

Universidad de Pamplona



Adecuación del Invernadero para la Producción de Semilla de Papa *Solanum grupo phureja* Juz. & Bukasov. en el Municipio de Pamplona

Jefersson Jahir Barrios Villamizar

CC. 1005040776

Programa Ingeniería Agronómica

Diciembre 2024

Universidad de Pamplona



Adecuación del Invernadero para la Producción de Semilla de Papa *Solanum grupo phureja* Juz. & Bukasov. en el Municipio de Pamplona

Jefersson Jahir Barrios Villamizar

CC. 1005040776

Trabajo de grado modalidad de investigación presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Agrónomo

Director: M.Sc. Javier Francisco Castellanos Martínez

Facultad de Ciencias Agrarias

Programa de Ingeniería Agronómica

Diciembre 2024

CONTENIDO

1. Introducción.....	8
2. Problema.....	10
Planteamiento del problema.....	10
Justificación	10
3. Delimitación	12
4. Objetivos.....	13
Objetivo general:.....	13
Objetivo específico	13
5. Marco teórico.....	14
Antecedentes	14
6. Marco contextual	18
Bases conceptuales.....	19
6.1.6. Requerimientos	35
7. Marco legal	39
8. Metodología.....	40
Tipo de investigación.....	40
Diseño metodológico	40
Descripción de las variables y métodos de análisis de resultados.....	41
Descripción de las actividades:	41

9.	Resultados y discusión	56
10.	Conclusiones	67
11.	Recomendaciones	68
12.	Bibliografía	69
13.	Anexos	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación taxonómica de la papa criolla	30
Tabla 2 Clasificación taxonómica de la papa.....	33
Tabla 3. Estadios principales de desarrollo de la planta de papa <i>S. tuberosum</i> L. según escala BBCH.....	34
Tabla 4. Requerimientos edafoclimáticos de la papa.....	36
Tabla 5 Requerimientos adecuados de temperatura en el cultivo de papa.....	36
Tabla 6. Análisis Estadístico y comparación de Temperaturas Máximas entre Tratamientos	57
Tabla 7. Análisis Estadístico y comparación de Temperaturas Máximas entre Tratamientos	58
Tabla 8 . Análisis Estadístico y comparación de Temperaturas Mínimas entre Tratamientos	59
Tabla 9. Análisis Estadístico y comparación de Humedad Relativa máxima entre tratamientos	60
Tabla 10. Análisis Estadístico y comparación de Humedad Relativa Mínima entre tratamientos	61
Tabla 11 . Análisis Estadístico y comparación de Diferencia entre temperatura máxima externa e interna entre tratamientos.....	62
Tabla 12 Ejemplo de protocolo de aplicación de tratamientos de control de temperatura.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 ubicación del invernadero para producción de mini tubérculos, en la Universidad de Pamplona.....	18
Figura 2. Invernadero para la producción de semilla de papa ubicado en la Universidad de Pamplona.....	19
Figura 3. Preparación de suelo, cascarilla, materia orgánica para camas de cultivo	43
Figura 4. A. Fungicida Mertec B. Desinfección de sustrato para siembra	43
Figura 5. Establecimiento de tanque para fertirrigación.....	44
Figura 6. Adaptación de sistema de tuberías para riego	45
Figura 7. Ajuste y establecimiento de cintas de goteo.....	45
Figura 8. Sistema de Nebulización	46
Figura 9. A) Datalogger dt-171 , B) Uso del Datalogger dt-171 en invernadero.	47
Figura 10. Equipo Hunter Sprinkler XC800 Xcore	49
Figura 11. Cortinas horizontales con polisombra al 50%.....	50
Figura 12. Ventiladores de bajo caudal en soporte de madera	51
Figura 13. Enchufe inteligente KTMC	52
Figura 14. A) Extractor de aire SIEMENS de 20 pulgadas, B) ubicación en invernadero.....	52
Figura 15 ventilación cenital doble natural.....	54
Figura 16. Modelo de toma de datos.....	55
Figura 17. Resultados finales de Temperatura y RH con aplicación del tratamiento T4.	63
Figura 18. Temperatura y RH en invernadero sin aplicación de tratamientos.	63

LISTA DE ANEXOS

Anexo 2. Resultados finales de Temperatura y RH con aplicación del tratamiento T4. ____	76
Anexo 3. Temperatura y RH en invernadero sin aplicación de tratamientos. _____	76
Anexo 4. Temperatura y RH con el uso de polisombra T2. _____	77
Anexo 5. Temperatura y RH con el tratamiento T3. _____	77

1. INTRODUCCIÓN

La papa es el cuarto cultivo alimenticio más importante del mundo, después del arroz, el maíz y el trigo. En Colombia la papa es sembrada en 9 departamentos y en al menos 300 municipios del país. La producción promedio de papa en Colombia es de 21,5 Toneladas (Bayer, 2022). Este cultivo se establece en las diferentes regiones de los departamentos de Colombia los cuales se localizan en los pisos térmicos de frío y muy frío con temperaturas promedio que van desde los 8°C a los 18°C, donde la temperatura foliar óptima para la fotosíntesis en este cultivo va desde los 18°C ° a los 24°C (Agrosavia, 2005).

En el cultivo de la papa, uno de los principales problemas son las enfermedades virales, fácilmente diseminadas por medio de la semilla. La producción de semilla es un pilar fundamental en la agricultura moderna, donde la calidad determina el éxito de los cultivos posteriores, por eso se debe iniciar con semilla de alta calidad. El cultivo en invernadero se destaca como una opción más sostenible gracias al alto grado de control que ofrece. Este control abarca aspectos fitosanitarios y la regulación precisa de las condiciones de temperatura. Esta capacidad de control se traduce directamente en mejoras significativas en los rendimientos y la calidad de la producción. Además, permite la posibilidad de producción continua durante el año, superando las limitaciones de las condiciones climáticas externas, con lo que puede aumentar el uso de semillas de esta índole en la región.

El propósito principal de este proyecto consiste en adecuar un invernadero existente como parte del proyecto BPIN 2018000100186 “Investigación, vinculación y ampliación de la oferta tecnológica disponible para el mejoramiento productivo del cultivo de papa en los departamentos de Santander y Norte de Santander” proyecto ejecutado por Agrosavia con recursos de regalías,

en donde la Universidad de Pamplona fue entidad aliada en el desarrollo del mismo, se reemplazó un invernadero deteriorado pre existente por uno nuevo, sin embargo, esta nueva estructura se entregó sin la adecuación de las camas de propagación ni con un sistema de riego propio para el propósito de la producción de papa, así como con problemas de regulación de la temperatura. Para lograr esto, se aplicarán medidas específicas para controlar la temperatura dentro de la estructura, asegurando un entorno propicio que favorezca el desarrollo óptimo de las plantas y una cosecha de tubérculos de alta calidad. Este proceso implica la recolección precisa de datos relacionados con variables climáticas y su comparación con las condiciones internas del invernadero. Cuando se haga este análisis, se implementará un sistema automatizado diseñado para estabilizar el microclima, que permitirá maximizar la producción de semilla de papa.

2. PROBLEMA

Planteamiento del problema

La adecuación de este invernadero se da debido a la entrega incompleta que tuvo, donde quedaron labores sin realizar, como lo son la instalación y programación del sistema de riego, adecuación de las camas con su debido sustrato para la siembra, regulación de temperaturas, manejo de arvenses dentro y fuera de este, lo cual es indispensable para el establecimiento del cultivo de papa, como principal problema las altas temperaturas que se tienen en éste, las cuales no son la idóneas para el buen desarrollo de las plantas en este caso para el llenado de los tubérculos lo que afectaría la producción de semilla (Buitrago, 1999). Además, se desconoce el comportamiento de las variables micro climáticas del invernadero y la oscilación que presente cuando se suben y bajan cortinas y cuándo se aplica el riego. Además, es necesario explorar opciones para bajar la temperatura del invernadero, para facilitar el desarrollo de los tubérculos.

Justificación

La adecuación del invernadero es fundamental para garantizar el éxito del cultivo de papa, que es el principal objetivo de este proyecto. Una restauración completa y efectiva del invernadero, permitirá crear las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo. Esto es crucial para lograr una producción de semilla de papa de buena calidad, lo cual tiene importantes

implicaciones a nivel productivo, económico y social. Una producción de semilla eficiente y de calidad puede contribuir a mejorar la productividad y rentabilidad del cultivo de papa en la región, beneficiando a los agricultores y a la comunidad en general ya que en Colombia según estimaciones del MinAgricultura, cerca del 75 % de los agricultores adelantan siembras seguidas con semilla de la misma procedencia, en periodos que pueden variar entre dos y cinco ciclos productivos (García, 2023). En Santander y Norte de Santander tan solo el 3 % de los productores de papa usan semilla certificada para su producción, que es adquirida en el departamento de Boyacá, también así aportar al uso de estas semillas como alternativa para obtener mejores producciones y reducir costos al establecer el cultivo, debido a que en ocasiones no tiende a ser tan económico su establecimiento ya que necesita de una gran inversión en mano de obra, insumos y demás (Pinzón & Suarez, 2021). Teniendo en cuenta esto con el uso de semilla de calidad se amortiguaría un poco los gastos con más rendimiento de las plantas en cuanto a tubérculos.

Además, la automatización del invernadero puede tener un impacto positivo en la sostenibilidad del sistema de producción, al optimizar el uso de recursos como el agua y los insumos agrícolas además de la mano de obra, y reducir también los riesgos asociados a factores climáticos adversos (AgroSpray, 2020).

3. DELIMITACIÓN

El propósito principal de este estudio investigativo es establecer las condiciones óptimas requeridas para el cultivo de papa en un entorno de invernadero. enfocado en aspectos clave como el sistema de riego, la temperatura, la humedad y el sustrato idóneo para el desarrollo óptimo de este cultivo. A partir de esto se busca generar el buen manejo del lugar para así lograr un buen desarrollo del cultivo bajo estas condiciones.

4. OBJETIVOS

Objetivo general:

Adecuar el invernadero ubicado en el campus principal de la Universidad de Pamplona para generar las condiciones propicias para producción de semilla de papa *Solanum grupo phureja* Juz. & Bukasov.

Objetivos específicos

1. Evaluar la regulación de temperatura y humedad relativa del medio mediante el manejo de Nebulización, apertura de cortinas, Ventilación Forzada y uso de polisombra para la producción de semilla de papa *Solanum grupo phureja* Juz. & Bukasov.
2. Generar el protocolo de manejo agronómico para el invernadero situado en el campus principal de la Universidad de Pamplona para potenciar la producción de semillas de papa *Solanum grupo phureja* Juz. & Bukasov.

5. MARCO TEÓRICO

Antecedentes

5.1.1. *Antecedentes regional*

Agrosavia, (2023) nos habla del proyecto de investigación titulado: -Investigación, vinculación y ampliación de la oferta tecnológica disponible para el mejoramiento productivo del cultivo de papa en los departamentos de Santander y Norte de Santander-, financiado con recursos para la Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías de los departamentos de Santander y Norte de Santander. En el que el proyecto de investigación iniciado en noviembre de 2020 busca incrementar el rendimiento del cultivo de papa en ambos departamentos, y beneficia a cerca de 400 productores de la región entregando lavadoras de papa e invernaderos para producir semillas e investigaciones.

En el estudio realizado por los autores Escalante et al., (2024) concluyen y mencionan la efectividad de la micropropagación para la producción prebásica de semillas de papa en la región, donde se menciona que este método es eficiente y rápido para generar plantas madre homogéneas y de alta calidad. Este enfoque es crucial para mejorar la calidad fitosanitaria de las semillas, lo que a su vez puede contribuir a aumentar los rendimientos agrícolas en el cultivo de papa en Colombia y el uso favorable de esta técnica para el trabajo en sistemas de producción de semilla en invernaderos.

Martínez et al., (2024) elaboraron un trabajo de investigación denominado; Diagnóstico participativo del sistema de producción de papa en Santander y Norte de Santander. En el cual presenta un análisis exhaustivo sobre las condiciones actuales de la producción de papa en estas regiones, destacando la participación de pequeños productores que operan bajo un modelo tradicional y no tecnificado. Los resultados indican que la producción de papa enfrenta desafíos significativos, como la falta de acceso a tecnologías modernas, insumos adecuados y capacitación, lo que limita el rendimiento y la competitividad del cultivo.

5.1.2. *Antecedente Nacional*

En el trabajo de investigación titulado "Estado del arte sobre la tecnología de ventilación forzada aplicable a invernaderos de cultivos de semilla de papa criolla en el departamento de Santander" por Cobos et al., (2022) nos proporciona recomendaciones clave para mejorar la eficiencia y el rendimiento de los cultivos de papa criolla en invernaderos. Entre las recomendaciones destacadas se encuentran la implementación de sistemas de ventilación forzada para controlar la temperatura y la humedad, la selección de variedades de papa criolla resistentes a enfermedades y plagas, y la optimización de la iluminación y el riego para promover un crecimiento saludable. Además, se enfatiza la importancia de monitorear y controlar los niveles de CO₂ y la temperatura para asegurar un ambiente óptimo para el crecimiento de las plantas.

El artículo "Diseño de invernadero para cultivo de vegetales" de Cruz et al., (2024) ofrece una revisión del diseño y la implementación de invernaderos para el cultivo de vegetales. Donde Los autores presentan una comprensión detallada de los conceptos básicos de diseño de

invernaderos, incluyendo la elección de materiales, presupuestos y espacio. Además, donde discuten las consideraciones clave para la construcción y el mantenimiento de los invernaderos, como la temperatura, la humedad y la ventilación. Las recomendaciones del artículo, como la elección de materiales resistentes y aislantes, la optimización del sistema de riego y la instalación de sistemas de iluminación artificial, ofrecen una guía práctica para la implementación de invernaderos eficientes y sostenibles.

Díaz et al., (2006) En este proyecto se planteó, en su primera fase, mejorar el sistema de control de riego y en su segunda fase, un control climático. Siendo esta la segunda parte del proyecto, se llevó a cabo la medición, de una de las variables más trascendentales para un cultivo, la temperatura. Esta variable al ser medida cualitativamente permite diseñar sistemas que incidan sobre el microclima del cultivo. Por eso al diseñar e implementar un lazo de control, hay que tener en cuenta la relación temperatura – cultivo, ya que esta relación es bastante compleja y se requiere bastante conocimiento experimental. Para mantener la temperatura dentro de un rango, hay que controlar el aumento y disminución ésta, para tal fin se estableció respectivamente un sistema de ventilación cenital, a lo largo de la cumbrera y un sistema de inflado de las paredes, que en conjunto con el “efecto invernadero”, hacen de sistema de calefacción. Luego de realizar el control se almacenan las variables obtenidas del invernadero (Temperatura interna, temperatura externa, humedad relativa, entre otras), en una base de datos, para mantener registro permanente de las mismas horas a hora.

Díaz (2015) en su estudio sobre el Modelado y simulación del microclima en un invernadero en Colombia, analiza los factores climáticos que afectan las zonas agrícolas bajo cubierta mediante un modelo matemático del microclima interior basado en el clima exterior. El

modelo considera variables como temperatura del aire, suelo, cubierta y cultivo, así como presión de vapor y concentración de CO₂, y fue calibrado en tres tipos de invernaderos usando datos de estaciones automáticas. Los resultados muestran que en zonas frías los invernaderos tradicionales son insuficientes, y en zonas templadas existen problemas de temperatura nocturna. Se evaluaron estrategias pasivas, como cambios en la cubierta y pantallas térmicas, que demostraron ser efectivas en el control de la temperatura. El estudio subraya la importancia de estas estrategias para seleccionar invernaderos adecuados según la ubicación geográfica, aportando al conocimiento al integrar múltiples variables en un modelo de microclima, el primero de su tipo en Colombia.

5.1.3. *Antecedentes Internacionales*

Flores et al., (1999) Esta publicación ofrece una descripción detallada de la producción en invernadero de semilla de papa a vitroplantas. Incluye una presentación y una introducción donde explican claramente las ventajas de los materiales producidos con herramientas: biotecnológicas en nuestros sistemas de producción. Se describen las principales características y las diferentes áreas que debe tener un invernadero para la producción de semilla También se explican detalladamente las diferentes se deben considerar en el manejo del invernadero y del material vegetal

6. MARCO CONTEXTUAL

El presente trabajo se llevó a cabo en la ciudad de Pamplona, a 75 km de Cúcuta y a 124 km de Bucaramanga. Tiene 81.969 habitantes, correspondiente al 6 % de la población del departamento de Norte de Santander. Con un área del territorio de 313 m², la altitud de 2.228 msnm y un promedio de temperaturas anuales de 23°C, con máximas medias de 28°C y máximas absolutas de 33°C. y niveles de humedad que oscilan entre 76% y 80% (Villamizar Quiñonez et al.,2024), Su extensión territorial rural es de 1.176 km² (Sánchez, 2020).

La investigación se realizó en el invernadero del Programa de biología e Ingeniería Agronómica, ubicado en el Campus de la Universidad de Pamplona, a 7°23'05" de latitud Norte y a 72°38' 52" de longitud al Oeste del meridiano de Greenwich, a una altura de 2.353.07 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio de 30°C y 65% de humedad relativa.



Figura 1 Ubicación del invernadero para producción de mini tubérculos, en la Universidad de Pamplona.

Nota. En la imagen se observa el campus de la Universidad de Pamplona y en el círculo pertenece al invernadero.

Fuente: Google Earth (2022).

El lugar en el cual se realizó la investigación es un invernadero tipo capilla con ventana cenital doble/sencilla, el cual tiene 12m de largo, 7m de ancho y 6m de alto, en su interior cuenta con 4 camas de cultivo con un diámetro de 1 metro de ancho, 10m de largo por cada cama y una profundidad de 40cm.

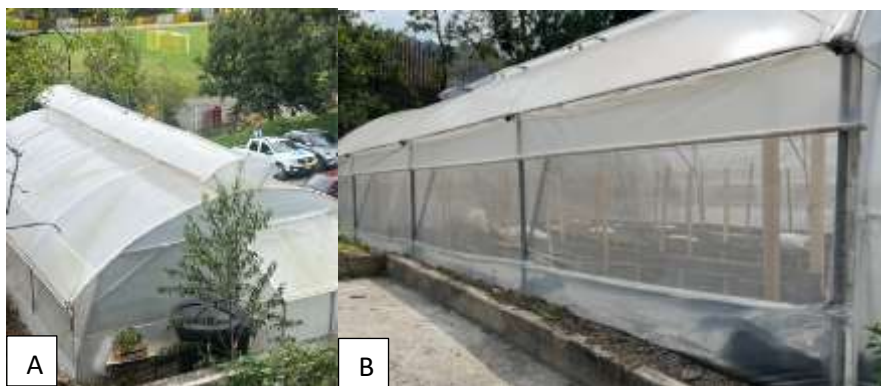


Figura 2. A, B. Invernadero para la producción de semilla de papa ubicado en la Universidad de Pamplona.

Fuente: Autor

Bases conceptuales

6.1.1. Invernadero:

Un invernadero es básicamente una estructura cerrada con paredes y techo transparentes que permite controlar el ambiente interno. Esto es útil para cultivar plantas fuera de temporada o en condiciones climáticas desfavorables (Serrano, 2005). Las ventajas del empleo de invernaderos son:

- Aumento en la calidad y el rendimiento.
- Producción fuera de época.

- Ahorro de agua y fertilizantes.
- Posibilidad de obtener más de un ciclo de cultivo al año

Componentes de una instalación de riego por goteo.

Los componentes para la instalación son: Fuente de agua, sistema de bombeo, cabezal de abastecimiento y regulación, sistema de filtración, sistema de control de presión, red de tuberías, sistema de riego.

6.1.2. *Riego por goteo:*

El riego por goteo es un método que utiliza una red de tuberías para aplicar agua a los cultivos a través de emisores que liberan pequeñas cantidades de agua de manera periódica. Esta técnica implica el uso de goteros que distribuyen el agua en forma de gotas. Este sistema es presurizado, lo que significa que el agua se transporta a través de conductos cerrados que requieren presión. Desde una perspectiva agronómica, se considera un riego localizado, ya que proporciona humedad a una zona específica del suelo, suficiente para el crecimiento adecuado de las plantas. También se conoce como riego de alta frecuencia, lo que permite regar una o dos veces al día, todos o algunos días, según el tipo de suelo y las necesidades del cultivo. La capacidad de realizar riegos frecuentes ayuda a reducir significativamente el riesgo de estrés hídrico al mantener la humedad del suelo en niveles óptimos durante todo el ciclo de cultivo, lo que mejora las condiciones para el desarrollo de las plantas (Liotta, 2015).

Algunas de las ventajas de este son:

- Ahorro de agua

- Uniformidad de aplicación
- Menor presencia de arvenses
- Fertirriego
- Automatización
- Ahorro de mano de obra

Refrigeración, como se menciona por Castilla et al., (2007) la regulación de temperaturas dentro de invernaderos se puede dar de distintas maneras, en las cuales tenemos la ventilación natural o estática, forzada las cuales juega un papel importante en la renovación del aire dentro del lugar, en algunos casos puede ser suficiente para mantener los niveles térmicos idóneos

- **Función de la ventilación:** La aireación o ventilación implica el flujo de aire entre el invernadero y su entorno externo, lo cual se logra mediante la apertura de ventanas y rendijas en la estructura. Este intercambio de aire es crucial para varias funciones: disipar el exceso de calor, reducir la temperatura interna, ajustar la humedad atmosférica al eliminar el vapor de agua generado por la transpiración de las plantas, y alterar la composición gaseosa de la atmósfera, especialmente en lo referente al dióxido de carbono (CO_2).
- **Ventilación natural:** Es un método que permite la renovación del aire caliente dentro de un espacio mediante la entrada de aire fresco del exterior. Este proceso se logra mediante la apertura de aberturas en el techo, paredes laterales o frontales, ya sea de forma permanente o temporal. Es el sistema más común y económico utilizado para este fin.

La eficacia de la ventilación se evalúa con la tasa de renovación de aire, afectada por las condiciones climáticas, incluyendo la fuerza y dirección del viento exterior, y la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. Estos factores generan diferencias de presión que promueven el movimiento del aire mediante convección natural, desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión. La eficacia de la ventilación también depende de las características de las aberturas, como su superficie y posición (Montero et al., 2002).

- **Efecto térmico:** La presencia de diferencias de temperatura es responsable de los movimientos convectivos, donde el aire caliente tiende a ascender mientras que el aire frío desciende. En ausencia de viento, la tasa de renovación de aire está determinada por la disparidad de temperaturas entre el interior y el exterior del espacio. La presencia de una abertura en la parte superior del techo favorece la ventilación, creando un efecto similar al de una chimenea. La eficacia de la ventilación cenital, es decir, la ventilación desde el techo está condicionada por la altura del invernadero. Debido al efecto de chimenea, los invernaderos más altos tienen una mejor ventilación, por lo que se recomienda que tengan al menos 3 metros de altura. El impacto del gradiente de temperatura en la ventilación se vuelve relevante en condiciones de viento débil, alta radiación solar y cuando las aberturas disponibles son limitadas (Villagran et al., 2018).
- **Características de las aperturas:** Las aperturas pueden caracterizarse por su tamaño y su posición. La frecuencia de renovación del aire aumenta en proporción al grado de apertura, especialmente en condiciones de alta radiación solar. Los sistemas de

ventilación más eficaces y versátiles incluyen ventanas ubicadas tanto en la cumbrera como en las paredes laterales. Cuando estas ventanas están equipadas con mallas, es necesario aumentar el grado de apertura. La disposición de las ventanas es esencial para potenciar los movimientos del aire dentro del invernadero, aprovechando las diferencias de presión generadas por el viento en las paredes, lo que resulta en una ventilación más efectiva. La ventilación lateral juega un papel fundamental en invernaderos reducidos, contribuyendo tanto o más que la ventilación cenital a la renovación del aire. Sin embargo, en invernaderos más amplios, con una anchura superior a los 35 metros, la ventilación cenital se vuelve predominante.

- **La ventilación forzada o dinámica:** Para la inyección o extracción de aire en el invernadero, se utilizan ventiladores de tipo helicoidal, los cuales ofrecen altos caudales a baja presión. Estos ventiladores están diseñados para operar a baja velocidad de rotación, ya que aumentar su velocidad los vuelve muy ruidosos y consumen mucha electricidad. Se debe evitar que la velocidad del aire supere 1 metro por segundo, ya que esto puede afectar a las plantas, por lo que se recomienda el uso de ventiladores de gran diámetro. Estos ventiladores pueden funcionar tanto para introducir como para extraer aire, manteniendo una presión de depresión o sobrepresión inferior a 30 pascales. La circulación del aire se suele realizar de forma horizontal. Es preferible emplear varios ventiladores pequeños en lugar de uno grande para lograr una distribución más uniforme del aire. En invernaderos de plástico, se sugiere un caudal máximo de ventiladores de 2,1 a 3,0 metros cúbicos por minuto por cada metro cuadrado de superficie de suelo del invernadero (Flores & Villarreal, 2015).

- **El cultivo y los movimientos de aire:** La presencia de plantas influye en la tasa de renovación del aire y en los movimientos convectivos, lo cual depende de la densidad y disposición de la vegetación en las líneas de cultivo. Las plantas, al transpirar, contribuyen a enfriar el aire y a modificar su densidad. Una alta densidad de vegetación, con un Índice de Área Foliar (IAF) superior a 2, puede limitar el gradiente de temperatura y alterar el efecto de chimenea. La vegetación actúa como una barrera que restringe el movimiento del aire. Por consiguiente, ubicar las líneas de cultivo en la dirección de los vientos predominantes facilita la circulación del aire y la ventilación (Alpi & Tognoni, 1991).

Refrigeración con evaporación de agua:

- **Nebulización fina (fog):** Los sistemas de nebulización se utilizan para generar una niebla que refresca el interior del invernadero. Es importante que las gotas de agua sean lo suficientemente pequeñas para evitar que mojen las plantas, ya que esto podría propiciar el desarrollo de enfermedades. Se considera que el tamaño óptimo de las gotas está entre 0,5 y 50 micras para lograr la máxima eficiencia. Por eso, las gotas deben producirse a una altura adecuada por encima de las plantas. De esta manera, debido a su tamaño y altura, caen lentamente y se evaporan antes de llegar a las plantas, absorbiendo energía y reduciendo la temperatura ambiente. Este proceso puede lograr reducciones de temperatura de hasta aproximadamente 6 grados Celsius, especialmente en condiciones mediterráneas. En situaciones de alta radiación solar, es posible combinar la nebulización con el sombreado para mejorar aún más el efecto de enfriamiento (Montero et al, 2002).

- **Sombreo:** Limitar la radiación solar como una medida para evitar altas temperaturas en un invernadero conlleva el riesgo de reducir la fotosíntesis, lo que a su vez puede disminuir la producción. Una alternativa viable es el uso de cortinas plásticas antitérmicas, las cuales restringen la entrada de radiación infrarroja solar al invernadero sin afectar la radiación fotosintéticamente activa (PAR). Sin embargo, su eficacia en limitar la radiación infrarroja solar debe ser mejorada para que su uso sea rentable. Los dispositivos de sombreado pueden instalarse en el exterior y en el interior del invernadero. Las cortinas exteriores son preferibles desde el punto de vista energético, ya que evitan que el calor penetre en el invernadero, aunque deben ser resistentes a los elementos atmosféricos como el viento y la degradación. Por otro lado, las cortinas de sombreado interiores deben permitir el paso del aire para facilitar la ventilación (Valera, 2001).
- **Capacidad de campo (cc):** Cuando los poros del suelo alcanzan su capacidad máxima de retención de agua, comienza el proceso natural de drenaje, permitiendo que el exceso de agua se desplace hacia las capas más profundas, alejándose de la zona de raíces. La capacidad de drenaje de un suelo es determinada por su textura, siendo los suelos arenosos capaces de drenar más agua que los suelos arcillosos. Después del proceso de drenaje, una parte del agua permanece retenida en los poros del suelo, lo que indica que el suelo ha alcanzado su capacidad de campo. En este estado, se establece un equilibrio óptimo entre el aire y el agua en el suelo, proporcionando condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas (Mendoza, 2013).

- **Saturación (s):** El suelo saturado de agua puede causar asfixia radicular en las plantas cuando no hay espacio para el aire debido a la ocupación total de los poros por agua. En este caso, las plantas pueden enfrentar asfixia y, en última instancia, la muerte. Por lo tanto, es crucial proporcionar la cantidad correcta de riego para evitar este problema (Shaxson & Barber, 2005).
- **Punto Permanente de Marchitez (ppm):** Se logra cuando el suelo, en su estado de Capacidad de Campo, no recibe agua adicional, ya sea por riego o lluvia. En esta circunstancia, las plantas se sustentan en la reserva de agua presente en el suelo, que se agota gradualmente por la evaporación de la superficie del suelo y el consumo de las plantas. Cuando el suelo se seca, se complica más para las plantas extraer el agua, hasta llegar a un punto en el que les resulta imposible hacerlo, lo que desencadena el marchitamiento. Aunque todavía hay humedad en el suelo, esta deja de estar accesible para las plantas, lo que se conoce como Punto Permanente de Marchitez. En el caso de sistemas de riego por goteo, la decisión de regar suele basarse en el agotamiento de alrededor del 10% del agua retenida entre la Capacidad de Campo y el Punto Permanente de Marchitez. (Mendoza, 2013).
- **Humedad relativa:** La humedad relativa en un invernadero se refiere a la proporción de vapor de agua presente en el aire en relación con su capacidad máxima de retención de vapor a una temperatura determinada. Este parámetro es crucial para el proceso de transpiración de las plantas, así como para facilitar el intercambio gaseoso necesario para la fotosíntesis. Para un desarrollo óptimo de los cultivos, es fundamental mantener

niveles de humedad relativa que oscilen entre el 50% y el 75%. Desviarse de estos rangos puede tener efectos negativos en el rendimiento de los cultivos, dependiendo de la especie cultivada (Smmnutricontrol, 2020).

- **Polisombra:** Esta permite una gestión precisa del espectro de luz que incide sobre los cultivos al filtrar y modificar la composición de la luz solar mediante la cuidadosa selección de materiales y la densidad de los hilos utilizados en su fabricación. Esta regulación garantiza un suministro óptimo de luz adaptado a las necesidades específicas de cada planta en diferentes etapas de su crecimiento. Además, facilitan una distribución uniforme de la radiación solar sobre los cultivos, evitando sombras excesivas y desequilibrios en la exposición solar. Esta cobertura adecuada asegura que todas las partes de las plantas reciban una cantidad óptima de luz, promoviendo así un crecimiento homogéneo y saludable. Asimismo, al reducir la intensidad de la luz directa y evitar la dispersión excesiva, las polisombras optimizan la eficiencia fotosintética de las plantas. Esta mejora en la captación de energía solar permite que las plantas maximicen su crecimiento, desarrollo y rendimiento, contribuyendo así a una mayor productividad agrícola (Agropinos, 2016).
- **Clima o microclima en invernadero:** Dentro de un invernadero se define como el estado dinámico del sistema, caracterizado por la evolución temporal de magnitudes físicas como la presión de vapor y la temperatura de los elementos presentes. Los invernaderos, al constituir sistemas físicos con una cantidad de energía asociada en cada instante, generan condiciones ambientales distintas a las del entorno exterior. Es decir, el

microclima en un invernadero es el resultado de una interacción compleja entre factores físicos y ambientales que influyen en el comportamiento térmico y hídrico del espacio, creando un ambiente controlado para el cultivo de plantas (Díaz, 2015).

- **Automatización:** La automatización es el conjunto de métodos y procedimientos diseñados para reemplazar la intervención humana en tareas físicas y cognitivas programadas. En este caso, el uso de softwares para controlar riego por tiempos y la regulación de temperaturas en un invernadero sin necesidad de mano de obra constante (Pardo, 2020).
- **Bombas horizontales:** La principal característica de estos sistemas es que tanto la bomba como el motor se ubican en la superficie. La conexión típica entre ambos componentes puede ser a través de una manguera flexible o una unión directa en el caso de motores eléctricos, o mediante poleas y correas o un eje cardán en el caso de motores diésel o tractores. Los modelos de bombas horizontales más utilizados en aplicaciones de riego suelen ser de tipo unicelular, con un solo impulsor, y con aspiración axial, donde esta se produce en el centro del impulsor, con impulsión lateral. Su capacidad para elevar el agua en altura manométrica no suele superar los 60-70 metros. Estas bombas pueden estar integradas de manera fija con un motor, comúnmente eléctrico, formando lo que se conoce como bombas monoblock, o pueden suministrarse con un eje libre para su acoplamiento con el motor deseado. Para esta última configuración, se requiere una bancada que sirva como soporte común para el motor y la bomba, así como un acoplamiento entre los dos ejes. (Mendoza, 2013).

- **Filtro de anillo:** Estos filtros tienen una forma cilíndrica y su elemento filtrante consiste en una serie de anillos con ranuras grabadas sobre un soporte central también cilíndrico y perforado. El agua se filtra al pasar a través de los pequeños canales formados entre dos anillos adyacentes. La calidad de la filtración está relacionada con la anchura de las ranuras. Dependiendo del número de estas ranuras, se puede lograr una equivalencia de filtración similar a una malla de 200 mesh. Su efecto de filtrado es, en cierta medida, similar al de los filtros de arena, con una filtración que actúa en profundidad (Mendoza, 2013).
- **Tuberías de PVC:** El Policloruro de Vinilo (PVC) es un polímero plástico sólido que se encuentra en forma de polvo blanco en su estado original. Se produce mediante la polimerización del monómero cloruro de vinilo (VCM), obtenido a partir de la sal y el petróleo (Mendoza, 2013).
- **Cintas de riego:** Una variante especial de sistema de riego por goteo es la cinta de riego, la cual consiste en una tubería integrada de paredes delgadas que contiene orificios a lo largo de su longitud o goteros termo soldados en su interior. (Mendoza,2013).
- **Ventosas Trifuncionales:** La ventosa cumple las tres funciones mencionadas: purgar, admisión y expulsión de aire. Durante el llenado de las tuberías, ayudan a purgar el aire presente en el sistema. Durante el vaciado, facilita la expulsión del aire acumulado. Además, la ventosa es cruciales para evitar sobrepresiones durante el llenado de las

tuberías y depresiones durante el vaciado. En situaciones de bajas presiones que pueden quedar por debajo de la presión atmosférica, lo que podría provocar el colapso de las tuberías, la ventosa permite la admisión de aire, actuando como un colchón protector. (Mendoza, 2013).

- **Datalogger (termicrómetro):** Es un dispositivo electrónico que registra datos de manera automática, precisa y en tiempo real, continuo en intervalos de tiempo predefinidos. Estos datos pueden incluir información sobre temperatura, humedad, presión, ofreciendo datos que permiten analizar variaciones térmicas en diferentes entornos o procesos.
- **Controlador de riego automático:** Un dispositivo electrónico diseñado para gestionar de manera automatizada y programada el riego de áreas verdes o campos agrícolas. Este controlador permite establecer horarios y duraciones específicas para la activación de los sistemas de riego por aspersión, asegurando una distribución eficiente y óptima del agua según las necesidades de las plantas y las condiciones climáticas. Además, puede ofrecer funciones avanzadas como ajustar el riego según sensores de humedad (Acrocarpus, 2024).

6.1.3. *Papa criolla Solanum phureja* Juz. & Bukasov.

Tabla 1 Clasificación taxonómica de la papa criolla

Orden:	<i>Solanales</i>
Familia:	<i>Solanaceae</i>

Género:	<i>Solanum</i>
Especie:	<i>S. phureja</i> Juz. & Bukasov

La papa es un cultivo agrícola muy promisorio en la región Andina de Colombia y otros países sudamericanos, debido a su ciclo de producción relativamente corto (entre 4 y 5 meses), la ausencia de dormancia en sus tubérculos, y sus características organolépticas excepcionales (Giraldo, 2021).

La Papa Criolla, conocida científicamente como *Solanum phureja*, pertenece a la clase *Magnoliophyta*, al orden *Solanales*, a la familia *Solanaceae* y al género *Solanum*. Esta variedad de papa se adapta a altitudes de entre 2600 y 2.800 metros sobre el nivel del mar, donde hay temperaturas medias entre 10 y 20 grados centígrados. Para su óptimo desarrollo, requiere una precipitación anual promedio de 900 mm, aunque puede tolerar mayores cantidades de lluvia (Cabezas & Corchuelo, 2005).

En lo que respecta a su morfología, la raíz de la Papa Criolla es poco desarrollada y de escaso volumen, lo que limita su capacidad de absorción de agua y nutrientes. La planta se caracteriza por la presencia de tallos verdaderos, que son aéreos, y tallos modificados, como estolones y tubérculos. Los tallos aéreos son de naturaleza herbácea y pueden variar en longitud y diámetro. Las plantas que crecen a partir de tubérculos-semilla suelen producir unos cinco tallos, que se ramifican según la densidad de siembra. Cada tallo se considera una unidad de producción independiente y puede generar entre 2.5 y 8.0 tubérculos. Por otro lado, las plantas que se desarrollan a partir de semillas sexuales suelen desarrollar un solo tallo principal que emerge del epicotilo del embrión (Guzmán, 2016).

Los estolones son tallos modificados laterales que crecen subterráneamente y se originan en las yemas axilares de los nudos basales de los tallos principales. Estos estolones terminan en forma de ganchos y en su extremo apical se desarrollan los tubérculos. Debido a que los estolones de la especie *Phureja* son cortos, el hábito de tuberización es relativamente limitado, y los tubérculos se forman a través de la curvatura subapical de los estolones. Funcionalmente, los tubérculos son estructuras de almacenamiento y son la principal forma de propagación asexual en esta especie. Morfológicamente, los estolones presentan dos caras bien definidas: una proximal o basal, donde se inserta en el estolón, y otra apical, con yemas capaces de generar nuevos tallos y raíces (Guzmán, 2016).

Las estructuras reproductivas de la especie *Phureja*, incluyendo la flor y el fruto, son terminales y se desarrollan en estrecha relación con la formación de estolones y tuberización. La flor de este grupo es hermafrodita, completa, pentámera y presenta variedad de colores, con estambres prominentes y ovario superior. La inflorescencia se organiza en cimas, y los frutos son bayas verdes, esféricas y biloculares, con abundantes semillas. La semilla está envuelta por arilo y tiene altas concentraciones de alcaloides en el mesocarpio y epicarpio, la mayoría tóxicos (Guzmán, 2016).

6.1.4. Clasificación taxonómica de la papa *Solanum tuberosum* L.

Tabla 2 Clasificación taxonómica de la papa

Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	Solanum
Especie	<i>Solanum Tuberosum</i>

Fuente: Monreal (2001)

6.1.5. Estados fenológicos de la papa *Solanum tuberosum* L.

Los estados fenológicos de la planta de papa como se muestra en la tabla adjunta. El cultivo de papa se inicia mediante la siembra de tubérculos (semilla), los cuales germinan y desarrollan uno o varios brotes dependiendo de la dominancia apical. Durante la fase de brotación, los carbohidratos almacenados en los tubérculos son cruciales para el crecimiento de los tallos aéreos. Simultáneamente al crecimiento de los brotes, se produce el desarrollo de las partes vegetativas, incluida la formación de las hojas desde primordios foliares hasta su completa expansión. Este crecimiento foliar continúa hasta que las plantas alcanzan la madurez fisiológica. Durante este proceso, se llevan a cabo procesos fisiológicos discretos de síntesis, translocación y acumulación de materia seca en los órganos de la planta (Rodríguez, 2010).

Además, Rodríguez (2010) nos habla que durante el desarrollo de las partes vegetativas cosechables, los estolones comienzan a acumular almidón en un área específica entre el octavo y el duodécimo entrenudo desde el ápice del estolón. Los entrenudos del estolón continúan creciendo longitudinal y radialmente mediante la división y expansión celular hasta que los tubérculos alcanzan su tamaño completo. Los ojos de los tubérculos están dispuestos en una filotaxis espiral y de ellos se originan nuevos brotes. En la etapa de llenado de los tubérculos, la distribución de foto asimilados desde las hojas fotosintéticas garantiza la formación adecuada de los tubérculos. Después de completar el llenado, se producen cambios discretos a nivel bioquímico y anatómico, incluida la formación de la cáscara o peridermis. Tras la cosecha, los tubérculos entran en un período de dormancia, y solo después de algunas semanas se reanuda el crecimiento de los brotes. El porcentaje y el patrón de crecimiento de los brotes están influenciados por la duración y la temperatura del almacenamiento. Finalmente, al alcanzar la madurez fisiológica, las plantas de papa entran en senescencia, evidenciada por la apariencia seca y blanquecina de los órganos de la planta, indicando la pérdida de clorofila, ARN y proteínas (Rodríguez, 2010).

Tabla 3. Estadios principales de desarrollo de la planta de papa *S. tuberosum* L. según escala BBCH.

ESTADIO PRINCIPAL	DESCRIPCIÓN
Germinación/Brotación (0)	Comienzo del proceso de brotación, crecimiento de tallos y raíces. Desarrollo y formación de estolones, con los tallos

	emergiendo por encima de la superficie del suelo.
Desarrollo de las hojas (1)	Las hojas adquieren más de 4 cm ² de área foliar.
Formación de brotes laterales (2)	Formación de brotes basales laterales visibles
Crecimiento longitudinal (Brotes principales) (3)	Desde el inicio hasta la finalización de la cobertura del cultivo, las plantas crecen hasta que se tocan entre las hileras.
Desarrollo de las partes vegetativas cosechables (4)	Comienzo de la formación y llenado de tubérculos, alcanzando la máxima masa final total. El peridermis madura.
Aparición del órgano floral (5)	Formación de las inflorescencias de la planta.
Floración (6)	Flores en antesis, floración plena del cultivo y fin de la floración
Formación del fruto (7)	Formación de bayas.
Maduración de frutos y semillas(8)	Desarrollo y maduración de bayas y semillas
Senescencia (9)	Hojas y tallos muertos, blanquecinos y secos *Momento para cosechar los tubérculos.

Fuente: Meier (2001).

6.1.6. *Requerimientos edafoclimáticos:*

La papa es un cultivo extremadamente adaptable, capaz de crecer en una amplia gama de condiciones climáticas y ecológicas en todo el mundo, incluyendo diversas latitudes y altitudes que pueden alcanzar hasta los 4,300 metros sobre el nivel del mar (Tapia & Fries, 2007). La temperatura juega un papel crucial en su desarrollo: temperaturas inferiores a 10 °C o superiores a 30 °C inhiben el crecimiento del tubérculo, mientras que la mejor producción se logra con temperaturas diarias promedio entre 18 y 20 °C. La brotación y emergencia de los tubérculos en latencia ocurre gradualmente a partir de los 5 °C, alcanzando su máximo entre los 14 y 16 °C (MINAGRI, 2013).

Tabla 4.Requerimientos edafoclimáticos de la papa

Requerimientos edafoclimáticos del cultivo	
Parámetro	
Temperatura (C°)	12-14
Precipitación (mm)	600-800
Altitud (M.S.N.M)	2.000-3.500
Humedad relativa (%)	75-80
pH	5,5-7,0
Tipo de suelo	Franco

Fuente: vasco (2015).

Tabla 5 Requerimientos adecuados de temperatura en el cultivo de papa.

ETAPA	TEMPERATURA
EN EL AMBIENTE	

Dos semanas después de la siembra	13°C
Desarrollo Foliar	12 a 14°C
Elongación de tallo y Floración	18°C
Formación de tubérculos	16 a 20°C
EN EL SUELO	
Emergencia y crecimiento foliar	21 a 24°C
Formación tubérculos	15 a 24°C

Fuente: Villamizar (2022).

6.1.7. Disponibilidad de agua:

La planta de papa es altamente susceptible al estrés causado por la falta de agua en el suelo. Para lograr rendimientos óptimos, es crucial mantener la disponibilidad de agua en el suelo por encima del 70% de su capacidad total. Los requerimientos hídricos varían entre los 600 a 1000 milímetros por ciclo de producción, lo cual dependerá de las condiciones de temperatura, capacidad de almacenamiento del suelo y de la variedad. El suministro adecuado de agua es esencial desde las primeras etapas de formación de los tubérculos hasta que la planta alcanza la madurez fisiológica. Durante el crecimiento del follaje, la sequía puede disminuir la eficiencia fotosintética y el desarrollo del follaje, lo que conduce a una redistribución de los recursos hacia el crecimiento de los tubérculos. Este fenómeno puede resultar en un acortamiento del ciclo de vida del cultivo. Además, la sequía durante el período de tuberización y llenado de los tubérculos puede afectar el rendimiento, reduciendo el tamaño y la calidad de los tubérculos y el número de por planta (Rodríguez, 2010).

Por otro lado, la sobre irrigación también puede ser perjudicial para el cultivo de papa. Puede aumentar la prevalencia de enfermedades, reducir la aireación del suelo y la respiración del sistema radical, y generar costos adicionales de producción, Una irrigación inadecuada puede resultar en una disminución de la calidad de los tubérculos y bajos rendimientos debido a la reducción del área foliar y la fotosíntesis por unidad de área.

6.1.8. Suelos.

La papa puede prosperar en varios tipos de suelos, aunque se prefieren aquellos que ofrecen poca resistencia y compactación en el crecimiento de los tubérculos. Los suelos ideales incluyen franco, francoarenoso, franco-limoso y franco-arcilloso, que presenten buen drenaje y aireación, facilitando así el buen desarrollo. Es esencial que los suelos tengan una profundidad efectiva de al menos 50 cm para permitir un desarrollo óptimo de los estolones y tubérculos. Además, se recomienda mantener un pH del suelo entre 5.0 y 7.0 para un crecimiento adecuado. Los suelos con alta salinidad, alcalinidad o compactación pueden afectar negativamente el desarrollo y la producción de la papa. Se aconseja usar suelos con una densidad aparente de al menos 1.20 g/cm³, un contenido de materia orgánica superior al 3.5%, y una conductividad eléctrica por debajo de 4 dS/m (INTAGRI, 2017).

7. MARCO LEGAL

El **Acuerdo No. 186** de la Universidad de Pamplona establece las regulaciones para el Trabajo de Grado, que es un requisito para la obtención del título profesional. Según **el Capítulo VI, Artículo 35**, el Trabajo de Grado tiene como propósito que el estudiante aplique sus conocimientos adquiridos para diagnosticar problemas, analizar información, y desarrollar y ejecutar proyectos que demuestren su capacidad de toma de decisiones. Puede ser realizado de manera individual o en grupo, pero en todos los casos se presenta un único informe. Además, debe ser sustentado ante un Jurado compuesto por tres personas expertas en el tema, quienes calificarán el trabajo como "Aprobado", "Excelente" o "Incompleto". En caso de no cumplir con los objetivos, el estudiante deberá matricularlo nuevamente. El **Artículo 36** especifica que el Trabajo de Grado puede desarrollarse bajo la modalidad de investigación, que implica diseñar y ejecutar proyectos para ofrecer soluciones a problemas teóricos o prácticos, adaptar tecnologías y validar conocimientos de otros contextos (Universidad de Pamplona, 2005).

8. METODOLOGÍA

Tipo de investigación

Este estudio se sitúa dentro de una Investigación exploratoria y de aplicación tecnológica donde se usara la metodología de medidas repetidas, en la que se busca obtener resultados a partir de la toma ordenada de datos para su análisis, para luego determinar diferencias significativas entre las condiciones de temperatura tanto en el entorno exterior como dentro del invernadero además del uso de información de estudios ya realizados para la aplicación en campo; mientras que el componente tecnológico se enfoca en el uso de herramientas como lo es el datalogger DT-171 y el controlador de riego automático Hunter Sprinkler XC800 Xcore para dar las condiciones adecuadas de temperatura y humedad.

Diseño metodológico

Hipótesis objetivo 1: con el manejo de la nebulización, polisombra, ventilación forzada y ventanas se puede garantizar la temperatura y humedad adecuada para el cultivo de papa.

Hipótesis objetivo 2: A través de la estructuración de un plan de manejo para el invernadero y uso adecuado de los recursos disponibles se garantizará una producción estable y duradera de semilla de papa.

Descripción de las variables y métodos de análisis de resultados

Variables Cuantitativas

Toma de datos a través de la ayuda de un termohigrómetro (datalogger dt-171) para determinar:

- Temperatura en grados centígrados; Máxima, Media, Mínima.
- Porcentaje de Humedad relativa

Análisis estadístico

- **Gráficos de temperatura y humedad:** estos gráficos permiten visualizar la evolución de la temperatura y la humedad relativa dentro del invernadero, lo que ayudara a evaluar el desempeño del sistema de control y a identificar posibles problemas, estas se generarán gracias al datalogger.
- **SPSS 26:** en este software se analizan los datos recolectados por semana que estarán recopilados en Excel, donde están tomados como tratamientos, los cuales serias dos T1: condiciones sin manipulación de temperaturas dentro del invernadero, T2: Uso de polisombra, T3: Polisombra + Nebulización T4: Polisombra + Nebulización + Ventilación Forzada.

Descripción de las actividades:

Actividades preparatorias para el establecimiento del proyecto

8.1.1. *Control de arvenses dentro y en el perímetro del invernadero:*

En cuanto al manejo de estas dentro del invernadero, se realizó manualmente. En el exterior del invernadero, se llevó a cabo la poda selectiva de arbustos cercanos a la entrada. Esto se hizo para eliminar posibles hospederos de insectos plaga que podrían ingresar al invernadero. Además, se realizó un control mecánico de las malezas también se aplicó un herbicida (glifosato y paraquat). Es importante destacar que estas malezas servirían como focos de hongos, que podrían ingresar al invernadero mediante corrientes de aire provenientes de las ventanas.

- **Preparación de sustrato**

Respecto al sustrato para la siembra (Fig.3), se empleó una mezcla en proporción 1:1:1 de materia orgánica, cascarilla de arroz y suelo (Camacho et al., 2015). Esta mezcla fue sometida a un proceso de desinfección utilizando el fungicida Mertect (Tiabendazol) con el fin de eliminar los posibles hongos y otras contaminaciones que estuvieran presentes (Fig.4), donde se usaron 270mL/ en un volumen de 80 litros de agua, además se le realizó una leve solarización para mantener así la sanidad del sustrato y del entorno dentro del invernadero (Aguirre & Norma, 2013).



Figura 3. A. camas de cultivo con sustrato, B. Preparación de suelo, cascarilla, materia orgánica (Relación 1.1.1),
C. Abono orgánico.

Fuente: Autor



Figura 4. A. Fungicida Mertec B. Desinfección de sustrato para siembra

Fuente: Autor

- **Instalación de sistema de fertirrigación**

Se adecuó el sistema de fertirrigación con el objetivo principal de realizar su instalación, tomando en cuenta la infraestructura del invernadero para evitar posibles daños que afectaran su funcionamiento óptimo basándose en investigaciones ya hechas como en Busquets et al., (2011).

1. se estableció un tanque de 250L para la aplicación de la fertilización y riego, en un lugar apropiado al cual se le adaptó el sistema de tuberías, esto usando uniones con filtro para evitar posibles taponamientos (Fig.5).

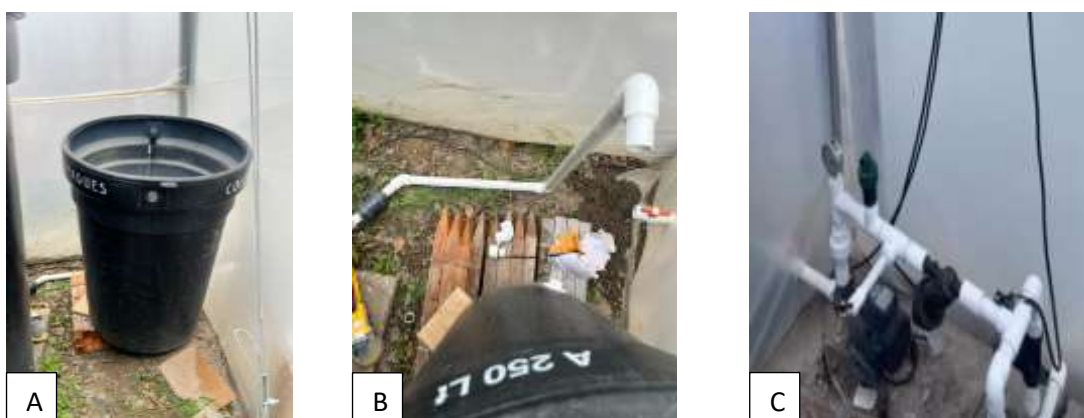


Figura 5. A. Establecimiento de tanque para fertirrigación de 250lt, **B.** Adaptación de tanque a sistema de riego, **C.**

Electrobomba adaptada a tanque de fertirrigación.

Fuente: Autor

2. se realizó la instalación de un sistema de tuberías de PVC de presión de 1 pulgada dado a la presión del agua, desde la bomba de riego hasta las camas con los sustratos donde se adecuo para la instalación de válvulas las cuales dan paso al agua a través de las cintas de goteo (Fig.6).

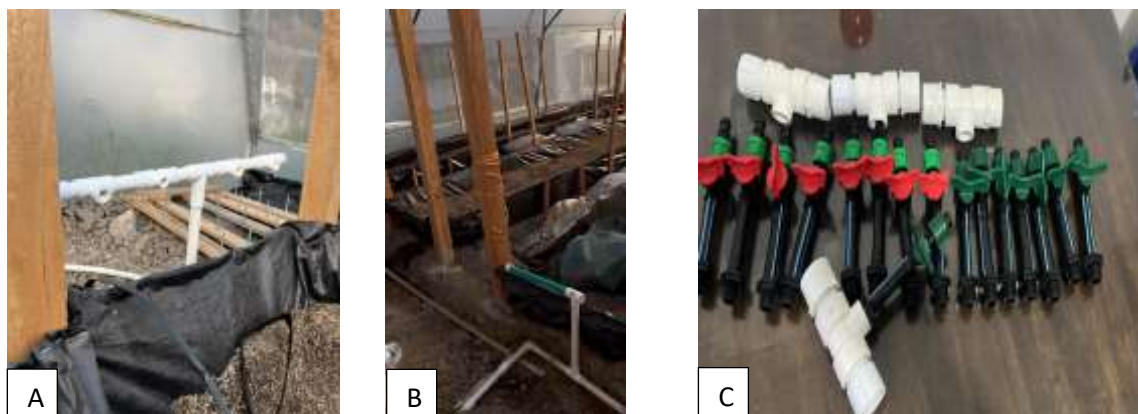


Figura 6. A, B. Sistema de tuberías para riego en PVC en camas de siembra. **C.** Válvulas para cintas de riego.

Fuente: Autor

3. En cada cama de instalaron 4 cintas con goteros auto compensados a una distancia de 20cm, entre ellas con una medida de 10m de largo, para completar un total de 160m de cinta de riego por goteo en todo el sistema (Fig.7).

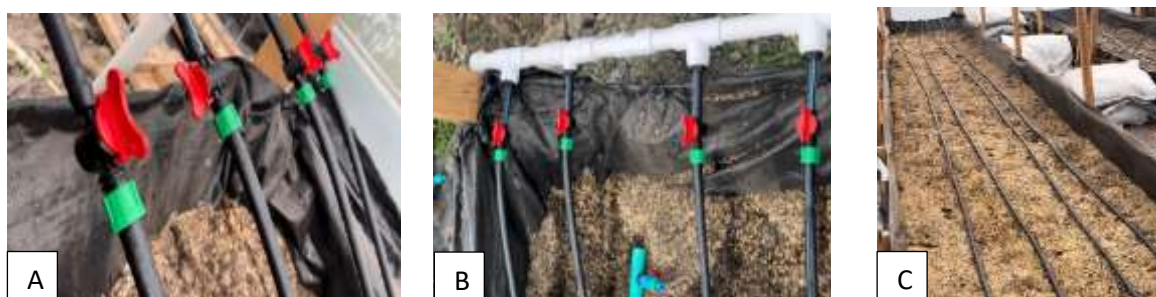


Figura 7. A, B. Ajuste y establecimiento de cintas de goteo en sistema de tuberías. **C.** Cintas de goteo en cama de siembra.

Fuente: Autor

4. Para la implementación del sistema de nebulización, se adaptó un sistema de tuberías desde la bomba principal usando PVC de presión de 1 pulgada, al cual se le adapto manguera de 16mm de polietileno la cual se colocó en la parte superior a 4 metros de altura en la estructura del invernadero (Aguado da Costa,2012), Se colocaron 12 nebulizadores de 4 salidas cada uno, distribuidos de manera uniforme y posicionados a 45° entre si los cuales trabajan a una presión de 20 a 40 psi (Fig.8).

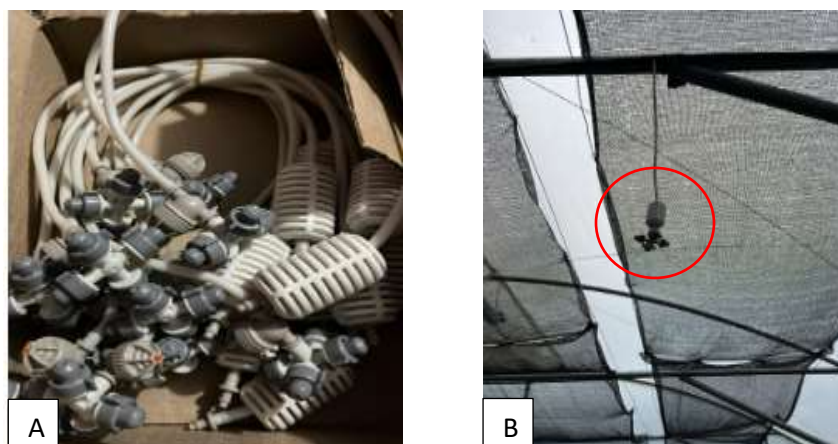


Figura 8. A. Nebulizadores auto compensados de 4 salidas. **B.** Sistema de Nebulización en estructura superior del invernadero.

Fuente: Autor

- **Programación del datalogger dt-171**

Se ubicó un datalogger dt-171 a 1 metro del suelo, ubicado en el centro del invernadero donde Se llevó acabo la toma de datos cada 5 minutos por 6 días, realizando muestreos semanales esto para ver las variables en cuanto a temperatura y humedad (máxima, media y mínima) con la implementación de los tratamientos establecidos: T1: sin nada, T2: Polisombra, T3: polisombra + Nebulización fina, T4: polisombra + Nebulización fina + ventilación forzada (ventiladores y extractor de aire), (Fig.9).

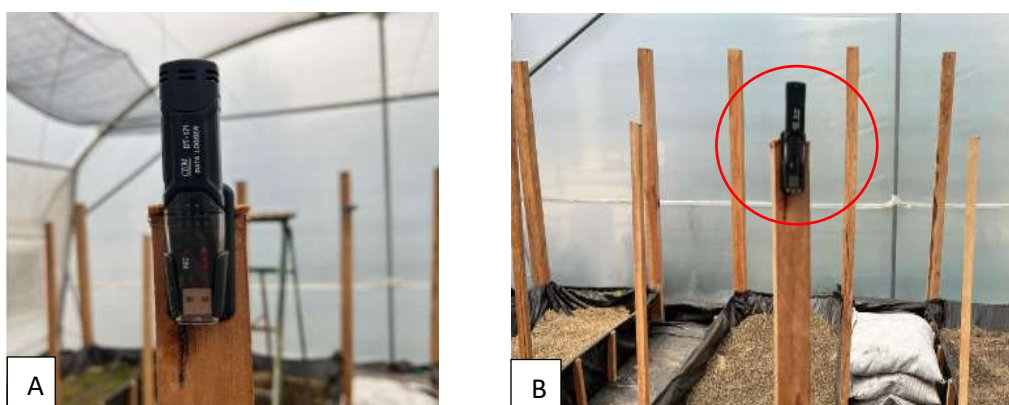


Figura 9. A. Datalogger dt-171, **B.** Uso del Datalogger dt-171 en invernadero.

Fuente: Autor

- **Programación de riego automatizado por Hunter Sprinkler XC800 Xcore**

Para la programación de este, se tuvo en cuenta el manual de uso establecido por el fabricante (Hunter Industries, 2017), haciéndolo de la siguiente manera:

1. Configuración de Fecha y Hora:

- Acceder al menú: Girar el dial hasta la posición de "Fecha/Hora".
- Ajustar el año: Usar los botones "+" y "-" para seleccionar el año actual. Presiona la flecha derecha para avanzar.
- Configura la hora y los minutos: Repite el proceso para ajustar la hora y los minutos.

2. Programación de Horas de Inicio de Riego:

- Seleccionar un programa (A, B o C): Girar el dial hasta el programa que desees configurar.
- Establecer las horas de inicio: Presionar la flecha derecha para acceder a las horas de inicio. Puedes programar hasta 3 horas de inicio por programa. Usa los botones "+" y "-" para ajustar cada hora.

3. Configuración del Tiempo de Riego:

- Seleccionar la estación: Después de establecer las horas, selecciona la estación que desees programar (A, B, C).
- Ajusta el tiempo de riego: Usa los botones para definir cuántos minutos debe regar cada estación, el cual va desde un minuto hasta 12 horas.

4. Días de Riego:

- Configurar los días: Acceder a la opción "Días de riego" y selecciona los días específicos en que desees que se realice el riego (puedes elegir días específicos o intervalos como días impares o pares).

5 Activación Manual:

- Si necesitas activar manualmente una estación o programa, utiliza la opción correspondiente en el menú.

Después de realizar la programación del equipo (Fig.10) y el muestreo de temperaturas sin ningún tratamiento utilizando el Datalogger DT-171, se identificaron los horarios críticos de mayor temperatura dentro del invernadero. Con esta información, se estableció un programa de tres activaciones diarias (9:30 a.m., 11:15 a.m. y 2:45 p.m.), cada una con una duración de 1 minuto, ajustado a las condiciones climáticas diarias.



Figura 10. Equipo Hunter Sprinkler XC800 Xcore

Fuente: Autor

- **Instalación de sistema de cortinas horizontales al interior del invernadero con polisombra**

Se dio uso a una polisombra al 50%, la cual se implementó sobre cada una de las camas (4) a una altura del suelo de 4m, para esto se tuvo que adecuar en los postes de la estructura ya existentes del invernadero de manera horizontal cuerdas de alambre tomando como referencia lo hecho por Mi Mundo Hidropónico (2020), estas para poder colocar la polisombra con ayuda de amarres de plástico (Fig.11), se dejó un espacio de 70cm entre cortinas, esto para no interferir en el flujo de aire hacia la ventana cenital y lograr así ayudar con el estrés térmico en el cultivo en las horas críticas de calor.

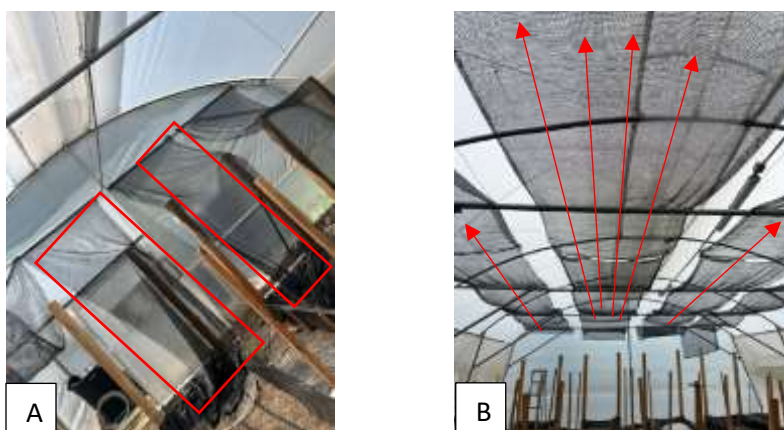


Figura 11. A. Construcción de Cortinas horizontales con polisombra al 50%, **B.** Cortinas horizontales (polisombra) establecidas.

Fuente: Autor

- **Instalación de ventiladores y extractor de aire:**

Se usaron dos ventiladores de bajo caudal, los cuales se establecieron en las dos esquinas frontales del invernadero, a una altura de 1.70cm en una base de madera (Fig.12) dado que al colocarse a una menor altura no habría una distribución homogénea

además que podría tener influencia que el aire este de manera directa en el follaje de las plantas, en cuanto al extractor se usó uno de 20 pulgadas de 5 aspas con un caudal de 5,310 m³/h, el cual se ubicó en la parte frontal de la estructura a la mitad (Serrano et al., 2005), a una altura de 3.5m del suelo fijado con una cadena para dar mayor soporte (Fig.14).

Se dio uso a un enchufe inteligente de la marca KTMC de 120 voltios para la automatización de los ventiladores y el extractor, con este se logró establecer horas específicas diarias de encendido y apagado, lo cual fue programado en la aplicación Smart Life (Fig.13).



Figura 12. Ventiladores de bajo caudal en soporte de madera.

Fuente: Autor



Figura 13. Enchufe inteligente KTMC

Fuente: Autor

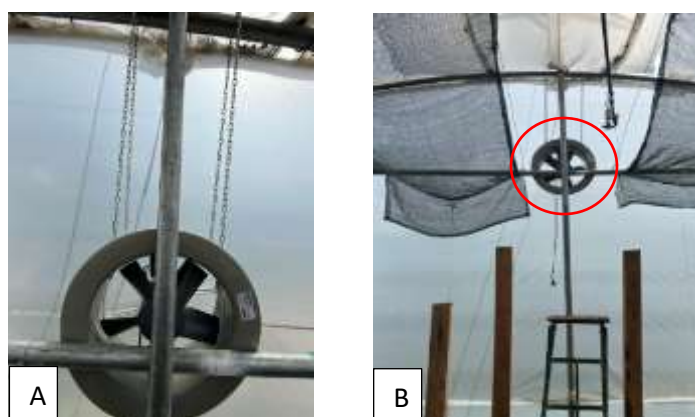


Figura 14. **A.** Extractor de aire SIEMENS de 20 pulgadas, **B.** Extractor ubicado en cara frontal del invernadero.

Fuente: Autor

8.1.2. Manipulación de conjunto de metodos para reducir la temperatura

Para reducir la temperatura, se utilizaron las ventanas laterales del invernadero, las cuales se mantuvieron completamente abiertas en todo momento, dado a las condiciones del

invernadero, ya que está ubicado junto a un edificio que bloqueaba el paso de las corrientes de aire. El viento que lograba entrar, junto con el aire generado por los ventiladores, permitía disipar el aire caliente del interior, el cual ascendía debido a su menor densidad en comparación con el aire frío. Este aire caliente salía por la ventana cenital del invernadero (Fig.15) y era expulsado también por el extractor, manteniendo controlada la cantidad de aire caliente y la humedad dentro del invernadero, y en menor medida, reestablecer la concentración de CO_2 a los niveles que hay fuera del invernadero; fundamentalmente en las horas centrales del día, cuando la elevada radiación solar provoca un aumento de la actividad fotosintética y del consumo de este gas (Valera et al., 2004). Además, se empleó un sistema de nebulización fina(fog), programado para funcionar durante 1 minuto (Carmona, 2001), con el objetivo de que, al evaporarse el agua micronizada, absorbiera el calor del aire (Huertas et al., 2007), se establece como tratamiento el sistema de nebulización ya que las condiciones que presenta el sustrato no se puede dar uso a el riego por goteo como alternativa, ya que al usarlo constantemente se presentaría una exceso de humedad, lo que no sería idóneo para el buen desarrollo de las plantas. Estos tratamientos se aplicaron en las horas más críticas de mayor temperatura, entre las 8:00 a.m. y las 4:00 p.m., con el propósito de reducir las altas temperaturas.

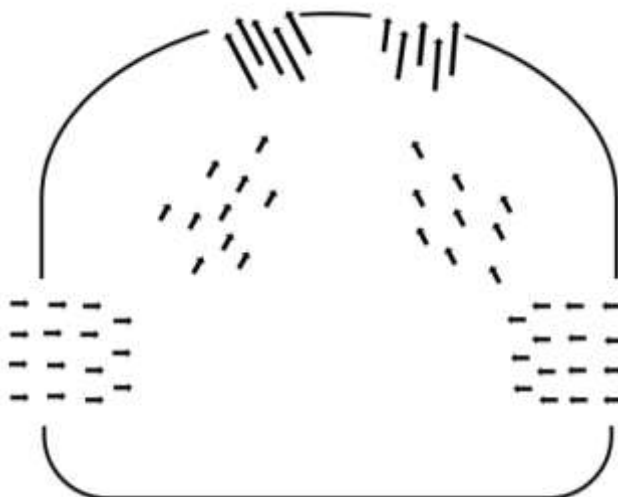


Figura 15 ventilación cenital doble natural

Fuente: Autor

8.1.3. Registro de datos de temperatura y humedad relativa por el efecto del manejo de los tratamientos dentro del invernadero

Se recopilaron los datos de temperatura (máxima, mínima, media) y la humedad relativa (máxima y mínima) en el invernadero y en el exterior durante las horas más críticas, comprendidas entre las 8:00 a.m. y las 4:00 pm (Anexo 12). Las mediciones se realizaron semanalmente y se organizaron en un archivo de Excel, obteniendo un total de 24 muestras por tratamiento con una duración de un mes por cada tratamiento.

Condición invernadero	Tratamiento	Variables a evaluar
De día: 8 am a 4 pm	Cortina arriba, polisombra, nebulización y ventilación forzada.	Temperatura, humedad relativa
De día: 8 am a 4 pm	Cortina arriba, polisombra	Temperatura, humedad relativa
De día: 8 am a 4 pm	Cortina arriba, nebulización constante	Temperatura, humedad relativa
De día: 8 am a 4 pm	Sin nada	Temperatura, humedad relativa

Figura 16. Modelo de toma de datos.

Fuente: Autor

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Es importante señalar que este estudio se llevó a cabo durante una prolongada temporada de sequía o llamado también fenómeno del niño, caracterizada por la ausencia total de precipitaciones, lo que resultó en una marcada estabilidad climática (MinAmbienteCo, 2023). Esta condición permitió analizar los efectos de la alta temperatura en el invernadero ubicado en la Universidad de Pamplona (Colombia), sin la interferencia de otros factores climáticos como la presencia constante de lluvia, donde se logró el cumplimiento de este Primer Objetivo Específico.

Variación de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero

La Tabla 6 presenta las variaciones en las temperaturas máximas bajo diferentes tratamientos de control ambiental. Se compararon cuatro escenarios: sin tratamiento, con polisombra, con polisombra y nebulización, y con polisombra, nebulización y ventilación, con el objetivo de evaluar su efectividad en la reducción de temperaturas. se observa que, en las condiciones sin tratamiento, las temperaturas fueron las más elevadas, con temperatura máxima que variaron entre 44°C y 50°C, con un promedio de 47,58°C. Este escenario presenta una alta desviación estándar de 1,84°C y una varianza de 3,39, lo que indica variabilidad en los registros de temperatura. Al implementar polisombra, la temperatura máxima se redujo significativamente, con un rango entre 35,5°C y 39°C, un promedio de 37,65°C, una menor desviación estándar de 0,98°C y una varianza de 0,96, demostrando mayor estabilidad en los resultados. El tratamiento de polisombra combinado con nebulización logró una mayor reducción

de la temperatura, con valores que oscilaron entre 30,3°C y 34,7°C, con un promedio de 32,15°C. Aunque la desviación estándar fue ligeramente mayor (1,43°C), la varianza aumentó a 2,04, lo que sugiere una mayor dispersión de los datos. Finalmente, el tratamiento de polisombra, nebulización y ventilación resultó ser el más efectivo, con temperaturas máximas en rangos de 27,1°C y 32,2°C, manteniendo un promedio de 29,88°C. La desviación estándar fue de 1,58°C y la varianza de 2,51, lo que refleja un buen control de la temperatura bajo este tratamiento.

Tabla 6. Análisis Estadístico y comparación de Temperaturas Máximas entre Tratamientos

Temp Máx (°C)					
	Mínimo Estadístico	Máximo Estadístico	Media Estadístico	Desviación Estadístico	Varianza Estadístico
Sin Tratamientos	44,0	50,0	47,583	1,8401	3,386
Polisombra	35,5	39,0	37,646	0,9820	0,964
Poli + Neb	30,3	34,7	32,154	1,4292	2,043
Poli + Neb + Vent	27,1	32,2	29,883	1,5849	2,512

Fuente: Datos autor

En cuanto a las temperaturas medias Tabla 7, siguen una tendencia similar, donde sin tratamiento, la media es de 39,02°C, con una variabilidad moderada (desviación estándar de 1,65°C). Con polisombra, la media 29,89°C y se observa una menor dispersión de los datos (desviación estándar de 0,83°C). Polisombra y nebulización consigue reducir la media a 25,18°C, manteniendo una baja variabilidad. El tratamiento más efectivo fue la combinación de polisombra, nebulización y ventilación, con temperaturas que oscilaron entre los 23,0°C y 25,0°C, y una media de 24,483°C. Este tratamiento presentó la desviación estándar (0,6368) y

varianza (0,638) más bajas entre todos los tratamientos, lo que refleja un control térmico estable y eficiente. Esto sugiere que este enfoque ofrece un ambiente de temperatura constante y controlada.

Tabla 7. Análisis Estadístico y comparación de Temperaturas Máximas entre Tratamientos

Temp Media (°C)					
	Mínimo Estadístico	Máximo Estadístico	Media Estadístico	Desviación Estadístico	Varianza Estadístico
Sin Tratamientos	36,0	41,5	39,021	1,6450	2,706
Polisombra	28,0	31,2	29,892	0,8277	0,685
Poli + Neb	23,8	27,0	25,183	0,8766	0,768
Poli + Neb + Vent	23,0	25,0	24,483	0,6368	0,638

Fuente: Datos autor

En el caso de las temperaturas mínimas Tabla 8, en los datos por parte del caso sin tratamientos, se registró una temperatura mínima de 14,0°C, con un promedio de 17,5°C y 15,733°C. La dispersión de los datos es moderada, con una desviación estándar de 1,0252 y una varianza de 1,051. Al aplicar el tratamiento de polisombra, aunque la temperatura mínima se mantiene en 14,0°C, el máximo estadístico disminuye ligeramente a 17,2°C, y la media estadística es similar (15,683°C). Sin embargo, la desviación estándar es menor (0,9649), lo que indica una menor variabilidad en comparación con la condición sin tratamiento, con una varianza de 0,931. La media estadística sube a 18,196°C, aunque la desviación estándar (0,9724) y la varianza (0,946) indican una dispersión comparable a las condiciones anteriores. Finalmente, el tratamiento con polisombra, nebulización y ventilación alcanza el máximo estadístico (20,3°C),

con una media de 18,267°C, la más alta entre los tratamientos, Sin embargo, también muestra la mayor dispersión de datos, con una desviación estándar de 1,2866 y una varianza de 1,655, probablemente debido a la influencia de condiciones de mayor aumento de temperatura por las condiciones climáticas que pudieron llegar a interferir al momento de muestrear.

Tabla 8 . Análisis Estadístico y comparación de Temperaturas Mínimas entre Tratamientos

Temp Mín (°C)					
	Mínimo Estadístico	Máximo Estadístico	Media Estadístico	Desviación Estadístico	Varianza Estadístico
Sin Tratamientos	14,0	17,5	15,733	1,0252	1,051
Polisombra	14,0	17,2	15,683	0,9649	0,931
Poli + Neb	16,7	19,7	18,196	0,9724	0,946
Poli + Neb + Vent	16,3	20,3	18,267	1,2866	1,655

Fuente: Datos autor

En cuanto a los resultados estadísticos de la Humedad Relativa Máxima bajo diferentes tratamientos Tabla 9, se observa una tendencia clara donde el mínimo estadístico es más bajo sin tratamiento (38%), lo que indica mayor exposición al ambiente, mientras que los tratamientos con T2, T3 y T4 elevan los valores mínimos, comenzando en un 54%. Esto sugiere que dichos tratamientos son eficaces para mantener niveles más altos de humedad. el tratamiento con Polisombra + Nebulización + Ventilación tiene la desviación estándar más baja (1.6928), lo que demuestra que los valores de humedad bajo este tratamiento son más consistentes también la varianza más baja (2.866) se encuentra en este tratamiento, lo que sugiere que este no solo

aumenta la humedad, sino que lo hace de manera más uniforme y estable resaltando la efectividad de este tratamiento dado a que iguala a la humedad relativa promedio del exterior (Villamizar Quiñonez et al.,2024).

Tabla 9. Análisis Estadístico y comparación de Humedad Relativa máxima entre tratamientos

Humedad Rel. Máx (%)					
	Mínimo Estadístico	Máximo Estadístico	Media Estadístico	Desviación Estadístico	Varianza Estadístico
Sin Tratamientos	38,0	50,0	43,625	3,3598	11,288
Polisombra	54,0	64,0	58,500	2,9782	8,870
Poli + Neb	54,6	75,5	66,038	6,0248	36,298
Poli + Neb + Vent	79,6	85,2	82,371	1,6928	2,866

Fuente: Datos autor.

La humedad relativa mínima sin tratamientos muestra un valor bajo, con una media de 22,21%. El uso de polisombra mejora este parámetro significativamente, con una media de 42,67%. La inclusión de nebulización incrementa aún más la humedad mínima a 45,92%, aunque con una variabilidad mayor. Finalmente, el tratamiento T4 presenta los mejores resultados, con una media de 66,28% y una variabilidad baja, lo que indica condiciones climáticas más estables y favorables como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Análisis Estadístico y comparación de Humedad Relativa Mínima entre tratamientos

Humedad Rel. Mín (%)					
	Mínimo Estadístico	Máximo Estadístico	Media Estadístico	Desviación Estadístico	Varianza Estadístico
Sin Tratamientos	19,0	25,0	22,208	1,7189	2,955
Polisombra	40,0	46,0	42,667	1,8098	3,275
Poli + Neb	37,2	57,7	45,917	6,6404	44,095
Poli + Neb + Vent	63,5	68,3	66,275	1,4967	2,240

Fuente: Datos autor

Analizando la diferencia entre el exterior y el interior del invernadero Tabla 11, sin ninguna intervención presenta una diferencia considerablemente alta de 13,458°C, esto indica que, sin tratamientos, la temperatura interna es mucho mayor que la externa, La desviación estándar de 2,1609°C refleja una variabilidad significativa en esta diferencia, lo cual sugiere fluctuaciones considerables entre los días analizados. Al incorporar la Polisombra, la diferencia media de temperatura disminuye notablemente a 5,812°C, lo que sugiere que este tratamiento logra un efecto de enfriamiento considerable respecto al ambiente externo.

Con la combinación de Polisombra + Nebulización, se alcanza una diferencia de temperatura más baja de 1,863°C, casi igualando las temperaturas internas con las externas (AccuWeather, 2024). Esto sugiere que la nebulización no solo ayuda a reducir la temperatura interna, sino que lo hace de manera uniforme, en cuanto al T4 que combina la polisombra, nebulización y ventilación, ofrece una diferencia de temperatura de 3,283°C, indicando que no solo regula efectivamente la temperatura interna, sino que en algunas ocasiones (mínimo de -

1,1°C), la temperatura interna puede ser incluso inferior a la externa, lo que refleja un alto nivel de eficiencia en el enfriamiento, lo cual presenta las condiciones ideales de temperatura para el cultivo de papa (Ñústez & Rodríguez, 2024).

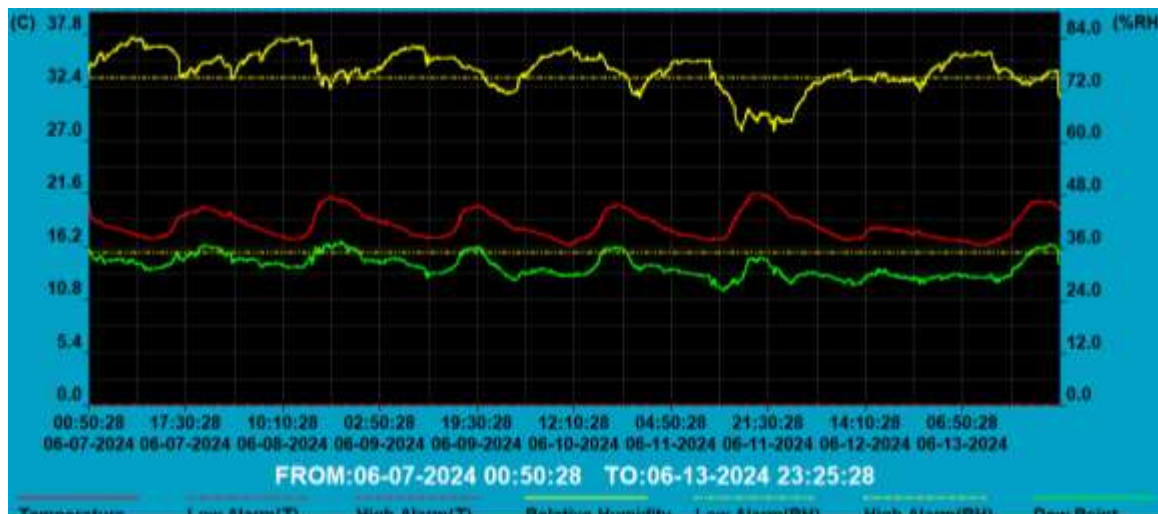
Tabla 11 .Análisis Estadístico y comparación de Diferencia entre temperatura máxima externa e interna entre tratamientos.

Dif Temperatura externa e interna					
	Mínimo Estadístico	máximo Estadístico	Media Estadístico	Desviación Estadístico	Varianza Estadístico
Sin Tratamientos	9,5	17,5	13,458	2,1609	4,669
Polisombra	3,5	9,4	5,812	1,5900	2,528
Poli + Neb	0,1	4,7	1,863	1,4758	2,178
Poli + Neb + Vent	-1,1	7,8	3,283	2,1465	4,608

Fuente: Datos autor

Se puede deducir en la figura 17 el gran cambio de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero que hubo al final de la investigación, donde se ve una correlación entre temperatura y humedad siendo estable en gran parte del día, dando las condiciones idóneas para el buen desarrollo de plantas a comparación de las condiciones sin la aplicación de ningún tratamiento Figura 18, que duplica los valores de temperatura y muestra un porcentaje escaso de humedad donde no se desarrollaría ningún cultivo.

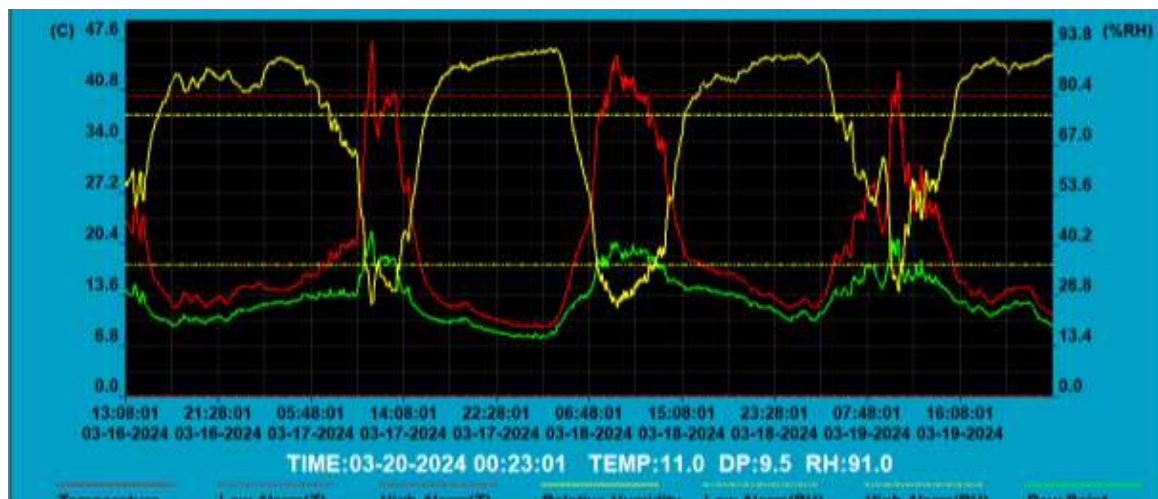
Figura 17. Resultados finales de Temperatura y RH con aplicación del tratamiento T4.



Fuente: Autor

Nota: La grafica mostrada fue generada por el datalogger DT-171, donde se muestra los datos recolectados de las variables en el invernadero al final de la investigación.

Figura 18. Temperatura y RH en invernadero sin aplicación de tratamientos.



Fuente: Autor

Es esencial adaptar los protocolos a las condiciones climáticas, realizando monitoreo constante con ayuda de un termohigrometro o termómetro digital para medir la temperatura y Humedad relativa, con eso podremos determinar el protocolo más adecuado.

Propósito: Mantener un nivel de temperatura y humedad relativa adecuado para el crecimiento de las plantas, evitando el exceso de humedad que favorezca enfermedades fúngicas.

Frecuencia y configuración:

Configurar el sistema de nebulización con el equipo Hunter XC800 para operar en intervalos de un minuto en las horas de mayor calor (9 am - 4 pm) coordinado con el sistema de ventilación para conseguir una niebla homogénea. En días de alta humedad o presencia de lluvias, suspender la nebulización para prevenir condensación en el follaje. Tener en cuenta el mantenimiento, donde es importante limpiar las boquillas mensualmente para prevenir bloqueos y asegurar una dispersión homogénea de la niebla, además de mantener el tanque de agua libre de impurezas para evitar obstrucciones.

Sistema de Riego por Goteo

Frecuencia y cantidad:

Programar el riego por goteo con el equipo Hunter XC800 para aplicar agua en intervalos cortos y frecuentes (por ejemplo, 5 minutos cada 3-4 horas) en las etapas iniciales de crecimiento, o realizar un riego diario según la humedad ambiental ya que en días lluviosos se mantendrá mayor humedad en el sustrato de siembra, en la fase de

tuberización, disminuir la frecuencia para evitar exceso de humedad en el suelo y reducir el riesgo de enfermedades, donde es importante mantener la presión del sistema controlada para evitar fugas por los filtros de presión. Utilizar sensores de humedad en el sustrato para ajustar el programa de riego, para mantener la humedad del sustrato en niveles óptimos (entre 60-80%), evitando el encharcamiento.

Ventilación y Control de Temperatura

Se aconseja Mantener las ventanas laterales del invernadero abiertas dadas las condiciones del invernadero para permitir la circulación natural del aire y disminuir la temperatura. En cuanto al Sistema de ventilación forzada, programar ventiladores de bajo caudal y el extractor de aire para funcionar en intervalos regulares coordinado con la nebulización, especialmente entre 9 am y 4 pm, en intervalos de una hora y media de operación con pausas de media hora, controlando así el flujo de aire en el invernadero y evitando el sobrecalentamiento de los ventiladores para un rendimiento óptimo, en días lluvioso se aconseja mantener el uso frecuente de estos para mantener controlada la humedad dentro del invernadero.

Tabla 12 Ejemplo de protocolo de aplicación de tratamientos de control de temperatura.

Variable	Rango Ideal	Método de Medición	Condiciones Climáticas	Aplicación de tratamientos
Temperatura	20-27°C	Termómetro, Datalogger	Día lluvioso	Ventilación constante con intervalos de 40 minutos para reducir la humedad.
			Día Soleado	Ventilación continua para enfriar el invernadero y controlar la temperatura interna, se aconseja mantener una tasa de renovación de 20 a 30 m ³ por hora.
Humedad Relativa	60-80%	Higrómetro	Día lluvioso	Uso de nebulización de 1 a 2 aplicaciones o ninguna para mantener la humedad adecuada sin saturar las plantas(Evitar riego por goteo).
			Día Soleado	Nebulización tres veces al día por 1 minuto, para reducir la temperatura y aumentar la humedad.

Fuente: Autor.

10. CONCLUSIONES

En conclusión, este ensayo demostró la efectividad de implementar estrategias integrales de bajo costo para el control climático en el invernadero. Los resultados nos indicaron que la nebulización, aplicada en intervalos de un minuto durante los horarios de mayor radiación solar (9am- 3pm), complementada con ventilación forzada operando en los mismos periodos, pero con tiempos de funcionamiento más prolongados para la recirculación y extracción de aire además del uso permanente de polisombra para mitigar la radiación solar, este conjunto de tratamientos ayudó a reducir hasta 20°C en días con altas temperaturas igualando las condiciones climáticas de la zona, dando así temperaturas entre los 20-25°C y una humedad relativa estable entre el 70 y 80% dentro del invernadero, lo cual es beneficioso para llevar acabo la producción de semilla de papa sin limitaciones por temperatura y humedad.

La implementación de herramientas de automatización se consolidó como una estrategia clave para consolidar las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo en el invernadero. Estas tecnologías y herramientas permitieron optimizar de manera autónoma las condiciones internas, maximizando los rendimientos y garantizando un entorno controlado y eficiente para el desarrollo de las plantas.

11. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones, se sugiere evaluar el rendimiento de estos tratamientos en diferentes épocas del año.

Investigar tecnologías adicionales que complementen estos métodos convencionales como implementar sensores para un control en tiempo real de temperatura y humedad, ajustando automáticamente los sistemas según las condiciones ambientales permitiendo así optimizar aún más las condiciones dentro del invernadero.

Realizar estudios de costo-beneficio para evaluar la viabilidad económica de diferentes configuraciones y tecnologías aplicables en el control de factores climáticos.

12. BIBLIOGRAFÍA

Agropinos. (2016). Las telas de invernadero, polisombras que protegen sus cultivos. Obtenido de: <https://www.agropinos.com/blog/telas-de-invernadero-para-cuidar-sus-cultivos>

Agrosavia. (2005). I Taller nacional sobre suelos, fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de la papa. Obtenido de:
https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/17441/41887_44470.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=42

AgroSpray. (2020). Invernaderos: una gran alternativa ante climas hostiles. Obtenido de:
<https://agrospray.com.ar/blog/invernaderos/>

Aguado da Costa, J. (2012). Desarrollo de un sistema automatizado para un invernadero.

Aguirre Buenaño, N. M. (2013). *Métodos de desinfección de sustrato para el control de Damping-off en semillero de Teca (Tectona grandis Linn F.), bajo invernadero en la Empresa Seragroforest, provincia Santo Domingo de los Tsáchilas* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Alpi, A., & Tognoni, F. (1991). *Cultivo en invernadero*. Ediciones Mundi-Prensa.

Bayer. (2022). Cultivo de papa, Solución para papa. Obtenido de: <https://www.agro.bayer.co/es-co/cultivos/papa.html#:~:text=En%20Colombia%20la%20papa%20es,2%2C5%20millones%20de%20toneladas>

- Buitrago, C., Cante, M., Huertas, B., & de Enciso Clemencia, G. (1999). Ecofisiología de la papa (*Solanum tuberosum*) utilizada para consumo fresco y para la industria. *Revista Comalfi*, (1-3), 42-55.
- Busquets, F. G., & Solomando, S. (2011). Estructura e Instalaciones de un Invernadero. *Barcelona, España. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/11369/Mem%20C3%B2ria.pdf>*.
- Cabezas, M., & Corchuelo, G. (2005). Estimación de la interceptación de la radiación solar en papa criolla *Solanum phureja* (Juz et buk) en tres localidades colombianas. *Agronomía Colombiana*, 62-73.
- Camacho, M., & La Torre, M. I. (2015). Efecto promotor de bacterias PGPR sobre cultivo de papa bajo diferentes sustratos a nivel de invernadero. *The biologist*, 13(1), 75-89.
- Carmona, M. G. (2001). Control climático mediante nebulización. *Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros*, (155), 28-35.
- Castilla, N., & Prados, N. C. (2007). *Invernaderos de plástico, Tecnología y manejo*, (2ª ed, rev, y amp.): *tecnología y manejo*. Mundi-Prensa Libros.
- Cobos Cobos, C. M. (2022). Estado del arte sobre la tecnología de ventilación forzada aplicable a invernaderos de cultivos de semilla de papa criolla en el departamento de Santander.
- Cruz G. W., Peñarete M. D., Durango L. R. (2024). Diseño de invernadero para cultivo de vegetales. *Mutis*, 14(1).1-14. <https://doi.org/10.21789/22561498.1946>

- Díaz Guevara, D. (2015). Modelado y simulación del microclima en un invernadero para el estudio de métodos de calefacción pasivos adaptables a las zonas climáticas de Colombia.
- Díaz Sarmiento, H. O., & Solano Rojas, O. F. (2006). Diseño y simulación del control climático para un invernadero y base de datos de registro.
- Escalante, G. C., Quiñones, C. V., & Cancino, S. (2024). Evaluación de la Eficacia de un Protocolo de Micropropagación en dos Variedades de Papa: *Solanum tuberosum* (Perla Negra) y *Solanum phureja* (Criolla Colombia): Evaluation of the Efficacy of a Micropropagation Protocol in Two Potato Varieties: *Solanum tuberosum* (Perla Negra) y *Solanum phureja* (Criolla Colombia). *BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS*, 22(1), 1-6.
- Flores-Mora, D. M., & Brenes-Madriz, J. (1999). Producción en invernadero de semilla de papa a partir de vitroplantas.
- Flores-Velázquez, J., & Villarreal-Guerrero, F. (2015). Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(2), 303-316.
- Giraldo Ramírez, s., sierra mejía, a., ospina ortiz, m. I., higuera valencia, m., gallo garcía, y., gutiérrez sánchez, p. A. Y marín montoya, m. A. (2021). Detección y caracterización molecular del potato virus b (pvb) en cultivos de papa criolla (*solanum phureja*) en antioquia. *Acta biológica colombiana*, 27(2), 258–268.
<https://doi.org/10.15446/abc.v27n2.89422>

- Guzmán Vásquez, J. D. (2016). Caracterización fenotípica de un cultivo de papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo **phureja**, variedad criolla colombiana) irradiada con cobalto 60 ubicado en el municipio El Rosal, Finca El Pino Km 16 vía Subachoque, Cundinamarca.
- Huertas, L. O. U. R. D. E. S. (2007). El control ambiental en invernaderos: temperatura. *Revista Horticultura. Barcelona, España*.
- Hunter Industries. (2017). Manual de uso y programación del controlador X-Core XC800.
<https://www.hunterindustries.com/sites/default/files/LIT-397-RevG-OM-X-CORE-EN-web.pdf>
- INTAGRI. 2017. Requerimientos de Clima y Suelo para el Cultivo de la Papa. Serie Hortalizas. Núm. 10. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 3 p.
- Liotta, M. A., Carrión, R. A., Ciancaglini, N., & Olguin Pringles, A. (2015). Riego por goteo. PROSAP; INTA.
- Martínez, J. F. C., Quiñonez, C. V., & Bustos, F. M. (2024). Diagnóstico participativo del sistema de producción de papa en Santander y Norte de Santander. @ *limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 22(1), 99-121.
- Martínez, P. F., Roca, D., Suay, R., Martínez, M., Blasco, X., Herrero, J. M., & Ramos, C. (2002). Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero. *Comunitat Valenciana Agrària-Revista d'Informació Tècnica*, 20, 29-47.
- Meier, U. 2001. Estadios de las plantas mono y dicotiledóneas. 2a. ed. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura, Braunschweig, Alemania.
- Mendoza, A. 2013. Riego por goteo, esquema manual de riego

Mi Mundo Hidropónico. (07 de octubre de 2020). Hidropónia Control de Temperatura y Luz con Polisombra. [canal de YouTube]. YouTube. https://youtu.be/8btRa_kOAGg?si=UE3-MzM6yN5CI76D

MinAmbiente. (2023). fenómeno de El Niño y alerta a continuar preparándose. Tomado de: <https://www.minambiente.gov.co/gobierno-nacional-declara-oficialmente-el-fenomeno-de-el-nino-y-alerta-al-pais-a-continuar-preparandose/>

Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2013). PAPA Principales aspectos agroeconómicos. Perú. obtenido de http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/agroeconomia/2014/papa_2014.pdf

Monreal, L. (2001). Importancia de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en la región de Navidad, Nuevo León. Tesis de Grado, Universidad Autónoma Agraria “ANTONIO NARRO”, departamento de fitomejoramiento. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Montero, J. I., Antón, A., & Muñoz, P. (2002). Refrigeración de invernaderos II. *Tecnología de Invernaderos. Alicante: TC Ediciones*, 87-98.

Montero, J. I., Antón, A., & Muñoz, P. (2002). Refrigeración de invernaderos I: Ventilación natural. *de Tecnología de invernaderos, TC ediciones*, 77-86.

Ñústez López, C y Rodríguez Molano, L. (2024). Papa criolla (*Solanum tuberosum* L. Grupo Phureja) : manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia.

Papa, F. C. D. P. (2004). Guía ambiental para el cultivo de la papa. Obtenido de:

<http://107.21.162.148/handle/20.500.14460/16>

Pardo Solano, F. V., & Casa Yanguicela, J. C. (2020). Automatización de un sistema de riego para el control de humedad en los cultivos del invernadero# 2 del Centro Experimental Salache en la Universidad Técnica de Cotopaxi (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi; Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.).

Pinzón Chacón, E. J., & Suarez Mantilla, S. A. (2022). Análisis de costos cultivo de papa desde la perspectiva del productor: caso municipio de Pamplona.

Rodríguez-Pérez, L. (2010). Ecofisiología del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.).

Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 4(1), 97-108.

Serrano Cermeño, Z. (2005). *Construcción de invernaderos*. Ediciones Mundi-Prensa.

Shaxson, F., Barber, F. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo.

Smnutricontrol. (2020). La humedad relativa en invernadero. Obtenido de:

<https://nutricontrol.com/es/la-humedad-relativa-en-invernadero/>

Tapia, M.E., & Fries, A.M. (2007). Guía de campo de los cultivos andinos. Lima, Perú: FAO y ANPE

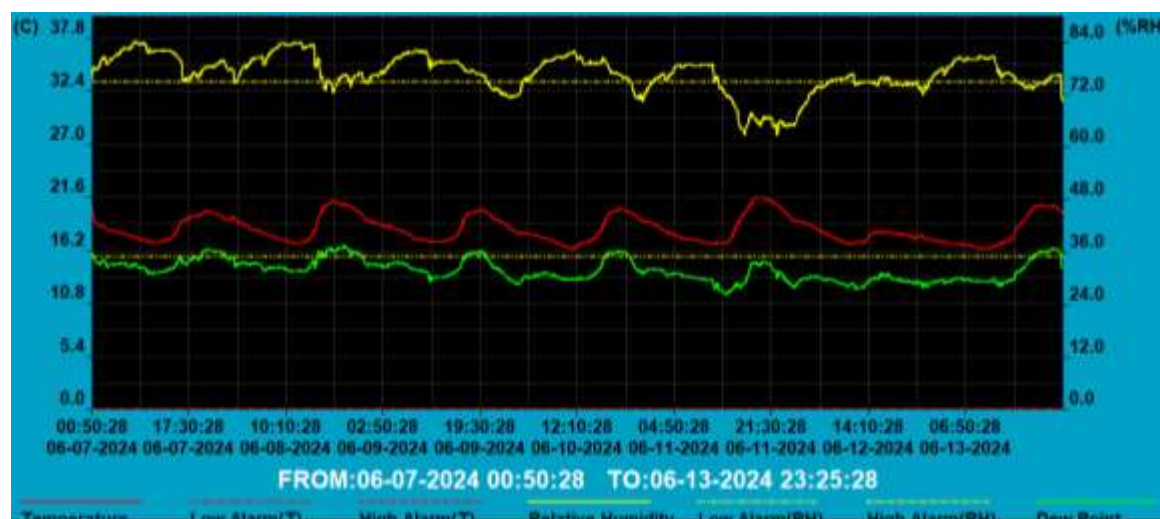
Universidad De Pamplona. (2005). *Reglamento académico para trabajo de grado*. Obtenido de

https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallIG/home_132/recursos/archivos/29062022/reglamentotg.pdf

- Valera, D. L., Arellano, M. A., Urrestarazu, M., & Molina, F. D. (2004). La ventilación forzada como técnica de control climático. *Vida rural*, 11(199), 44-47.
- Valera, D., Molina, F., & Gil, J. (2001). Las mallas como técnica de control climático en invernaderos. *Vida rural*, 8, 50-52.
- Vasco, L. (2015). Manual papa. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial, vicepresidencia de fortalecimiento empresarial, Cámara de Comercio de Bogotá. Bogotá D.C.
- Villagran Munar, E. A., Bojacá Aldana, C. R., & Rojas Bahamon, N. A. (2018). Determinación del comportamiento térmico de un invernadero espacial colombiano mediante dinámica de fluidos computacional. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 415-426.
- Villamizar Quiñonez, C., Cancino Escalante, G., & Cancino, S. E. (2024). *Los aspectos biofísicos de la provincia de Pamplona, Norte de Santander, Colombia*
- Villamizar Vera, O. Y. (2022). Evaluación del proceso de producción de papa en el Municipio de Chitagá Norte de Santander y su optimización mediante la agricultura de precisión.

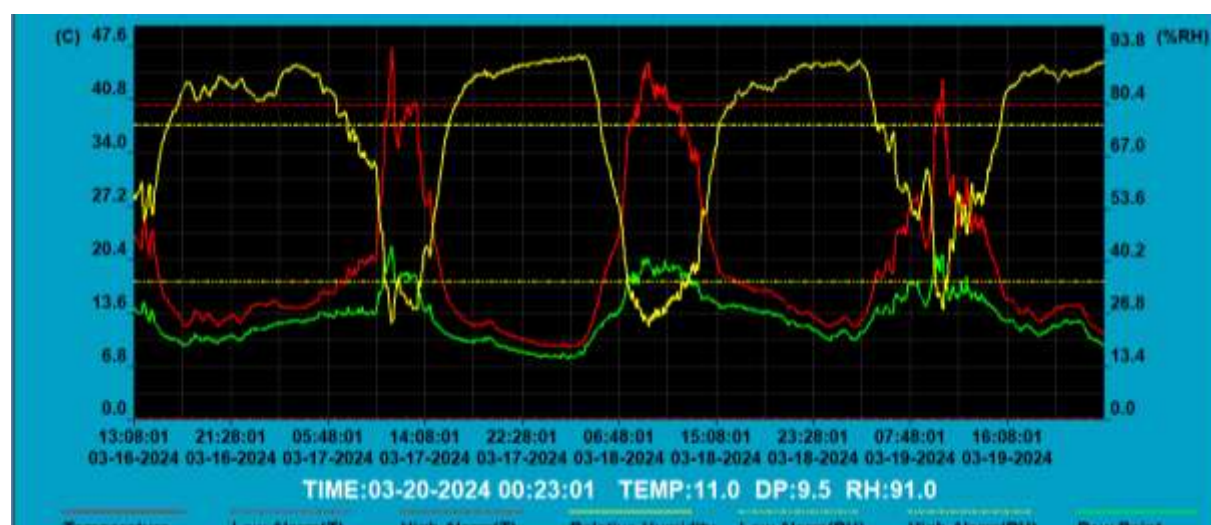
13. ANEXOS

Anexo 1. Resultados finales de Temperatura y RH con aplicación del tratamiento T4.



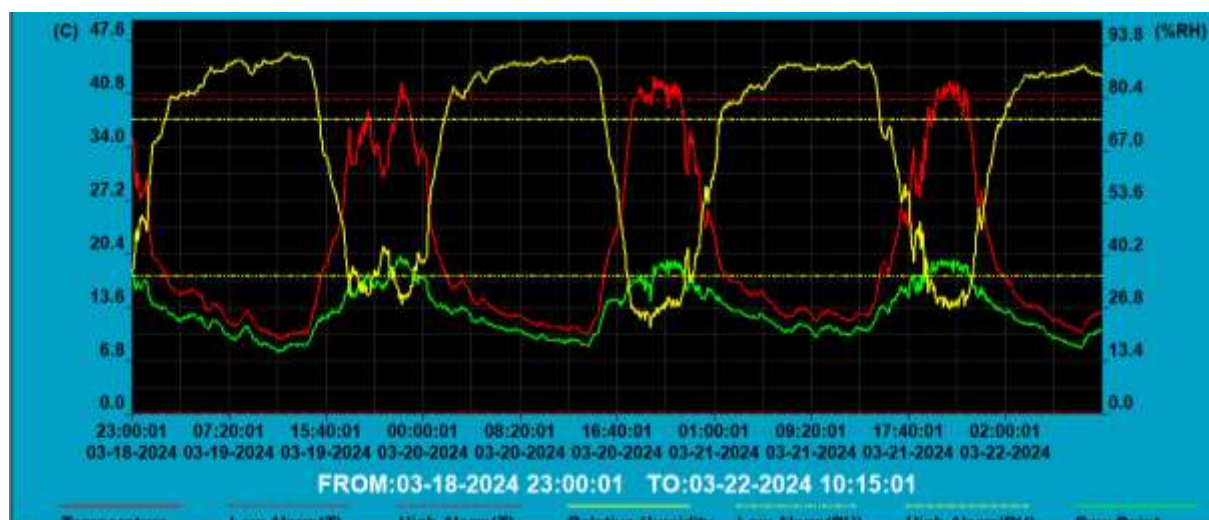
Fuente: Autor

Anexo 2. Temperatura y RH en invernadero sin aplicación de tratamientos.



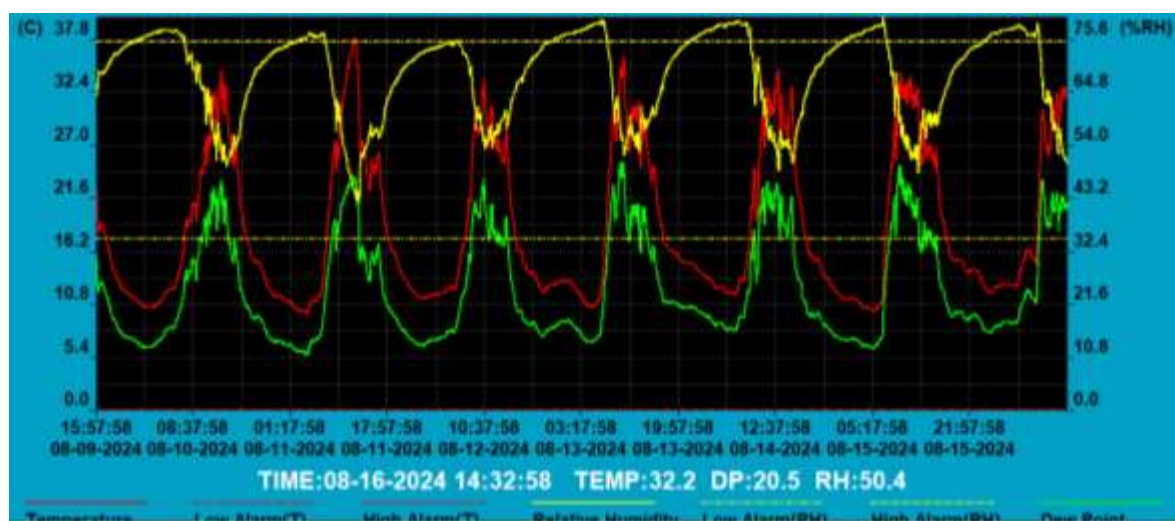
Fuente: Autor

Anexo 3. Temperatura y RH con el uso de polisombra T2.



Fuente: Autor

Anexo 4. Temperatura y RH con el tratamiento T3.



Fuente: Autor