir de medidas de radiación solar tomadas con un piranómetro en el exterior del invernadero. Cuando se alcanza un cierto valor de radiación acumulada, que previamente habrá sido indicado en el programador, comienza un riego y el valor de radiación acumulada se pone a cero para iniciar un nuevo ciclo. (Millán, 2024)

En los invernaderos del área mediterránea, E_{Tc} se puede estimar empíricamente a partir de la radiación solar (R) utilizando la siguiente ecuación: $E_{Tc} = \alpha R_o \cdot t / \lambda$.

Donde λ es el calor latente de vaporización del agua, τ es la fracción de radiación solar transmitida por la cubierta del invernadero y α es un coeficiente de cultivo empírico adimensional obtenido de una regresión de E_{Tc} medida contra el término R . (Millán, 2024)

La E_c es fácil de implementar en un controlador de riego, ya que requiere medición, o conocimiento, de la radiación solar interior. Para calcular esto último, el coeficiente de transmisividad τ de la cubierta de invernadero debe ser determinado por el agrónomo o un asesor utilizando un radiómetro portátil. La presencia o ausencia de cal blanca puede tener un efecto muy grande sobre τ , que debe medirse siempre que se agregue o elimine parcialmente la cal blanca. Los valores de τ son un cálculo aproximado, ya que el polvo y la edad del plástico afectan a τ . Sin embargo, cualquier inexactitud en la estimación de τ será "absorbida" en el coeficiente empírico α (FAO, 2023).

Este método presenta inconvenientes, ya que la radiación no es el único parámetro climático determinante de la evapotranspiración del cultivo; otros parámetros climáticos como el déficit de presión de vapor (DPV) pueden tener importancia. Además, no se tiene en cuenta el estado de desarrollo del cultivo. Cuando se usa este método, se suelen producir desajustes en el riego a lo largo del día. Debido a sus limitaciones se utiliza en combinación con el de la medida del volumen de drenaje, denominándose método de bandeja activa que se describe a continuación. En el método combinado, el umbral de radiación acumulada para la activación del riego se va corrigiendo a lo largo del día en función del porcentaje de lixiviación obtenido en cada riego (FAO, 2023).

3.1. Bandeja activa

La bandeja activa es un dispositivo que mide automáticamente el volumen de drenaje aplicado en cada riego. Esta bandeja es similar a la de demanda descrita anteriormente. Se fabrica de fibra de vidrio y contiene dos unidades de cultivo. En uno de sus extremos tiene un pequeño recipiente donde se recoge el drenaje de los dos sacos de cultivo. Cuando el recipiente está lleno, es detectado

por un hidronivel que envía una señal eléctrica al programador de riego, el cual toma la lectura de ese volumen. Simultáneamente el recipiente se desagua por medio de una electroválvula situada en su fondo. El controlador calcula el porcentaje de drenaje sobre la base del volumen de drenaje medido y el agua aportada (Calderón, 2005).

El sistema utiliza también un sensor de radiación que mide la radiación global acumulada y la utiliza según se describe en el método de radiación, ajustándose el valor de radiación acumulada programada mediante la lectura del drenaje. En el control de riego se establecen dos consignas, el porcentaje de drenaje deseado y la radiación acumulada a la que se desea activar el riego. El equipo comprueba en cada riego si el drenaje ha sido el deseado y en caso contrario, modifica el valor mínimo de radiación para adelantar o retrasar el próximo riego. Este sistema es el más usado en invernaderos comerciales en Holanda presentando el inconveniente de que los ajustes se realizan a posteriori (Calderón, 2005).

3.2.Modelos de ETc

Para optimizar la producción de los cultivos, el contenido de agua en el medio radicular debe ser suficiente para que la planta pueda mantener tasas de transpiración máximas en un ambiente dado. Los modelos matemáticos que predicen el consumo hídrico de las plantas y su aplicación para el control del riego, se han desarrollado considerablemente en los últimos años con aplicaciones comerciales en invernaderos de alta tecnología. Para ello se requieren modelos que estimen la evapotranspiración del cultivo (ETc) con una alta precisión y a corto plazo (escala horaria). Para automatizar el riego, los modelos se integran en los controladores de riego y las tasas de ETc se suman en el tiempo para estimar la cantidad total de agua perdida desde el último riego. Cuando cierta cantidad de agua ha sido consumida, el riego se aplica de forma automática, aplicándose la ET consumida más un porcentaje de lixiviación (Millán, 2024).

3.3.Priva office Direct (Software utilizado en la empresa)

Es un sistema de automatización y gestión de invernaderos desarrollado por la empresa holandesa Priva, muy utilizado en horticultura de precisión a nivel mundial, incluyendo empresas exportadoras en Centroamérica. El software Priva Office Direct permite administrar y analizar con precisión todos los controles y parámetros de la operación, brindando una perspectiva detallada de los procesos durante un período de tiempo prolongado. Los paneles de Priva Office ofrecen una vista general clara y facilitan la comparación de mediciones de desempeño frente a los parámetros y cálculos definidos (Vera, 2012).

Priva Office Direct almacena los datos del computador de proceso en la nube de Priva, lo que permite tener acceso en línea al clima y los procesos del invernadero desde cualquier lugar, con solo un navegador y conexión a internet (Vera, 2012).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Lugar de desarrollo de la práctica

La práctica profesional supervisada (PPS) se desarrolló en la exportadora del Atlántico ubicada en el municipio de San Sebastián, Comayagua a unos 30 km del municipio de Comayagua en la carretera que conduce hacia El Salvador. En este lugar se registra un clima tropical, con temperaturas que varían desde los 18 hasta los 31 °C, una precipitación promedio de 1,400 mm anuales, la humedad relativa que puede ir desde un 68% hasta un 89%. En cuanto al relieve, es un valle que presenta buenas condiciones para la producción de hortalizas. La empresa se encuentra ubicada en la latitud 14°15'0" y longitud 87°37'59.88.



Figura.1. Ubicación de la empresa

4.2. Materiales y Equipo

4.2.1. Materiales

En la práctica profesional supervisada se utilizaron materiales como fichas técnicas, recipientes, balanza, termómetro, calculadora, equipo básico de protección, jarras graduadas, pH-metro, marcadores para etiquetar, reloj, goteros supletorios, cinta métrica, estación meteorológica, piranómetro, botas, pie de rey.

4.2.2. Métodos

Se aplicó la metodología participativa integrándose en cada una de las actividades de la empresa como, participación en las actividades de manejo agronómico del cultivo, inclusión en la utilización de la estrategia de riego utilizada, participación en la medición de los parámetros fisiológicos del cultivo

4.3. Desarrollo de la práctica

La práctica profesional supervisada se realizó en los invernaderos de la Exportadora del Atlántico de Corporación Dinant ubicada en el municipio de San Sebastián en el departamento de Comayagua en el centro de Honduras, la cual consistió en darle manejo agronómico al cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum*) y la influencia de la estrategia de riego basada en la acumulación de Joules.

4.3.1. Fase I: Inducción

En las instalaciones de la Exportadora del Atlántico en San Sebastián, Comayagua, se realizó una reunión introductoria la cual tuvo una duración de 4 horas, en donde se nos dio a conocer todas las

políticas que se deben seguir en la empresa como colaborador, con la finalidad de mantener un ambiente laboral adecuado para el mejor desenvolvimiento de sus trabajadores.

El proyecto cuenta con 20 invernaderos divididos en dos sectores, sector A y B. Cada invernadero también llamado módulo representa una hectárea, en el cual se cultivan principalmente tres variedades de chile morrón (*Capsicum Annuum*), variedad Felicita que es color rojo y más cultivado por su manejo y el precio en el mercado, la variedad Mozart que es color naranja y con altos rendimientos en número y peso del fruto y la variedad Cabriola que es color amarillo, con muy buenos números en cantidad y peso del fruto, y alto valor en el mercado.

En cada invernadero se encuentran cuadrillas formadas por 10 personas aproximadamente, estas son las encargadas de realizar las actividades culturales

4.3.2. Fase II: Aplicación de la estrategia de riego

La estrategia de riego utilizada en el proyecto fue por radiación acumulada, la cual consiste en medir energía de la radiación solar, con Joules como unidad de medida. El programa utilizado es el Priva Office Direct, el cual está equipado con una estación meteorológica que mide la radiación solar mediante un piranómetro. Esta se dividió en tres fases durante el día para poder adaptar el riego a la variación de la radiación.



Figura 2: Estación meteorológica

En la primera fase el riego se desencadena al acumular 105 Joules, en horas de la mañana cuando la planta activa su proceso fisiológico, esto se identificaba porque la humedad relativa dentro del invernadero se empieza a elevar y la planta comienza a transpirar, es aquí donde comenzaban mis

acciones, extendiendo las pantallas a un 70% para evitar daños en el fruto por quemadura de sol, así como también ayudar a sacar esa humedad relativa al quitar el 30% restante de la pantalla, dejando un espacio libre para que pueda ventilar y crear un ambiente equilibrado para poder regar sin causar estrés en la planta.

En la segunda fase se acumulan 95 Joules en las horas del mediodía, ya que generalmente en este periodo es en el cual medimos mayor cantidad de radiación solar y en la tercera fase que ya la radiación tiende a bajar en horas de la tarde, se hace al acumular 50 Joules. Esto nos permite adaptar la cantidad de agua y nutrientes que el cultivo necesita durante el día sin que la planta entre en un periodo de estrés y esto se vea en el rendimiento.

En caso de que la radiación acumulada del día no alcance a la cantidad de Joules establecidos, esto sobre todo en días nublados, el riego se desencadena por tiempo como segunda opción, el cual se hará en un promedio de 14 minutos entre cada turno y con una duración de 1.56 minutos. La cantidad de turnos durante el día varía, pero generalmente se hacen alrededor de 28 turnos.

La frecuencia y duración de cada riego dependía de la cantidad de radiación solar que había durante el día, a más soleado estuviera y mayor temperatura hubiese, menor sería el tiempo entre cada riego, esto para satisfacer la necesidad del cultivo en ese momento y evitar que entre en un periodo de estrés.

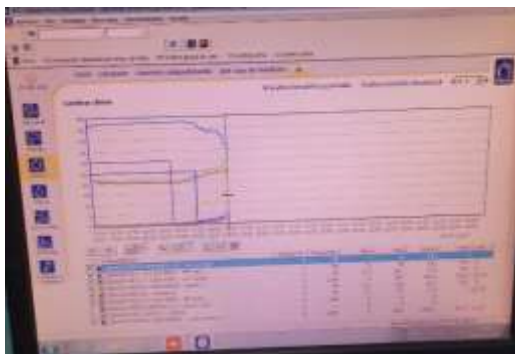


Figura 3: Software priva office direct



Figura 4: Cabezal de riego

4.3.3. Fase III: Prácticas de manejo agronómico al cultivo

En cada invernadero hay cuadrillas que son grupos de 10 personas aproximadamente, encargadas de todas las actividades culturales que se le hacen al cultivo, dirigidas por el jefe de área. Las actividades son cíclicas, es decir, se repiten cada cierto tiempo y son las siguientes:

Poda de fruto y brote: Esta consistió en hacerle a la planta una selección de frutos en la que quitamos toda la fruta con daños por quemadura de sol, deformes, maduración temprana, por daños con blossom, por picudo o daños por trips. Toda esa fruta es descarte y se llevaba en camiones hacia el área destino. El brote se le quita con la finalidad de inhibir el crecimiento vegetativo de la planta ya que lo que buscamos es número y peso del fruto. Esto se hace para dejar en la planta únicamente la carga de frutos que cumplen con los parámetros de calidad establecidos por el mercado, generalmente se dejan de 4-5 frutos por planta con características como tamaño, color y porcentaje de madurez, ideales para ser cosechadas en ese momento.

Colocación de planta en tutorado: Esta actividad consistió en colocar la planta en el tutorado hecho con cáñamo o cabuya con la finalidad de apoyar su crecimiento vertical, evitando que se quiebre por el peso que generan los frutos en la parte superior y reducir el riesgo de perderlos. Se hace el enrede en sentido de las horas del reloj, esto para no interrumpir el crecimiento natural de la planta, ya que si lo hacemos al contrario vamos en contra de los haces vasculares y esto dificulta el desarrollo natural de la planta.

Poda de hoja: Consistió en eliminar la hoja a unos 40-45 centímetros de altura desde la raíz de la planta, para poder mejorar la aireación, eliminar los chupones que le quitaban fuerza a la planta y servían como hospedero para mosca blanca y evitar problemas generados por humedad como botritis.

Encalado: Consistió en aplicar cal al suelo con la finalidad de reducir la humedad dentro de los invernaderos generada muchas veces por exceso de drenaje o por agua que entraba en raras ocasiones por las ventilas de la estructura.

Cosecha: Esta actividad consistía en retirar todos los frutos de la planta con características organolépticas como tamaño y color idóneas, que cumplieran con los requisitos establecidos por el mercado, para después ser procesadas en la planta de empaque y ser distribuidas a su país destino, tales como Estados Unidos y algunos países de Europa.

Control de malezas: Se realizó con la finalidad de quitar todos los hospederos de plagas y así reducir el daño que estas provocan en el cultivo. Esta actividad se hacía tanto dentro del invernadero de manera manual con ayuda del personal, así como también con aplicación de herbicidas por fuera de la estructura, sin dañar las barreras vivas. Esto cada fin de semana.

Muestreo de plagas y enfermedades: Esta actividad se hacía diaria, generalmente todas las mañanas, con la finalidad de ver la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo, identificando si el daño ha crecido, se mantiene o ha disminuido, esto nos ayuda a poder tomar acciones para su control. Con los datos que se obtenían de muestreo diario por la mañana, se hacía una programación con dosis y productos químicos seleccionados para tratar de resolver esos daños.

Aplicación de agroquímicos: Esto consistía en aplicar productos agroquímicos como foliares, herbicidas, fungicidas, peróxidos y demás, esto se hacía todos los días, comenzaba la aplicación a las 5 de la tarde para evitar pérdida del producto por deriva y también reducir los daños a la planta por aplicación y terminaba a las 9 o 10 de la noche, hasta que aplicaban en el último invernadero programado. Esto se hacía con la finalidad de controlar patógenos y malezas y reducir su incidencia en el cultivo.

4.3.4. Fase IV: Monitoreo de parámetros fisiológicos

El invernadero se divide en lado norte y sur, con 9 naves formadas por 6 camas cada una, teniendo un total de 98 camas en todo el módulo. Para llevar un registro de las mediciones fisiológicas y ver la respuesta de la planta ante el riego y manejo que se le estaba dando al cultivo, elegí un total de

96 plantas, dividiendo la hectárea en 4 puntos y ubiqué 24 plantas por lado las cuales serían monitoreadas una vez por semana, para ver el comportamiento fisiológico de la planta.

4.3.5. Variables para evaluar, tipo descriptivas

Crecimiento vertical de la planta: Se monitoreó cada planta seleccionada y se mide su crecimiento en centímetros desde la raíz hasta el botón floral, que se encuentra en la parte más alta de la planta. Esto se hizo una vez por semana, cada miércoles se medían y se registraban los datos y se comparaban con los datos de la semana anterior para ver su avance.

Cuaje: Se contabilizó la cantidad de cuaje nuevo que tenía cada planta, también cada miércoles, para conocer el efecto del riego y la nutrición que se le estaba dando, para conocer cuál era el tiempo que tardaba en cuajar una nueva fruta y su calidad. Esto para poder programar las semanas de cosecha posteriores y la cantidad de fruta que estaríamos sacando en esas semanas, en esto se programaban hasta tres semanas posteriores a la actual con el fin de darnos una idea de la cantidad de fruta que sacaríamos para entonces y ofrecérsela al mercado objetivo.

Número de frutos por metro: Este dato lo sacábamos contabilizando solo la fruta buena, sin ningún tipo de desviación o daño. Para hacer este conteo tomábamos 4 plantas compuestas por dos brazos cada uno, en promedio estos últimos tienen una carga de 5-6 frutas cada uno. Este conteo se hacía una vez por semana y según el porcentaje de madurez lo dividíamos en tres posteriores cosechas, las que estaban maduras el día del conteo a un 60% serían cosechadas la semana siguiente, también llamada primera semana, en la siguiente semana posterior a esa también llamada segunda semana se cosechaban la fruta sazona, y en la tercera semana posterior al día del conteo se cosecharía la fruta que empezaba a pintar o se miraban en ella pequeñas franjas de color marrón.

Era necesario hacer esta actividad para tener un estimado de la fruta que iremos sacando cada semana y adelantarnos a las actividades previas a eso, como cuestiones de empaque o pedidas de

contenedores para exportar la fruta, sin que hagan falta o traer demasiados y no poder llenarlos, ya que esto implicaría gastos innecesarios.

Diámetro del tallo: Este lo medimos apoyándonos en un pie de rey, se hace con la finalidad de conocer si el grosor de la planta es ideal en relación con la carga de fruta que tiene, si era muy delgado se hacían actividades de solución a esto, como quitarle la flor abierta y el botón blanco que aún no ha cuajado, esto para seguir ganando grosor en el tallo y ya no perder energía en un nuevo cuaje.

Peso del fruto: Este se monitoreó todos los días de cosecha de cada invernadero, generalmente son 4 días a la semana, se utilizó una balanza para tomar este dato y se llevó registro de cada variedad para saber cómo se comportaba con la semana anterior. Este monitoreo se hace para conocer el peso y ver si aumentar o mantener la dosis de los insumos en la receta que se está utilizando.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La práctica profesional supervisada se desarrolló entre los meses de enero a abril. Durante este periodo de tiempo se implementó la estrategia de riego por acumulación de radiación solar (Joules), mejorando la precisión al momento de suplir las necesidades del cultivo y esto lo pudimos observar en su rendimiento durante el ciclo.

5.1. Estrategia de riego por radiación acumulada

La estrategia de riego implementada consistió en la activación del sistema en función de la radiación solar acumulada durante el día, esta se expresa en Joules por metro cuadrado (J/m^2). El sistema operó en tres fases: en horas de la mañana el riego se activaba al acumular 70 J, al mediodía al alcanzar 95 J y por la tarde con 50 J acumulados. Esta permitía adaptar la frecuencia y volumen del riego a la demanda real del cultivo tomando en cuenta la evapotranspiración a lo largo del día.

Según los registros del control de riego, la radiación solar promedio fue de 2,446 J/día durante las semanas iniciales del ciclo, con desviaciones desde 1,705 J/día en las semanas más nubladas hasta 2,971 J/día en los días de mayor irradiación. En promedio, se ejecutaron 23 turnos diarios con un volumen de 50 ml por turno con una duración de 1.56 segundos. En días nublados que la radiación no alcanzaba los umbrales establecidos, el sistema activaba el riego por tiempo con intervalos de 14 minutos en promedio.

Los parámetros fisicoquímicos de la solución nutritiva se mantuvieron dentro de los rangos óptimos para el cultivo. La conductividad eléctrica (CE) de entrada promedio 2.2 mS/cm durante la etapa vegetativa, ajustándose de manera progresiva hasta 2.4-2.6 mS/cm en las etapas de floración y fructificación, que se encuentran en los rangos óptimos de 2-3 mS/cm reportado por Villaseñor (2024) para este cultivo. El pH se mantuvo estable entre 5.7 y 6.3, dentro del rango recomendado de 5.5-6.8 para cultivos (Quintero, 2001). El porcentaje de drenaje alcanzó valores

desde los 19% y 27% en las semanas de plena producción, lo que indica que hubo una correcta saturación del sustrato sin acumulación excesiva de sales. (Tabla 1)

Tabla 1. Parámetros promedio del control de riego por radiación acumulada

Parámetro	Fase inicial (Sem. 1-6)	Fase vegetativa (Sem. 7-12)	Plena prod. (Sem. 13-17)	Unidad
N° turnos/día	2 – 5	10 – 18	17 – 23	turnos
Volumen/turno	40 – 50	50	50 – 53	ml
CE entrada	2.1 – 2.5	2.1 – 2.4	2.4 – 2.6	mS/cm
pH entrada	5.7 – 6.0	5.8 – 6.3	6.0 – 6.5	unidades
% Drenaje	0 – 5	14 – 22	19 – 28	%
Joules/día promedio	2,446 – 2,971	2,157 – 2,651	1,705 – 2,322	J/m ²

Fuente: Elaboración propia con datos del control de Riego 2025-2026, Exportadora del Atlántico

5.2.Crecimiento vegetativo del cultivo

El crecimiento vegetativo del cultivo bajo esta estrategia mostró un comportamiento diferenciado. En la semana 5 del ciclo se registró el crecimiento semanal con un promedio de 10.4 cm/semana en todos los módulos. Este valor es consistente con lo reportado por Núñez (2017), quien señala que el pimiento en condiciones de buen suministro hídrico puede alcanzar 10-15 cm por semana. (Tabla 2)

A partir de la semana 6, el crecimiento se redujo progresivamente en un rango de 1 a 3 cm/semana durante la etapa productiva, lo cual indica un balance entre el crecimiento vegetativo y la carga de frutos. Según Palacios (2023), un crecimiento semanal de 5-10 cm durante la fase productiva es considerado ideal para este cultivo, ya que los valores superiores indican un exceso de vigor vegetativo en pérdida del rendimiento. El crecimiento promedio general para todo el ciclo fue de 8.4 cm/semana. (Figura 1)

Tabla 2. Crecimiento vertical promedio del cultivo por semana

Semana	Crecimiento promedio (cm/sem)	Fase Fenológica
1	5.6	Crecimiento vegetativo
2	6.7	Crecimiento vegetativo
3	7.3	Crecimiento vegetativo
4	8.1	Crecimiento vegetativo
5	10.4	Crecimiento vegetativo
6	9.8	Inicio de producción
7	8.6	Plena producción
8	6.7	Plena producción
9	6.8	Plena producción
10	6.5	Plena producción
11	6.1	Producción continua

Fuente: Elaboración propia con datos de Mediciones fisiológicas 2026, Exportadora del Atlántico

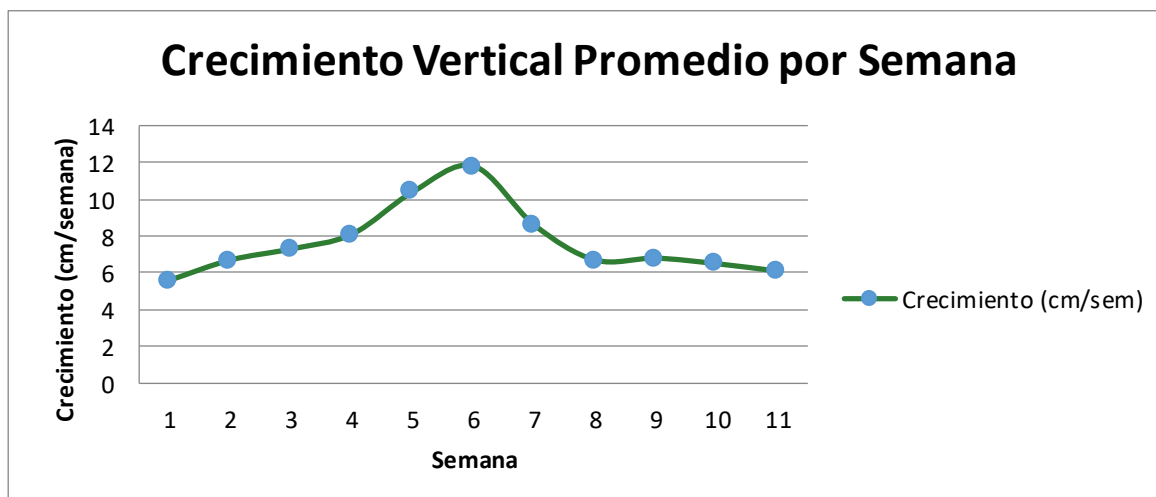


Figura 5: Crecimiento vertical promedio por semana

5.3. Diámetro del tallo

El diámetro del tallo fue monitoreado semanalmente mediante un pie de rey, y se clasificó los tallos en dos categorías: menores a 5 mm y mayores a 5 mm. Al inicio del ciclo, el 100% de los tallos medidos presentaron un diámetro mayor a 5 mm (promedio de 48 tallos >5 mm por metro

cuadrado en la semana 1 y 2), lo que reflejó un excelente estado vegetativo de las plantas. (Figura 6) A medida que avanzó el ciclo y la carga de frutos aumentó, se observó un incremento gradual en la proporción de tallos con diámetro menor a 5 mm, especialmente a partir de la semana 5, cuando comenzaron a registrarse 2–4 tallos delgados por metro cuadrado. (Tabla 3)

Este comportamiento es normal en este cultivo al haber alta carga de frutos, y fue atendido mediante la práctica de eliminación de flores abiertas y botones no cuajados en las plantas que mostraban tallos con diámetros deficientes, permitiendo recuperar el grosor del tallo. Esta práctica, junto a un adecuado suministro hídrico y nutricional apoyado en la estrategia de riego, mantuvo el grosor promedio de los tallos activos en un rango de 5–6.8 mm durante toda la etapa productiva, valor considerado óptimo para sostener la carga de frutos de las tres variedades evaluadas.

Muestra	Plantas < 5mm	Plantas > 5mm	Total
M1	15	32	47
M2	19	28	47
M3	22	25	47
M4	25	22	47
M5	29	18	47
M6	33	14	47
M7	35	12	47
M8	30	17	47
M9	25	22	47
M10	20	27	47
M11	18	29	47
M12	20	27	47
M13	21	26	47
Total	312.0	299.0	611.0
Promedio	24.0	23.0	47.0
Máximo	35.0	32.0	47.0
Mínimo	15.0	12.0	47.0

Tabla 3: Diámetro del tallo



Figura 6: Plantas con diámetro menor a 5 mm y mayor a 5 mm por muestra

5.4. Cuaje y número de frutos por metro cuadrado

El cuaje de frutos mostró una progresión positiva a lo largo de las primeras semanas. A partir de la semana 3, el cuaje se incrementó de manera sostenida, alcanzando su punto máximo en la semana 6 con un promedio general de 20.4 frutos por m², que representó el punto de mayor carga de frutos en toda la temporada. (Figura 2)

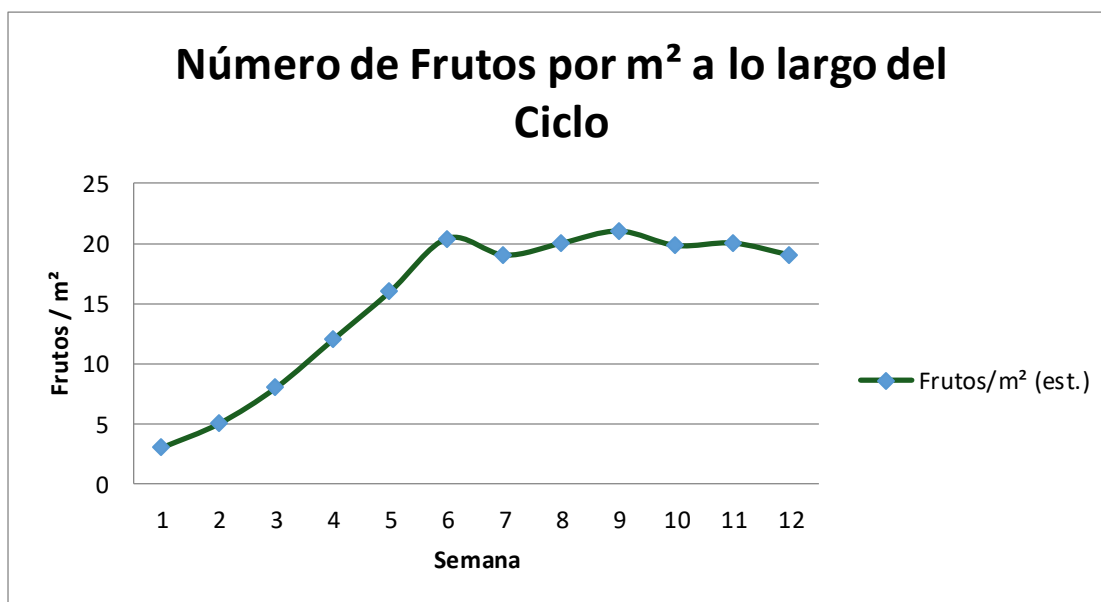


Figura 7: Número de frutos por m² a lo largo del ciclo

Una vez alcanzado el punto óptimo de carga de frutos establecido en 15 frutos por m², la empresa implementó estrategias de manejo como la poda de flores y la eliminación de botones blancos para mantener el equilibrio entre la carga de frutos y el vigor vegetativo de la planta. Como resultado, el número de frutos por metro cuadrado se estabilizó en un rango de 15 a 22 frutos/m² durante toda la fase de plena producción (semanas 6-12), con un promedio de 19.8 frutos/m² en los módulos evaluados.

La variedad Felicitas (rojo) demostró la mayor consistencia en la producción, manteniendo regularmente valores cercanos a 20–23 frutos/m². La variedad Cabriola (amarillo) alcanzó los valores más altos de cuaje acumulado, llegando en algunos módulos a 22–24 frutos/m². Mozart (naranja) mostró valores ligeramente inferiores en los módulos de trasplante más tardío, pero se estabilizó en rangos similares a partir de la semana 8. Estos resultados coinciden con lo

reportado por Sánchez (2017), quien señala que, bajo condiciones controladas de invernadero con adecuado suministro hídrico, el pimiento morrón puede mantener de manera sostenida una carga de 15–22 frutos por metro cuadrado.

El peso del fruto constituyó uno de los indicadores más relevantes del rendimiento en este cultivo, dado que el mercado de exportación establece requisitos de calidad basados en el peso y calibre del fruto. Los registros de cosecha mostraron que el peso promedio del fruto varió según la variedad, la etapa del ciclo y las condiciones de manejo.

La variedad Felicitas (rojo) registró un peso promedio de 199.8 gramos por fruto durante la etapa de plena producción (semanas 6-12), con valores máximos que superaron los 230 gramos en semanas de alta radiación y adecuado manejo de carga. La variedad Mozart (naranja) presentó un peso promedio de 195.6 gramos, ligeramente inferior al de Felicitas. La variedad Cabriola (amarillo), por su parte, alcanzó los pesos más altos del ciclo, con promedios superiores a 215 gramos y valores máximos de hasta 240 gramos en semanas con condiciones óptimas de manejo. (Figura 3). Estos pesos superan los valores mínimos de 150–180 gramos exigidos por los mercados de exportación para la categoría Premium, lo que representa un resultado positivo de la estrategia de riego implementada. (Tabla 3)

Tabla 3. Peso promedio del fruto por variedad en etapa de plena de producción

Variedad	Color	Peso prom. (gr)	Rango observado (gr)
Felicitas	Rojo	199.8	170 – 234
Mozart	Naranja	195.6	177 – 228
Cabriola	Amarillo	215.3	180 – 241

Fuente: Elaboración propia con datos de Mediciones Fisiológicas 2026, Exportadora del Atlántico.

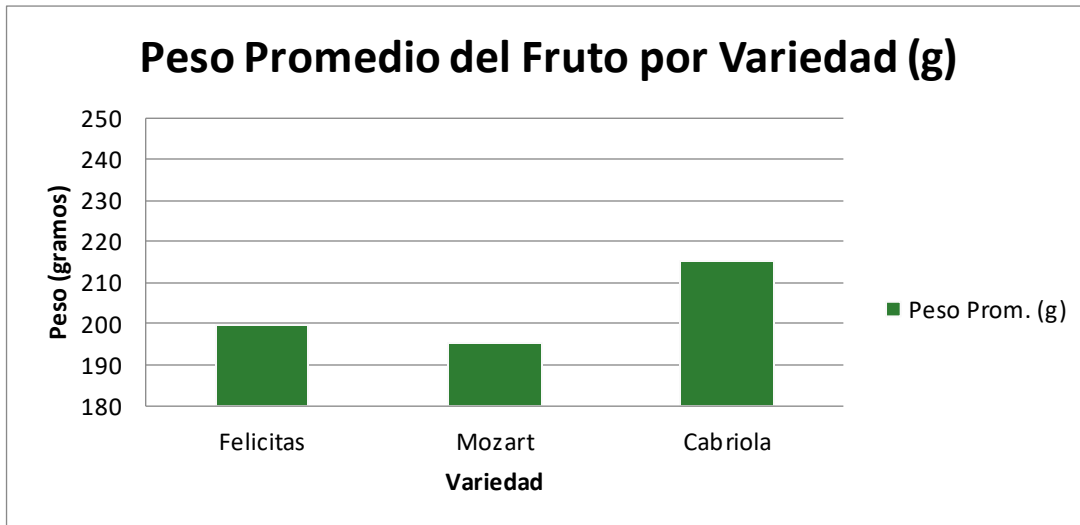


Figura 8: Peso promedio del fruto por variedad

5.5. Porcentaje de frutos Premium

El porcentaje de frutos Premium, definido como aquellos frutos que cumplen con los estándares de peso, calibre y calidad visual exigidos por el mercado de exportación, fue monitoreado semanalmente a partir de la semana 4, cuando iniciaron las primeras cosechas. Los resultados mostraron que la estrategia de riego por acumulación de Joules contribuyó de manera positiva en la calidad del fruto.

Durante las semanas de mayor estabilidad en el riego (semanas 6-12), el porcentaje de frutos Premium se mantuvo entre 73% y 96% para las tres variedades, con un promedio general del ciclo de 74.8%. Los valores más altos se registraron en la variedad Felicitas (Módulo 8), que alcanzó un 96% de Premium en la semana 9, y en Cabriola (Módulo 15), que obtuvo un 96% en la semana 9. Las semanas con menor porcentaje Premium (46–70%) coincidieron con períodos de alta carga de frutos y reducción del peso individual por fruto, lo que es un comportamiento esperado cuando la planta distribuye su energía entre un mayor número de frutos.

Estos resultados son superiores a los promedios reportados para la región bajo sistemas convencionales de producción al aire libre, donde el porcentaje de frutos de exportación raramente supera el 60–65% (SAG, 2021). Esto confirma que el sistema de riego por radiación

acumulada, combinado con las prácticas de manejo agronómico implementadas, permitió obtener una producción de alta calidad sostenida a lo largo del ciclo.

VI. CONCLUSIONES

La estrategia de riego por acumulación de radiación solar (Joules) influyó de manera directamente y de manera positiva en el desarrollo vegetativo y generativo del cultivo. Al vincular directamente la activación del riego con la demanda real de evapotranspiración del cultivo, medida a través de tres umbrales diarios (70,95,90 J/m²), logrando un suministro hídrico continuo y proporcional a las necesidades reales del cultivo de pimiento y esto se reflejó en la calidad y rendimiento (Kg) de la producción.

El monitoreo de los parámetros fisiológicos del cultivo evidenció que la estrategia de riego permitió mantener condiciones óptimas en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. La conductividad eléctrica de entrada se mantuvo entre 2.1 y 2.6 mS/cm ajustándose de manera progresiva a la etapa fenológica, y el pH se estabilizó entre 5.7 a 6.5, favoreciendo la correcta absorción de nutrientes contribuyendo así a una alta producción.

El análisis del efecto de la frecuencia y volumen de riego sobre el crecimiento vegetativo mostró resultados consistentes con lo esperado para el cultivo. Durante la etapa vegetativa se registró un crecimiento máximo de 10.4 cm/semana en la semana cinco, se estabilizó en las semanas siguientes en un rango de crecimiento de 6-9 cm/semana durante la etapa productiva, considerado muy bueno para mantener el equilibrio entre el crecimiento vegetativo y la carga de frutos.

Las tres variedades que se cultivan en el proyecto (felicita, Mozart y Cabriola) mostraron un comportamiento productivo que logró ser consistente, el Cabriola destacó por el mayor peso promedio por fruto (215.3 g) y la variedad Felicita por su mayor consistencia a lo largo del ciclo productivo.

La ejecución oportuna de las actividades agronómicas resultó complementaria para maximizar el efecto de la estrategia de riego por acumulación de energía en el rendimiento del cultivo, integradas al suministro de nutrientes mediante fertirriego, demostrando que los mejores resultados en producción bajo invernadero se alcanzan cuando el manejo del cultivo y nutrición actúan de manera conjunta.

VII. RECOMENDACIONES

7.1. Recomendaciones a la Exportadora del Atlántico

Se sugiere revisar y en todo caso actualizar los umbrales de activación (70, 95 y 50 Joules por fase al día) al inicio de cada temporada, debido a que las variaciones climáticas pueden afectar la evapotranspiración del cultivo.

Es recomendable fortalecer el monitoreo del drenaje y mantenerlo entre 20% y 30%, para evitar deficiencias hídricas o acumulación excesiva de sales en el sustrato. Asimismo, es recomendable realizar ajustes de conductividad eléctrica de la solución nutritiva, llevándola de 2.1 a 2.5 mS/cm con la finalidad de mejorar el tamaño y peso del fruto, sin causar daños importantes en este último ya que fuera de este rango causaríamos quemaduras al fruto o no habría cuaje por falta de nutrientes.

Para mejorar el porcentaje de frutos Premium, se recomienda mantener la carga como máximo de 5 frutos para cosecha, realizando de manera oportuna la eliminación de flores abiertas, botones blancos y frutos de cuaje nuevo con daños por quemadura de sol, esto cuando la planta presente tallos con un diámetro inferior a 5 mm.

7.2.Recomendaciones a la Universidad Nacional de Agricultura

Se recomienda a la Universidad Nacional de Agricultura fortalecer los contenidos y prácticas relacionados con el sistema de invernadero. En este proyecto se evidenció que la formación recibida en estas áreas es general y superficial.

Se recomienda gestionar alianzas con empresas del sector agropecuario, que permita a los estudiantes realizar visitas técnicas, pasantías y prácticas de campo en instalaciones de producción intensiva como invernaderos o casas malla, ya que esto prepara al estudiante al entorno productivo real y reducirían las semanas de aprendizaje de estas áreas a la empresa, aprovechando más completo el tiempo disponible.

Se sugiere que la Universidad Nacional de Agricultura refuerce el proceso de seguimiento y acompañamiento durante la práctica profesional supervisada, asignando visitas periódicas del asesor académico al sitio de práctica. Este acompañamiento facilitaría la orientación del estudiante en la sistematización de los datos recolectados, la vinculación de los resultados observados con la teoría aprendida en el aula.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Cosecha de fruta



Anexo 2: Monitoreo de parámetro fisiológicos



Anexo 3: Pesado del fruto



Anexo 4: Poda de hoja



Anexo 5: Colocación de la planta en tutorado



Anexo 6: Aplicación de productos químicos



Anexo 9: Pantallas



Anexo 10: Control de malezas



IX. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, B. (2002). *El pH y la CE de la solución Nutritiva*. Obtenido de https://www.fertilab.com.mx/AdminFertilab/Notas_Tecnicas/pdf_nota/El_pH_y_la_CE_de_la_Solucion_Nutritiva.pdf
- Aguilar, R. (2014). *La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada*. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a12.pdf>
- Ansonera. (1994). *Respuesta del pimiento morrón al secado parcial de la raíz y sustratos en hidroponía e invernadero*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/259910311_Propiedades_uso_y_manejo_de_sustratos_de_cultivo_para_la_produccion_de_plantas
- Araúz, A. V. (2023). *Programación de riego a través del uso de sensores de humedad y monitoreo de la evotranspiración*. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/d9d8a3d2-c744-4555-8786-3cdb29b3249d/content>
- Asaduzzaman, M. (2022). *Reciclaje de nutrientes en hidroponía: Oportunidades y desafíos hacia la producción sostenible de cultivos en agricultura de ambiente controlado*. Obtenido de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8964292/pdf/fpls-13-845472.pdf>
- Avila, A. R. (2015). *Comparación de los métodos de determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la región central de Honduras*. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/165e509b-152c-4780-b524-c874b297e16e/content>
- Azcón, J. (2008). *Fundamentos de Fisiología vegetal*. Obtenido de <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetalAzcon.pdf>
- Baldares, P. C. (2002). *Utilización de técnicas hidropónicas para la propagación de especies forestales*. Obtenido de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/752/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Banegas, O. I. (2003). *Hidroponía en el Área rural*. Obtenido de <https://dicta.gob.hn/files/2003,-Hidroponia-en-el-area-rural-G.pdf>

- Barbaro, L. (2023). *Sustratos y sus principales propiedades*. Obtenido de https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/15267/INTA_CR_Misiones_EEACerroAzul_Barbaro_L_%20Sustratos_Principales_propiedades.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bartolón, J. d. (2022). *¿Cómo construir un sistema de hidroponía para tener un huerto en mi escuela?* Obtenido de <https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/ecoagua/ecoagua-sistema-hidroponia-para-huerto.pdf>
- Basantes, V. J. (2007). *Evaluación del efecto de la aplicación del abono líquido foliar orgánico de estiércol de conejo, enriquecido con micro elementos de la producción de forraje y semilla de la Poa Palustris*. Obtenido de <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/789466ea-cc98-4a56-b892-c81fcfc1f8f/content>
- Begoña Castellanos, F. c. (marzo de 2026). *Evaluación económica comparativa del cultivo de pimiento en invernadero bajo manejo convencional y orgánico*. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/agriculture16080889>
- Beltrano, J. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Cabrera, J. C. (2009). *Evaluación del consumo de agua y nutrientes en chile (Capsicum annuum) variedades Taranto, Zidenka y Sympathy, en hidroponía*. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/c7f8665b-8144-4f52-9191-3174e5ceb5b9/content>
- Caldari, P. (2007). *Manejo de luz en invernaderos. Los beneficios de la luz en el cultivo de hortalizas*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/slideshow/manejo-de-laluzeninvernaderos/32683104#4>
- Calderón, F. (2005). *Bandeja de riego a la demanda*. Obtenido de http://www.drcalderonlabs.com/Aparatos/Bandeja_de_Riego.htm
- Calero, P. (2013). *“Producción de pimiento (Capsicum annuum. L) híbrido marconi con cuatro distancias de siembra y fertilización química en las naves*. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/ba64606c-3ac3-4057-bb77-997efe738606/content>
- Campos, C. H. (2024). *Potencial hídrico y contenido del agua en el suelo: Métodos de análisis disponibles y sus implicaciones en el manejo de los recursos suelo y agua*. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v48n2/0377-9424-ac-48-02-169.pdf>

- Casanova, M. (2018). *Modelación elastoplástica de la curva de retención de agua en suelos parcialmente saturados*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/entities/publication/ae88edbe-ce74-48d4-ac7d-f496070a57b0>
- Castorena, E. A. (2014). *Producción hidropónica de chile en invernadero*. Obtenido de http://cenid-raspa.inifap.gob.mx/demo/modulo/Folletos%20tecnicos/2014/34_Producci%C3%B3n%20hidroponica%20de%20chile%20Habanero%20en.pdf
- Castorena, M. V. (2008). *Producción hidropónica de chile pimiento en invernadero* . Obtenido de http://cenid-raspa.inifap.gob.mx/demo/modulo/Folletos%20tecnicos/2008/10_Producci%C3%B3n%20Hidrop%C3%B3nica%20de%20Chile%20Pimiento%20en%20Invernadero.pdf
- Cázares, M. (2004). *PRODUCCIÓN DE PEPINO EN CULTIVO SIN SUELO BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO*. Obtenido de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/463/1/Maria%20de%20Sagrario%20Oyervides.pdf>
- Chamú, J. a. (2010). *Respuesta del pimiento morrón al secado de la raíz y secado en hidroponía e invernaderos*. Obtenido de http://193.122.196.39:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/219/Chamu_Baranda_JA_MC_Hidrociencias_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chávez, E. (2006). *Manual para la preparación de soluciones nutritivas* . Obtenido de https://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/unesp_jaboticabal/Manual_Soln_Nutritivas.pdf
- FAO. (2023). Obtenido de Evapotranspiración del cultivo: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f3660258-d07f-487e-b3c1-01661c83cb16/content>
- Fernández, M. (2014). *Dinámica de la salinidad en los suelos* . Obtenido de http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2014/05_SALINIDAD_EN_SUELOS_ESPANOL.pdf
- Ferreya, B. M. (2005). *Manejo del riego localizado y fertirrigación. Instituto de investigaciones agropecuarias*. Obtenido de <https://alimentacion.conahcyt.mx/glifosato/descargables/alternativas/materiales/Manejo%20de%20riego%20localizado%20y%20fertirrigaci%C3%B3n.pdf>
- Gándara, M. Á. (2012). *SISTEMA DE RIEGO*. Obtenido de <https://www.cibnor.gob.mx/personal/bmurillo/hierbas/docs/sistema-riego-automatizado-final.pdf>

- García, R. (2015). *Metodos de desinfección de sustrato* . Obtenido de http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2839/Lopez_Garcia_R_Fruticultura_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gilsanz, J. (2007). *Hidrorponía* . Obtenido de <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/520/1/11788121007155745.pdf>
- Granada, E. S. (2019). *Estimación de la degradación del agua mediante la relación de absorción de sodio(RAS) en el sistema de riego Tumbaco*. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/f8fd07c0-9be6-4976-8aa3-54659bc365ad/content>
- Guzmán, M. (2013). *Tecnologías para el uso sostenible del agua* . Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/tecnologias-para-el-uso-sostenible-del-agua.pdf
- Hamdy. (2003). *RESPUESTA DEL PIMIENTO MORRÓN AL SECADO PARCIAL DE LA RAÍZ Y SUSTRATOS EN HIDROPONÍA E INVERNADERO*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263119820008.pdf>
- Jones, H. G. (2004). *eficiencia del uso del agua en biología vegetal*. Obtenido de https://www-researchgate-net.translate.google.com/publication/284154990_What_is_water_use_efficiency?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc
- Marcilla, M. d. (2023). *Riego solar directo con estimación de radiación diaria* . Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/65520/TFG-I-2766.pdf;jsessionid=5F1C9CB0010A7EC15F2BF59AA93E0DF8?sequence=1>
- Mendez, J. (2015). *COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO DE Capsicum annum L., Lycopersicon esculentum M. Y Cucumis melo L. BAJO CULTIVO PROTEGIDO HIDROPÓNICO UTILIZANDO LA SOLUCIÓN UNIVERSAL DE STEINER*. Obtenido de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6413/comportamiento_agron%C3%B3mico_capsicum_anuum.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Millán, F. (2024). *Desarrollo de un sistema para riego inteligente basado en monitorización de diferentes parámetros ambientales en cultivos sin suelo*. Obtenido de <https://repositorio.upct.es/entities/publication/eefe46e3-79dd-46b5-9138-e51cbd2c2033>
- Morales, A. (2002). *Fertirrigación para la producción de hortalizas en áreas pequeñas*. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/39921362-d31a-4b4c-a934-a3c9444307d4/content>

- Navarrete, C. E. (2024). *La luz y su efecto en las plantas* . Obtenido de <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000009563.pdf>
- Núñez. (2017). *Respuesta agronómica del cultivo de pimiento (Capsicum annuum L) a dos condiciones de riego*. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Agronomic_response_of_the_pepper_Capsicum_annuumL_.pdf
- Ocaña, K. B.-M.-D.-B. (2025). *Frecuencias de riego en sistema hidropónico en el desarrollo del cultivo de acelga*. Obtenido de DOI: <https://doi.org/10.23857/pc.v10i1.8717>
- Olvera, V. (2016). *Invernadero hidropónico automatizado en riego* . Obtenido de https://www.repositorioinstitucionaluacm.mx/jspui/bitstream/123456789/365/3/VERONICA%20OLVERA%20RODRIGUEZ_ISEI_locked.pdf
- ortiz, G. (2020). *INCIDENCIA DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE EL CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DEL PIMIENTO*. Obtenido de <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/5771/1/Ortiz%20Rivera%20Gabriela%20Elizabeth.pdf>
- Palacios, F. R. (2023). *Respuesta de dos variedades de pimiento (Capsicum annuum L.) a una estrategia de fertirrigación en campo acolchado* . Obtenido de <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/5787/1/Rivera%20Palacios%20Idder%20Fabian.pdf>
- Perea, R. G. (2023). *La gestión inteligente del agua de riego a través de la tecnología* . Obtenido de <https://www.upa.es/Anuario2023/024-Anuario-2023-Camacho-Gonzalez.pdf>
- Pereira, L. S. (2010). *El riego y sus tecnologías* . Obtenido de https://crea.uclm.es/down_files/El_Riego_y_sus_Tecnologias.pdf
- Placencia, M. A. (2023). *Estudio de factores que afectan el rendimiento de pimiento*. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d6f18e9c-7947-4858-9217-c5ba741a4804/content>
- Quintero, C. G. (2001). *Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte*. Obtenido de [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Sustratosparacultivoshortcolasyfloresdecorte%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Sustratosparacultivoshortcolasyfloresdecorte%20(2).pdf)
- Ricardo Fernández, M. M. (2018). *Sustrato biofísico para agricultura protegida y urbana a partir de compost y agregados provenientes de los residuos sólidos*. Obtenido de <https://doi.org/10.20937/rca.2018.34.03.02>

- Roblero, J. U. (2021). *Índices de salinidad y de sodicidad en las aguas residuales del alto y bajo pánuco*. Obtenido de http://www.cm.colpos.mx/meteoro/tesishid/tesis/2021-08-Avelar_Roblero_JU_DC_Hidrociencias.pdf
- Rodrigo Maia, D. Z. (2014). *Mejorar el riego eficiente en el uso del agua*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>
- Rodríguez, J. s. (2021). *Fertilización en el cultivo de pimiento (capsicum annum) en el distrito de Caazapá*. Obtenido de <https://www.pubiabm.com.py/wp-content/uploads/2022/07/Juan-Arzamendia-TFG.pdf>
- Rodríguez, M. Á. (2021). *Diseño de un sistema de riego solar fotovoltaico para la evaluación de la fenología en chile*. Obtenido de <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-DesignOfAPhotovoltaicSolarIrrigationSystemForTheEv-10310062.pdf>
- Rodríguez, V. (2016). *Invernadero hidropónico automatizado en riego, con monitoreo de pH, conductividad eléctrica y control de variables climáticas*. Obtenido de https://www.repositorioinstitucionaluacm.mx/jspui/bitstream/123456789/365/3/VERONICA%20OLVERA%20RODRIGUEZ_ISEI_unlocked.pdf
- Sádaba, S. (2011). *Guía de cultivo de pimiento en invernadero* . Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/arpim_guia.pdf
- Sadzawka, A. (2006). *Métodos de análisis de aguas para riego*. Obtenido de <https://www.schcs.cl/wp-content/uploads/2018/11/Analisis-de-aguas-para-riego.pdf>
- Sáenz, F. C. (2021). *Sustratos en Hidroponía* . Obtenido de http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Curso_Hidroponia/Sustratos/Los_Sustratos.htm
- Salazar, A. R. (2014). *La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada*. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a12.pdf>
- Sánchez, C. M. (2020). *Fertilizantes para fertirriego*. Obtenido de <https://www.riego.mx/files/webinars/webinar13.pdf>
- Sánchez, F. (2017). *PRODUCCIÓN DE PIMIENTO MORRÓN(Capsicum annum) EN CICLOS CORTOS*. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n4/1405-3195-agro-51-04-00437.pdf>
- Santiago López, J. V. (2022). *Automatización del control de nutrientes en hidroponía mediante el uso de un sistema embebido* . Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9042908>
- Serrano, F. R. (2004). *Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernadero* . Obtenido de

https://www.academia.edu/27322126/Selecci%C3%B3n_de_sustratos_para_la_producci%C3%B3n_de_hortalizas_en_invernadero

- Torres, O. G. (2022). *Propiedades físicas y químicas de sustratos en función de su granulometría y componente orgánico mineral*. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-PropiedadesFisicasYQuimicasDeSustratosEnFuncionDeS-9143094.pdf
- Ulloa, A. M. (2016). *Fertirriego en Ecuador, presente y futuro. Quito: Congreso Ecuatoriano de las ciencias del suelo*. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/3.-FertirriegoenEcuador.pdf
- Valencia, S. (2016). *El pimiento en invernadero con fertirrigación. Universidad Autónoma de México*. Obtenido de <https://core.ac.uk/reader/80531984>
- Valenzuela, O. R. (2013). *Elección del sustrato y manejo del riego utilizando como herramienta las curvas de retención de agua*. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Eleccion_del_sustrato_y_manejo_del_riego.pdf
- Vera, A. A. (2012). *Fertirrigación del pimiento dulce en invernadero*. Obtenido de <https://www.horticom.com/tematicas/pimientos/pdf/capitulo5.pdf>
- Vidal P., I. (2019). *Fertirrigación: Desde la teoría a la práctica*. Obtenido de <https://irrifer.cl/wp-content/uploads/2021/08/Fertirrigacion-de-la-teoria-a-la-practica.pdf>
- Vidal, A. (2021). *Diseño de un sistema de riego solar fotovoltaico para la evaluación de la fenología en Chile*. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-DesignOfAPhotovoltaicSolarIrrigationSystemForTheEv-10310062.pdf
- Villaseñor, R. H. (2024). *Qué es la conductividad eléctrica?* Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20conductividad%20el%C3%A9ctrica_%20-%20Hydro%20Environment%20-%20Inovaci%C3%B3n%20Agrícola%20en%20un%20click.pdf
- Zambrano, A. (2019). *Efecto del riego deficitario en la etapa de inicio y desarrollo del cultivo de pimiento (Capsicum annuum)*. Obtenido de <https://repositorio.uleam.edu.ec/bitstream/123456789/2298/1/ULEAM-AGRO-0052.pdf>