



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 1 de febrero 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Diego Fernando Torres Hernández, con C.C. No.1.083.920.245, y **Cristian Chilito Penagos**, con C.C. No.1.083.916.135.

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o titulado **ADECUACIÓN DE UN INVERNADERO PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE DE MESA (*Lycopersicon esculentum*); CON CRITERIOS TÉCNICOS EN PITALITO, HUILA.**

Presentado y aprobado en el año 2023 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

Firma: _____



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

ADECUACIÓN DE UN INVERNADERO PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE DE MESA (*Lycopersicon esculentum*); CON CRITERIOS TÉCNICOS EN PITALITO, HUILA

AUTOR O AUTORES:

Primero Y Segundo Apellido	Primero Y Segundo Nombre
Torres Hernández	Diego Fernando
Chilito Penagos	Cristian

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Chávez Parra	Yony Arley

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería agrícola

CIUDAD: Pitalito

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2023

NÚMERO DE PÁGINAS:

55

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías X Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general X
Grabados ___ Láminas ___ Litografías ___ Mapas X Música impresa ___ Planos X Retratos ___ Sin
ilustraciones ___ Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:



MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

Inglés

1. Invernadero

Greenhouse

2. Tomate

Tomato

3. Temperatura

Temperature

4. Humedad Relativa

Relative humidity

5. DPV

VPD

6. Arduino

Arduino

7. Automatización

Automation

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La producción bajo invernadero ha incrementado los volúmenes de producción de especies vegetales de interés agroalimentario como el tomate (*Lycopersicon esculentum*); sin embargo, la variabilidad agroclimática generada en cada instalación y que influye en el desarrollo de este cultivo, genera un abanico de posibilidades que han propiciado una diversidad de criterios de manejo y de control entre los productores. El propósito de este proyecto es ajustar un invernadero ya construido y en funcionamiento, desarrollando una opción asequible económicamente, y fácil de implementar por los productores en invernaderos a pequeña escala, teniendo en cuenta los requerimientos específicos del cultivo de tomate; se hizo una evaluación de antecedentes, diagnóstico, cuantificación de variables, modificaciones y adecuaciones locativas, como también la evaluación funcional de las intervenciones.

Las temperaturas antes de la intervención superaron los 40°C, y la humedad relativa mínima registró valores menores a 52%, ambas variables en estos niveles se consideraron críticos para el cultivo de tomate, predisponiéndolo a enfermedades y disminuyendo sustancialmente su productividad. Se implementaron las modificaciones al invernadero, con el uso de tecnologías de bajo costo como Arduino y elementos de campo para la automatización, y se logró regular las variables mencionadas en aproximadamente un 20%, Lo que repercutió en un incremento de la productividad en un 75%



pasando de 4,2 Kg antes de la intervención a 7,3 Kg. Este resultado se debió a la mejora de los procesos fisiológicos de la planta en respuesta a las condiciones de confort que se le brindaron con los ajustes locativos al invernadero.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Greenhouse production has increased the production volumes of plant species of agri-food interest such as tomato (*Lycopersicon esculentum*); However, the agroclimatic variability generated in each installation and that influences the development of this crop, generates a range of possibilities that have led to a diversity of management and control criteria among producers. The purpose of this project was to adjust a greenhouse already built and in operation, developing an economically affordable option, and easy to implement by producers in small-scale greenhouses, taking into account the specific requirements of Tomato cultivation; A background evaluation, diagnosis, quantification of variables, modifications and location adjustments, as well as the functional evaluation of the interventions, were carried out.

The temperatures before the intervention exceeded 40°C, and the minimum relative humidity registered values less than 52%, both variables at these levels were considered critical for the tomato crop, predisposing it to diseases and substantially decreasing its productivity. Modifications to the greenhouse were implemented, with the use of low-cost technologies such as Arduino, and it was possible to regulate the aforementioned variables by approximately 20%, which resulted in an increase in productivity by 75%, going from 4.2 Kg. before the intervention at 7.3 Kg. This result was due to the improvement of the physiological processes of the plant in response to the comfort conditions that were provided with the locative adjustments to the greenhouse.

APROBACIÓN DE LA TESIS

Nombre Jurado:

Mauricio Duarte Toro

Firma:



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

Nombre Jurado:

Luis Humberto Martínez Palmeth

Firma:

**ADECUACIÓN DE UN INVERNADERO PARA LA PRODUCCIÓN DE
TOMATE DE MESA (*Lycopersicon esculentum*); CON CRITERIOS
TÉCNICOS EN PITALITO, HUILA**

Trabajo de grado presentado al programa de Ingeniería Agrícola
como requisito para optar al título de: Ingeniero Agrícola

Autores:

Diego Fernando Torres Hernández: 20161148321

Cristian Chilito Penagos: 20151139246

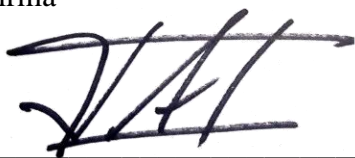
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Agrícola

Pitalito, Huila, Colombia. 2023

Firma



Director: Yony Arley Chávez Parra

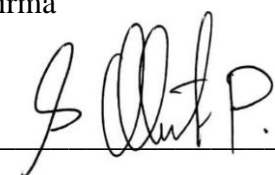
Nota de aceptación

Firma



Jurado: Mauricio Duarte Toro

Firma



Jurado: Luis Humberto Martínez Palmeth

ADECUACIÓN DE UN INVERNADERO PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE DE MESA (*Lycopersicon esculentum*); CON CRITERIOS TÉCNICOS EN PITALITO, HUILA

RESUMEN

La producción bajo invernadero ha incrementado los volúmenes de producción de especies vegetales de interés agroalimentario como el tomate (*Lycopersicon esculentum*); sin embargo, la variabilidad agroclimática generada en cada instalación y que influye en el desarrollo de este cultivo, genera un abanico de posibilidades que han propiciado una diversidad de criterios de manejo y de control entre los productores.

Los invernaderos son una buena apuesta para el desarrollo de variedad de cultivos, principalmente, los más susceptibles a los cambios drásticos en el clima. Existen en el mercado elementos tecnológicos para automatizar invernaderos, que ayudan al productor a tener autonomía y eficiencia en los ciclos de producción, sin embargo, estas tecnologías suelen ser costosas, y los pequeños y medianos productores no siempre tienen la capacidad económica para acceder a ellas. Por estas razones el propósito de este proyecto es ajustar un invernadero ya construido y en funcionamiento, desarrollando una opción asequible económicamente, y fácil de implementar por los productores en invernaderos a pequeña escala, teniendo en cuenta los requerimientos específicos del cultivo de tomate; se hizo una evaluación de antecedentes, diagnóstico, cuantificación de variables, modificaciones y adecuaciones locativas, como también la evaluación funcional de las intervenciones.

Las temperaturas antes de la intervención superaron los 40°C, y la humedad relativa mínima registró valores menores a 52%, ambas variables en estos niveles se consideraron críticos para el cultivo de tomate, predisponiéndolo a enfermedades y disminuyendo sustancialmente su productividad. Se implementaron las modificaciones al invernadero, con el uso de tecnologías de bajo costo como Arduino y elementos de campo para la automatización, y se logró regular las variables mencionadas en aproximadamente un 20%, Lo que repercutió en un incremento de la productividad en un 75% pasando de 4,2 Kg antes de la intervención a 7,3 Kg. Este resultado se debió a la mejora de los procesos fisiológicos de la planta en respuesta a las condiciones de confort que se le brindaron con los ajustes locativos al invernadero.

Palabras clave: Invernadero, tomate, temperatura, humedad relativa, DPV, Arduino, automatización

ABSTRACT

Greenhouse production has increased the production volumes of plant species of agri-food interest such as tomato (*Lycopersicon esculentum*); However, the agroclimatic variability generated in each installation and that influences the development of this crop, generates a range of possibilities that have led to a diversity of management and control criteria among producers.

Greenhouses are a good bet for the development of a wide variety of crops, mainly those most susceptible to drastic changes in climate. There are numerous technological elements on the market to automate greenhouses, which help the producer to have autonomy and efficiency in the production cycles, however, these technologies are usually expensive, and small and medium-sized producers do not have sufficient capacity to access them. . For these reasons, the purpose of this project was to adjust a greenhouse already built and in operation, developing an economically affordable option, and easy to implement by producers in small-scale greenhouses, taking into account the specific requirements of Tomato cultivation; A background evaluation, diagnosis, quantification of variables, modifications and location adjustments, as well as the functional evaluation of the interventions, were carried out.

The temperatures before the intervention exceeded 40°C, and the minimum relative humidity registered values less than 52%, both variables at these levels were considered critical for the tomato crop, predisposing it to diseases and substantially decreasing its productivity. Modifications to the greenhouse were implemented, with the use of low-cost technologies such as Arduino, and it was possible to regulate the aforementioned variables by approximately 20%, which resulted in an increase in productivity by 75%, going from 4.2 Kg. before the intervention at 7.3 Kg. This result was due to the improvement of the physiological processes of the plant in response to the comfort conditions that were provided with the locative adjustments to the greenhouse.

Keywords: greenhouse, tomato, temperature, relative humidity, VPD, Arduino, automation

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas en la producción de tomate de mesa y cultivos similares, es el cambio repentino en las condiciones climáticas, como temperatura, humedad, luminosidad, ventilación, contenido de CO₂, entre otros; también la exposición directa a plagas y enfermedades presentes en el ambiente externo. El control de éstas, resulta dispendioso y el productor opta por usar agroquímicos para evitar la pérdida del cultivo, lo que genera una problemática de contaminación del medio ambiente y afectación a la salud humana. Además, estos factores afectan negativamente la producción en cantidad y calidad teniendo en cuenta que la exigencia en el mercado es cada vez mayor sobre parámetros de inocuidad.

En la Antigüedad, no se tenía conocimiento de los invernaderos tal como se tienen en la actualidad. En el período entre el 372 al 287 a. C., en ciudades como Atenas y Roma, se llevaba a cabo una práctica consistente en trasladar las plantas desde un patio al aire libre hacia otro recinto cubierto durante la noche. Además, los agricultores en regiones como Egipto, Grecia, Israel, Roma y China también siguieron este mismo procedimiento con el propósito de proteger sus cultivos de las bajas temperaturas nocturnas y los períodos fríos. Fue hasta mediados del siglo XV que se desarrollaron las primeras estructuras que podrían considerarse como precursoras de los invernaderos modernos, que fueron construidas en el norte de Italia y el sur de Alemania. Estas, estructuras denominadas "camas móviles", se revelaron como prácticas y comunes, funcionando de manera similar a las cabañas, con el fin de resguardar los cultivos de los efectos adversos del invierno. Esta innovación contribuyó significativamente a la optimización del espacio utilizado por unidad de área cultivada (López & Pérez, 2007).

Durante el siglo XIX, con el auge de la Revolución Industrial, se experimentó un notable avance en la tecnología relacionada con los invernaderos. La construcción de la mayoría de estos recintos se caracterizaba por su simplicidad, con techos inclinados que permitían un adecuado drenaje del agua de lluvia. Para la calefacción, se empleaba la combustión de materia orgánica o estufas, y un hito significativo fue la introducción del doble acristalamiento como sistema de aislamiento térmico, logrado en el año 1829. Sin embargo, durante el siglo XX, se presentó un progreso significativo en la tecnología de los invernaderos, con un énfasis especial en Holanda, donde se dio un salto importante en la mejora de estos sistemas de cultivo. Este período estuvo marcado por cambios clave en la agricultura, especialmente después de la Primera Guerra Mundial, cuando se introdujeron los plásticos, como el polietileno, el poliestireno y el PVC. Estos materiales revolucionaron las prácticas agrícolas al ofrecer una eficiencia superior en la protección de los cultivos contra las inclemencias del clima y otros desafíos (López & Pérez, 2007).

En este contexto de avances tecnológicos en la construcción de invernaderos, se forjó un papel esencial para estos sistemas en la agricultura. Los invernaderos permitieron un control preciso de las condiciones ambientales en su interior, lo que resultó en la capacidad de las plantas para producir frutos en épocas del año en las que normalmente no había cosecha. Esta innovación tecnológica se convirtió en una solución fundamental para superar obstáculos como las estaciones frías y la variabilidad climática, lo que garantizó un suministro constante de productos agrícolas a lo largo del año.

Asimismo, los avances en la construcción de invernaderos, incluido el uso de plásticos y la creación de estructuras más eficientes, permitieron no solo la protección de los cultivos de las condiciones climáticas adversas, sino también la optimización de factores cruciales como la temperatura, la humedad y la iluminación. Esto posibilitó a los agricultores programar cosechas durante todo el año, lo que se tradujo en un suministro continuo de alimentos y en un importante paso hacia la seguridad alimentaria (López & Pérez, 2007). Por lo tanto, se puede afirmar que la evolución tecnológica en los invernaderos durante el siglo XX no solo mejoró la eficiencia agrícola, sino que también complementó un papel esencial en la transformación de la agricultura moderna.

La producción de cultivos hortícolas bajo condiciones controladas ha experimentado un notable desarrollo en los últimos cincuenta años en diversas naciones, entre las que destacan Holanda, Francia, Israel, EE.UU., Brasil, Italia, España y Japón, entre otros. Estos países han alcanzado significativos avances tecnológicos, particularmente en el cultivo del tomate, lo que se ha convertido en un impresionante aumento de al menos un 500% en la productividad agrícola. Este incremento sustancial ha permitido que dichas naciones se consoliden como actores altamente competitivos en la industria agrícola y se posicionen como líderes en la exportación de productos hortícolas. En la actualidad, Holanda, España e Israel emergen como los principales productores de hortalizas cultivadas en invernaderos (Jaramillo *et al.*, 2013).

El progreso tecnológico en la producción agrícola bajo invernadero es evidente con la implementación de una variedad de estrategias, como el manejo integrado de plagas, la adopción de buenas prácticas agrícolas y el cumplimiento de estándares fitosanitarios para la exportación, entre otros. Estas innovaciones han surgido como respuesta a las crecientes preocupaciones globales relacionadas con temas ecológicos, sociales y económicos vinculados a la producción sostenible de alimentos. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que, a pesar de las considerables ganancias logradas gracias a estas tecnologías, su uso inadecuado puede generar problemas ambientales significativos. Por lo tanto, es esencial implementarlas de manera responsable y garantizar su aplicación con fundamentos de sostenibilidad, teniendo en cuenta las implicaciones a largo plazo en el medio ambiente, así como los aspectos económicos y sociales.

Con el propósito de reducir la brecha existente en la agricultura y aprovechar el avance tecnológico, es esencial implementar la tecnología en el campo, y también adaptar y desarrollar normas técnicas específicas para cada región, teniendo en cuenta su entorno y su contexto socioeconómico. Además, es crucial aplicar un manejo agronómico del cultivo adecuado en el entorno donde se instala. La estabilización del clima en los invernaderos se presenta como una alternativa de agricultura sostenible, promoviendo un desarrollo gradual de las plantas y ejerciendo un impacto directo en la productividad, calidad y rentabilidad de los cultivos.

Montoya (2021) señala que, en la era actual, en la que la tecnología avanza a pasos agigantados, se han realizado avances sustanciales en la agricultura tecnificada, con un enfoque en la reducción de costos de implementación. La agricultura tecnificada se presenta como un pilar fundamental para garantizar la seguridad alimentaria de la población, como lo indican Calicioglu *et al.* (2019).

Los invernaderos equipados con tecnología avanzada, según Rodríguez et al. (2014), han evolucionado considerablemente con el tiempo, ofreciendo un mayor control sobre los ambientes de cultivo, lo que se traduce en un mejor rendimiento de las tierras cultivadas. Además, estudios como los de Rodríguez et al. (2015) y Perea (2007) han demostrado que estos sistemas cuentan con modelos especializados que brindan ventajas importantes para los agricultores, como la protección contra las inclemencias del clima, plagas y enfermedades, así como el control de factores críticos como la temperatura, humedad, relativa, nutrición vegetal y tiempo de riego, entre otros aspectos significativos

El tomate de mesa se destaca como una de las hortalizas más ampliamente cultivadas a nivel global. Durante el año 2018, la producción mundial de este cultivo versátil alcanzó la impresionante cifra de 182 millones de toneladas. Es importante destacar que una parte significativa de esta producción se origina en sistemas de cultivo bajo invernadero, los cuales han desempeñado un papel fundamental en el aumento de la producción y calidad de los tomates a lo largo de los años (Zhihao *et al.*, 2022).

En Colombia, el cultivo del tomate se extiende prácticamente por todas sus regiones y ostenta un lugar destacado entre los cultivos agrícolas más significativos, en virtud de su elevada demanda como producto básico en la canasta familiar. Esta hortaliza, con un ciclo vegetativo que oscila entre los 100 y 110 días desde su siembra, se distingue por requerir una superficie de terreno relativamente reducida para su producción y por su capacidad de adaptación a diversos tipos de suelos en el país. Como resultado de la optimización de la cadena comercial y la adopción de prácticas de cultivo tecnificadas en los últimos años, la producción de tomate ha experimentado un crecimiento constante en Colombia, reflejando un notable avance en el sector agrícola nacional (Barraza *et al.*, 2004).

En 2020, en el departamento del Huila se produjeron aproximadamente 19,717 toneladas de tomate en 1,102 hectáreas de cultivo. Sin embargo, este rendimiento es superado por departamentos como Antioquia, donde, a pesar de tener el doble de área cultivada (2,400 hectáreas), la producción es casi doce veces mayor, alcanzando las 229,125 toneladas (Agronet, 2020). Esta diferencia se debe en gran medida a que en el Huila el cultivo de tomate se realiza principalmente a campo abierto, con un rendimiento inferior en comparación con otros departamentos que emplean prácticas más intensivas y tecnificadas. En el municipio de Pitalito, en el Huila, se destaca como la principal zona de producción de tomate de mesa, con un ejemplo notable en el año 2016, cuando se cosecharon 2,400 toneladas en 169 hectáreas de cultivo, seguido por Garzón, que produjo 2. 145 ton en 143 has sembradas (Departamento del Huila, 2019).

En climas tropicales, como el de Pitalito, donde la temperatura y la humedad relativa del aire pueden variar significativamente a lo largo del día, resulta fundamental contar con datos precisos de estas variables para intervenirlas en beneficio de los cultivos. En las primeras horas de la mañana, se evidencia que la temperatura del aire aumenta de manera rápida, mientras que la temperatura del cultivo tiende a elevarse de manera más gradual. Esta discrepancia provoca la condensación de agua sobre las plantas, creando un ambiente propicio para el desarrollo de fitopatógenos. Para prevenir esta situación, se hace necesario ventilar el invernadero de manera adecuada, permitiendo que el aire se caliente gradualmente y que la condensación se disipe de manera eficiente (Escobar & Lee, 2009).

En el contexto actual, la automatización de procesos representa un cambio significativo en las tareas que antes eran realizadas por personas a través de dispositivos mecánicos, electrónicos y sistemas de control (Ramírez, 2016). Tal como señalan Barrera y otros autores, Arduino se presenta como una plataforma de hardware libre basada en un microcontrolador y una placa mecánica, diseñada para facilitar la implementación de tecnología electrónica en proyectos de ingeniería, incluyendo aquellos relacionados con la agricultura en invernaderos (Barrera *et al.*, 2004). En la actualidad, se tienen a disposición tecnologías inteligentes que resultan accesibles y beneficiosas para diversas áreas ingenieriles, lo que incluye la aplicación de estas innovaciones en el contexto abordado en este trabajo de investigación.

Tomate de mesa

La especie *Solanum lycopersicum* tiene su origen en la región Andina, en el territorio comprendido entre el sur de Colombia y el norte de Chile. Es dicho que probablemente desde allí fue trasladada a América Central y México, donde se convirtió en una planta doméstica (Monardes 2009).

Características botánicas del tomate de mesa

El tomate de mesa pertenece a la familia Solanaceae. Se trata de una planta dicotiledónea (Cestoni et al. 2006) y herbácea transitoria, que se cultiva de forma anual, y se consumen sus frutos (Semillaria, 2015). La tabla 1 muestra las características taxonómicas del tomate:

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteridae
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Solanum</i>
Especie	<i>lycopersicum</i>

TABLA 1: Taxonomía del tomate de mesa. Fuente: Semillaria 2015.

TALLO

Es grueso, pubescente, anguloso y de color verde (figura 1). Puede medir entre 2 y 4 cm de ancho y se adelgaza en la parte superior. En el tallo primario se forman tallos secundarios, nuevas hojas y racimos de flores. En la parte distal se localiza el meristemo apical, de donde emergen los nuevos primordios florales y foliares (Monardes 2009). Al inicio, el tallo posee una apariencia herbácea; se compone de una epidermis con pelos glandulares, corteza, cilindro vascular y tejido medular (Escobar & Lee 2009).



FIGURA 1: Tallo del tomate. Fuente propia

HOJA

Tiene característica pinnada y compuesta, como se ilustra en la figura 2. Presenta de siete a nueve folíolos peciolados que miden entre 4 y 60 mm x 3 a 40 mm, lobulados y su borde es dentado, alternos, opuestos y, generalmente, de color verde; glanduloso, cubierto de pelo fino por el haz y ceniciento por el envés. Tienen una cobertura de pelos glandulares, organizados alternadamente sobre el tallo (Monardes 2009). La postura de las hojas en el tallo puede ser de diferentes maneras, ya sea semirecta, horizontal o inclinada. También existe la de tipo estándar, enana u hoja de papa (*peruvianum*, *pimpinellifolium* o *hirsutum*) (Ipgri, 1996).



FIGURA 2. Hoja del tomate. Fuente propia

FLOR

Es perfecta y regular. Los sépalos, los pétalos y los estambres están insertados en la base del ovario. El cáliz y la corola poseen cinco o más sépalos y de cinco pétalos de color amarillo, que se encuentran dispuestos de forma helicoidal. Constan de cinco o seis estambres que se alternan con los pétalos, que forman los órganos reproductivos. El ovario posee dos segmentos o más. (Infoagro Systems S.L. 2016). En la figura 3, se observa la forma de la flor.



FIGURA 3. Flor del tomate. Fuente propia

FRUTO

Es una baya bilocular o plurilocular, sub-esférica, con forma globosa o alargada, que puede alcanzar un peso que va desde unos pocos miligramos hasta unos 600 gramos. El fruto está formado por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas. Cuando se encuentra en estado inmaduro es de color verde (ver figura 4) y, cuando madura, es de color rojo (Ediform, 2006). Existen especies de tomate con frutos de color amarillo, morado, naranja, rosado, verde, entre otros.



FIGURA 4. Fruto del tomate. Fuente propia

SISTEMA RADICULAR

Se constituye de una raíz principal, con raíces secundarias y adventicias; estas últimas son numerosas y potentes, que no se profundizan más de 30 centímetros (Monardes 2009, INTA 2014). El interior de la raíz consta de tres partes: epidermis, córtex y cilindro vascular. La epidermis contiene pelos que absorben agua y nutrientes, entre tanto el córtex y el cilindro vascular cumplen la función de transporte de los nutrientes (Infoagro Systems S.L. 2016).

Variables climáticas que afectan el desarrollo del tomate (*Lycopersicon esculentum*) en invernadero

TEMPERATURA

La temperatura media óptima para el desarrollo del cultivo de tomate está entre los 18 y 27°C. Cuando la temperatura media mensual es mayor, las plantas no crecen y se afecta la

fructificación. De igual manera, la temperatura nocturna puede ser determinante en la polinización y fecundación del fruto, pues debe ser suficientemente fresca (15 a 22°C). Las temperaturas por debajo de los 15°C también originan problemas en el desarrollo de la planta y pueden ocasionar deformación de los frutos. Generalmente, con temperaturas fuera del rango óptimo, la fecundación es defectuosa o nula. La maduración del fruto también se ve afectada por la temperatura en cuanto a la precocidad y la coloración, por lo tanto, los valores alrededor de los 10°C, así como superiores a los 30°C originan tonalidades amarillentas (Monardes, 2009).

Según Allende et al., 2017, la temperatura es el factor más importante que influye en la floración y polinización del tomate, pues el rango óptimo para que sea efectiva, es de 18 a 25°C. Cuando la temperatura sobrepasa los 35°C se produce aborto floral y cuando es menor a 13°C se producen problemas en el cuaje y se obtienen frutos deformes. De esta forma, se puede afirmar que un rango entre los 15 y 30°C se considera óptimo para el buen desarrollo del cultivo de tomate.

HUMEDAD RELATIVA

Para el óptimo desarrollo del cultivo de tomate, la humedad relativa debe mantenerse entre 60% y 80%. Los valores muy altos ayudan a la aparición de hongos que producen enfermedades y el agrietamiento del fruto, también es más difícil la fecundación, debido a la compactación del polen, abortando parte de las flores. Por el contrario, cuando la humedad relativa es muy baja, se disminuye la fijación del polen al estigma de la flor (Monardes, 2009).

DIÓXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono (CO₂) desempeña un papel fundamental en la agricultura, es una de las moléculas esenciales en el proceso de fotosíntesis. Junto con factores ambientales como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar; esta molécula influye significativamente en el crecimiento de las plantas. Para el cultivo de tomate, mantener una concentración de CO₂ en el rango de 900 a 1000 partes por millón (ppm) se considera óptimo.

Cuando la concentración de CO₂ es inferior a este rango, es necesario tomar medidas para mejorar las condiciones en el invernadero. Esto puede lograrse mediante la ventilación del invernadero, permitiendo la entrada de aire externo que contiene CO₂, o mediante la inyección de CO₂ directamente en el ambiente de cultivo a través de sistemas de irrigación (Valerio, 2021). Esta práctica, si bien puede aumentar la producción y acelerar el crecimiento de las plantas, no siempre resulta rentable debido a los costos asociados con la inyección controlada de CO₂ y la inversión requerida. En muchos casos, la rentabilidad del cultivo no justifica la inversión adicional.

Por lo tanto, se ha establecido que mantener una concentración de CO₂ en torno a las 550 ppm representa un punto óptimo para el cultivo de tomate. En este nivel, se puede lograr un equilibrio eficiente entre la inyección de oxígeno externo y la renovación del CO₂ presente en el invernadero, sin desperdiciar el gas hacia la atmósfera ni generar contaminación ambiental. Esta concentración de CO₂, respaldada por investigaciones en el campo de la agricultura, se considera un enfoque práctico y sostenible para el cultivo de tomate.

VENTILACIÓN

El correcto movimiento del aire dentro del cultivo influye positivamente en el desarrollo de la planta, ya que ayuda a controlar factores climáticos como la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO₂. La ventilación en el invernadero se suele realizar mediante el uso de aperturas o ventanas, situadas en los techos o en los laterales de éste, o también mediante el uso de ventiladores de diferentes caudales, lo que permite la renovación del aire en el cultivo. El objetivo de la ventilación es extraer el exceso de temperatura y humedad. La velocidad y cantidad de calor que se debe sacar, dependen principalmente de la temperatura exterior y de la velocidad del aire. Es importante que la dimensión, localización y control de la ventilación, sean correctas (Cervantes, 2020).

RADIACIÓN SOLAR

Según Escobar & Lee (2009), la radiación solar es expresada en vatios por metro cuadrado (W/m²) para valores instantáneos o en Mega Joules por metro cuadrado y por día (MJ/m²/día) para valores acumulados por día. La Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) es el tipo de radiación utilizada por el proceso de fotosíntesis en las plantas; cuando las radiaciones son mayores a los 700 nm, no hay favorecimiento a la fotosíntesis, pero si se genera acumulación de calor en el invernadero. La RFA puede representar entre el 45 al 50 % de toda la radiación solar que se recibe, y es la que favorece mayormente el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Para el cultivo de tomate, la radiación solar mínima requerida para no perder rendimiento en el cultivo, debe ser de 10 MJ/m²/día. La exposición de la planta de tomate a la alta radiación solar y alta temperatura provoca grietas en los frutos, enrollamiento de las hojas y lo que se denomina “golpe de sol”, lo cual genera un área blanca brillante. Por el contrario, la baja radiación y temperaturas bajas ocasionan manchas en la maduración del fruto, como también la deformación en los mismos (Intagri, 2019).

DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR

El Déficit de Presión del Vapor (DPV) es la medida de cantidad de vapor presente en el aire. Es utilizado normalmente para medir el clima en el invernadero y potencial de condensación, también puede servir para evaluar la amenaza de enfermedades y necesidades en los cultivos bajo invernadero. A medida que la cantidad de vapor en el aire aumenta, la presión de vapor también es mayor. Cuando el aire tiene el máximo contenido de vapor, la presión de vapor pasa a ser presión de vapor de saturación (P_{vsat}), la cual está directamente relacionada con la temperatura. El valor del DPV indica la aproximación del punto de condensación, y, por ende, de las condiciones que favorecen la aparición de enfermedades dentro del invernadero (Rizo, 2010).

Mientras aumenta el DPV, la planta tiene la necesidad de extraer más agua del del suelo mediante de las raíces para poder satisfacer la demanda hídrica y de nutrientes. Es por eso, que los valores óptimos para el DPV en invernadero están entre 0.45 y 1.25 KPa, el valor óptimo es alrededor de 0.85 KPa. La mayoría de las plantas tienen un DPV óptimo entre 0.8 y 0.95 KPa (Prenger & Ling, 2000) y se calcula de la siguiente forma, según Veikko (2018):

Se calcula la presión de vapor saturado, para esto se debe conocer la temperatura.

La fórmula para calcular P_{vsat} (en Kilopascales) es la siguiente:

$$PV_{sat} = [(610,7 * 10)^{(7,5 * T / 237,3 + T)}] / 1000 \quad (1)$$

Donde: T = Temperatura en grados Celsius °C

Luego se calcula la presión de vapor aire, para esto se debe conocer la temperatura ambiente y la humedad relativa

La fórmula para calcular PVaire (en Kilopascuales) es la siguiente:

$$PV_{aire} = \{ [(610,7 * 10)^{(7,5 * T / 237,3 + T)}] / 1000 \} * (HR / 100) \quad (2)$$

Donde: T = Temperatura en grados Celsius (°C); HR= Humedad Relativa (%)

Para calcular el déficit de presión de vapor, se realiza la diferencia entre presión vapor saturado y presión de vapor del aire mediante la siguiente formula:

$$DPV = PV_{sat} - PV_{aire} \quad (3)$$

SUELO

La planta de tomate requiere un suelo suelto, con buen drenaje, de textura franca, con adecuada cantidad de materia orgánica y buena capacidad de retención de humedad. Se desarrolla muy bien en suelos de tipo arcilloso enarenado. El pH puede ser entre ligeramente ácido o ligeramente alcalino. Se puede afirmar que es una especie de las que se cultivan en invernadero de las que es más tolerante a las condiciones de salinidad, bien sea del suelo o del agua de riego (Zambrano, 2009).

Elementos mecánicos y electrónicos

ARDUINO

Es una plataforma abierta con fines electrónicos, que fue desarrollada para crear prototipos, y se basa en software y hardware flexibles y de uso fácil. Según Prieto, (2017), Arduino tiene la capacidad de tomar información del ambiente, a través de una amplia variedad de sensores mediante los pines de entrada, no afecta lo que hay a su alrededor, siendo también capaz de controlar luces, motores, ventiladores y demás variedad de actuadores. Incorpora un microcontrolador que se puede reprogramar, con una serie de pines hembra que se encuentran unidos internamente a las pastillas de E/S del microcontrolador. El chip en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación de la misma plataforma, con un software propio (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). El lenguaje de programación se puede ampliar a través de librerías C++. La tecnología Arduino, anteriormente ya ha sido probada en entornos de ambiente controlados como lo ha demostrado Mahmood, (2014).

Las placas Arduino tienen la característica de ser relativamente económicas al compararlas con otras plataformas que usan microcontroladores. El software IDE Arduino se puede ejecutar en varios sistemas operativos como Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux. El entorno de su programación es fácil de usar para principiantes, pero también lo

suficientemente flexible para que personas con conocimientos avanzados puedan aprovecharlo (Pinzon *et al.*, 2018). En la figura 5 se ilustra la placa de Arduino Uno.



FIGURA 5. Placa Arduino Uno. Fuente: www.arduino.cc

SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

Los sensores son un conjunto de captadores capaces de medir distintos comportamientos del entorno; para este proyecto se tuvieron en cuenta variables como temperatura y humedad, utilizando sensores DHT11 (Opiron,2015). Este elemento se compone de un sensor capacitivo y un termistor para medir la humedad, que garantiza una alta confiabilidad, además de una buena estabilidad a largo plazo. El funcionamiento se da mediante ciclos de operación con una duración determinada. El rango de medición de temperaturas es entre 0 y 50°C con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. En el caso de la medida de humedad, es entre 20% y 80% con un margen de error del 5% (Internet de las cosas, 2015). El uso de sensores como este en el sistema, representa una herramienta interesante para la mejora en el manejo de las condiciones ambientales al interior del invernadero, además de la entrega de información confiable al usuario. Su función primordial es recoger los datos sobre temperatura y humedad de manera automática, almacenarlos en una base de datos, y finalmente publicar estos datos en una página web o ser almacenada (memoria extraíble o disco duro), también se compensa por su bajo costo para proyectos de baja envergadura. La figura 6 ilustra el sensor DHT11.



FIGURA 6. Sensor de temperatura y humedad DTH11. Fuente: www.arduino.cc

SENSOR MQ135

Es un sensor electroquímico, que varía su resistencia cuando es expuesto a determinados gases. Su funcionamiento se basa en que internamente posee un calentador que se encarga de aumentar la temperatura interna y con esto el sensor reacciona con los gases, generando un cambio en el valor de la resistencia. El calentador, dependiendo del modelo, puede funcionar con un voltaje entre los 2 y los 5 voltios. El sensor tiene un comportamiento como resistencia, que necesita una resistencia de carga (RL) que cierra el circuito y con este hace un divisor de tensión, y luego leerlo desde un microcontrolador. Son usados en equipos de control de

calidad del aire en edificios y oficinas, son adecuados para detectar gases como de NH₃, NO_x, alcoholes, bencenos, humo, dióxido de carbono, entre otros. Los datos se toman mediante cuatro de los seis pines que incorpora el dispositivo; los dos pines restantes son utilizados para obtener la energía que se necesita para calentar el microtubo (Pinzon *et al.*, 2018). La figura 7 muestra una imagen de referencia a este sensor.



FIGURA 7. Sensor MQ 135. Fuente: <https://naylampmechatronics.com>

PANTALLA O DISPLAY LCD

Una pantalla LED es un dispositivo de salida, diseñado para mostrar datos o información al usuario (ver figura 8). Se compone de diodos emisores de luz o LED. Los LED presentan ventajas importantes, ya que tienen un bajo consumo de energía, además un largo tiempo de vida al aire libre, tamaño reducido, resistencia a las vibraciones, poca emisión de calor, etc., cuyas características hacen que las pantallas LED son ideales para trabajar en ambientes como es de un invernadero (Acosta *et al.*, 2015).

El módulo I2C (Inter-Integrated Circuit) conocido también como interface de 2 cables, es un bus de comunicación serial, lo que significa que envía o recibe datos uno por uno, funciona a una velocidad normal de 100 kbit/s y puede alcanzar hasta 3,4 Mbit/s. La comunicación consta de 2 pines, SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock), es decir, datos seriales y reloj serial. (Lukianova, 2021). Este módulo tiene la ventaja de reducir de 16 a 4 el número de pines que normalmente se conectarían desde el LCD al Arduino, además, posee un potenciómetro para regular el brillo de la pantalla.



FIGURA 8. Pantalla LCD. Fuente: www.arduino.cc

MÓDULO DE LECTURA-ESCRITURA MICRO SD

Es un dispositivo diseñado para acceder a la memoria Micro SD en modo SPI, por lo que las señales de control quedan claramente identificadas por los nombres de las señales en este bus

de comunicación. Admite tarjetas micro SD y micro SDHC. Incluye MC74VHCT125A/74LVC125A como circuito lógico de voltaje para comunicación de 3,3V o 5V. Puede alimentarse hasta 5V gracias al regulador de voltaje que está incluido en la placa (ver figura 9). En este proyecto se utilizó para crear un Data Logger, el cual es un sistema que permite registrar y almacenar datos o información. Esta información pueden ser variables físicas como temperatura, humedad, presión, aceleración, etc. También se podrían guardar datos de horas de trabajo, cantidad de personas que transitan por un lugar en particular, velocidad de los vehículos que pasan por una calle, etc. En este proyecto se utilizó para guardar los datos de las variables medidas con los sensores mencionados anteriormente.

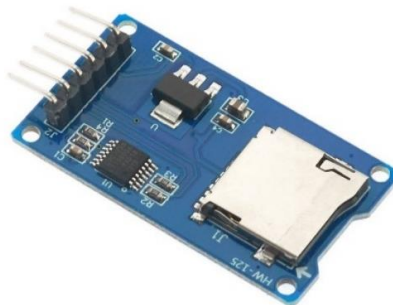


FIGURA 9. Módulo lector micro SD. Fuente: naylampmechatronics.com

La facilidad de adquisición y el costo de automatización, fueron las principales motivaciones para ejecutar el proyecto, también la plataforma Arduino es una solución relativamente económica con precios accesibles, la implementación de los sistemas de control, flexibilizan la creación de programas a medida, para manejar datos, en comparación con otras plataformas (Guijarro *et al.*, 2018).

En un invernadero convencional, en donde todas las actividades se realizan de forma manual, requieren de gran cantidad de tiempo para tener un control efectivo del microambiente, se dedica una persona constantemente a monitorear y tomar decisiones y esto incrementa los costos de producción, disminuyendo la rentabilidad; Por lo que, se plantea el siguiente interrogante: ¿Las modificaciones locativas y la implementación de tecnologías de bajo costo para el monitoreo de cultivos, permiten ajustar variables climáticas requeridas por el cultivo de tomate de mesa en un invernadero y mejorar su productividad?

OBJETIVOS

Objetivo general

Acondicionar un invernadero para la producción de tomate de mesa (*Lycopersicon esculentum*) a pequeña escala, proporcionando un microclima adecuado para el cultivo, mediante el uso de tecnologías de bajo costo y la aplicación de estándares técnicos.

Objetivos específicos

- Diagnosticar las condiciones ambientales, operacionales y agronómicas del invernadero objeto de este estudio, con criterios técnicos.

- Intervenir el invernadero para la regulación de temperatura, humedad relativa, agua de riego, CO₂, DPV, garantizando un ambiente adecuado para el cultivo de tomate según requerimientos técnicos.
- Evaluar el comportamiento climático del invernadero luego de la intervención mediante procesos estadísticos descriptivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El proyecto se llevó a cabo en la finca “Biocampo”, ubicada en la vereda Paraíso Acacos, corregimiento de Regueros, al norte del casco urbano del municipio de Pitalito, Huila, con coordenadas 1.922043N, 76.064941W (ver figura 10), a una altitud de 1440 msnm, en un invernadero ya construido, con dimensiones de 5x10m (50m²) conformado por estructura metálica, cubierta en teja de policarbonato y paredes en plástico transparente.

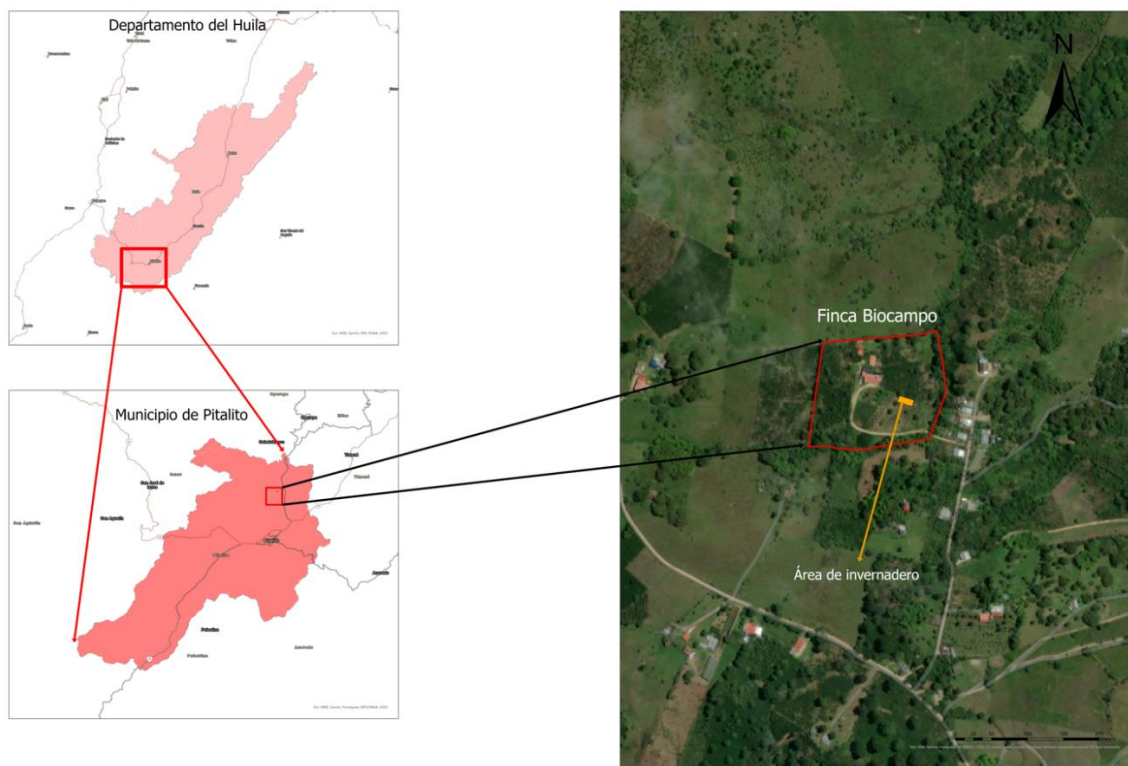


FIGURA 10. Ubicación finca Biocampo. Fuente: Propia.

Desarrollo del proyecto

Inicialmente se evaluaron los cultivos anteriores de tomate en el invernadero, sus condiciones locativas (estructura, cubiertas y funcionalidad) y la climatología de la zona aledaña, se midió el comportamiento de las principales variables que afectan el cultivo (Humedad relativa, temperatura) y se cuantifico el déficit de presión de vapor.

Se diseñó un código de programación para una placa Arduino, un Data Logger que lee datos proporcionados por sensores y son guardados en una tarjeta Micro SD como archivo en formato txt. Las variables de temperatura y humedad relativa se midieron con dos sensores DHT11, dispuestos en sitios estratégicos dentro del invernadero (ver figura 11), obteniendo datos en diferentes puntos y promediándolos. Se instaló un sensor de gases MQ135, para cuantificar el dióxido de carbono dentro del microambiente. Se programó la toma de datos cada hora, tiempo medido por un módulo de reloj RTC DS3231. Los datos medidos se mostraron en un display LCD 16x2.

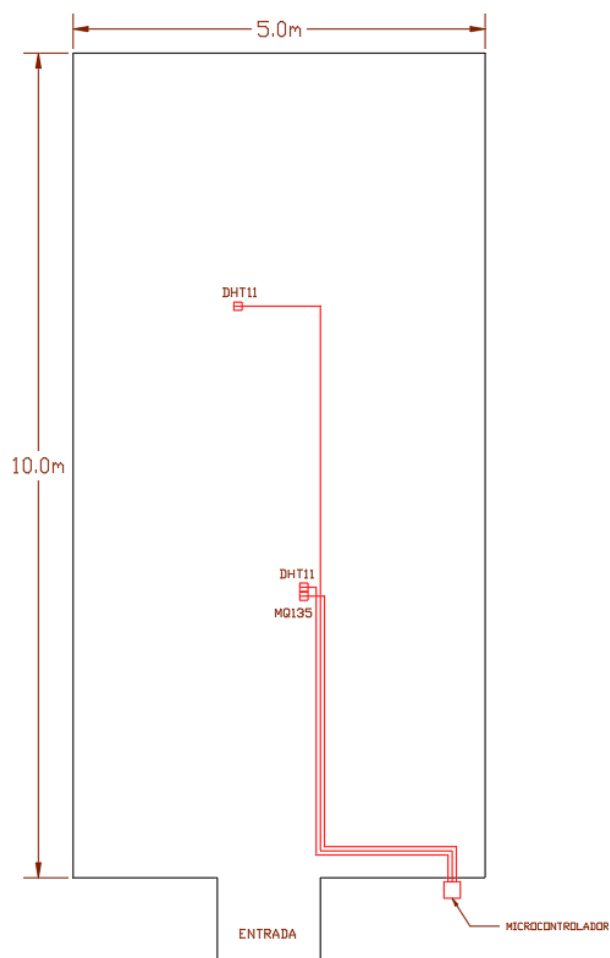


FIGURA 11. Disposición de sensores dentro del invernadero. Fuente propia

DESARROLLO DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN Y EJECUCIÓN

Diseñado el componente electrónico, se creó un código de programación en el IDE de la plataforma Arduino. Para el sensor DHT11 se instaló la librería DHT sensor library. Para el módulo de display LCD I2C la librería LiquidCrystal I2C. La librería instalada para el módulo de reloj RTC 3231 es la RTCLib, y la librería SD para el módulo lector de tarjetas Micro SD. Luego de instaladas las librerías, se programó cada uno de los componentes del sistema. El anexo 1 contiene el código de programación del Data Logger.

La figura 12 ilustra la conexión de los dispositivos y la asignación de los pines en la placa Arduino Uno para el circuito instalado. Este diseño se realizó con la ayuda del software Fritzing, un programa de código abierto, para elaborar esquemas de prototipos electrónicos para proyectos con Arduino.

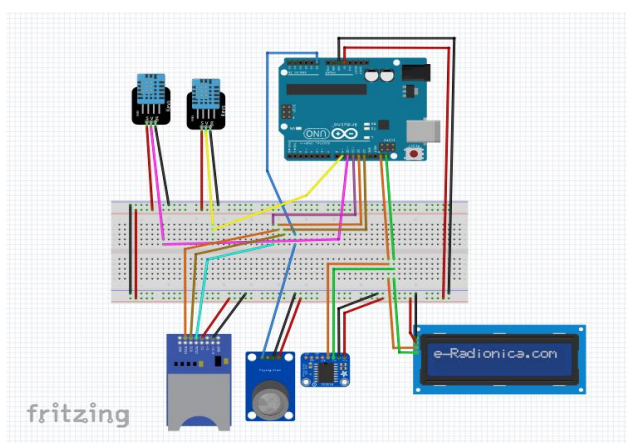


FIGURA 12. Esquema de conexión de componentes del circuito inicial. Fuente propia

Con el montaje instalado se procedió a la toma de datos durante ocho (8) semanas en los meses de febrero y marzo de 2023. en las primeras cuatro semanas sin presencia de cultivo y el tiempo restante en la etapa vegetativa. Posterior a ello, se tomó una muestra de datos de una semana para calcular el déficit de presión de vapor y evaluar la correspondencia de las condiciones agroclimáticas con las requeridas por el cultivo.

Pasado un mes de toma de datos en ausencia de cultivo, se inició la adecuación del terreno consistente en el retiro de arvenses, descompactación manual, aplicación de materia orgánica (4 Kg de compost por m lineal de surco) e inoculación biológica con un insumo agrícola a base de *Trichoderma sp.* y *Paecilomyces sp.* El primero como preventivo de hongos fitopatógenos y el segundo como preventivo de nemátodos fitoparásitos, y se conformaron 5 surcos altos de 9 metros cada uno, en la figura 13 se evidencia el procedimiento ejecutado.



FIGURA 13 . Adecuación de suelo para el cultivo. Fuente propia.

Se instaló un sistema de riego localizado y automatizado, que también permitiera fertirrigar por gravedad, conformado por 5 líneas de 9 m de longitud, con cintas de goteo a 10 cm entre emisor, como se diagrama en la figura 14.

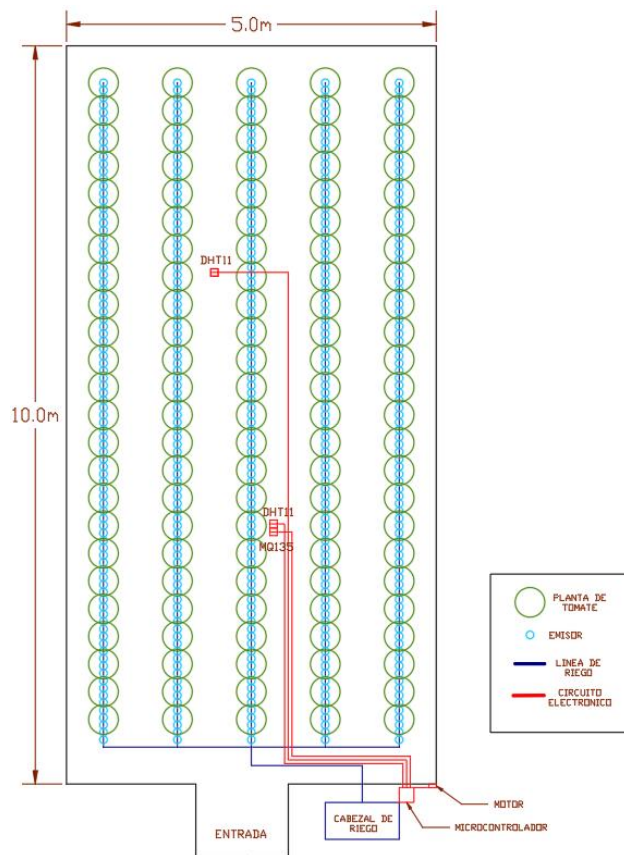


FIGURA 14. Distribución de plantas y sistema de riego. Fuente propia

El requerimiento de agua de riego se calculó con el método Blaney Criddle, con temperatura media de 25°C, Latitud Norte 2°, insolación alta, humedad relativa mínima baja, velocidad del viento ligera, como se muestra en la figura 15, con esta contingencia de variables climáticas la ET_c diaria fue de 2,11 l/m²

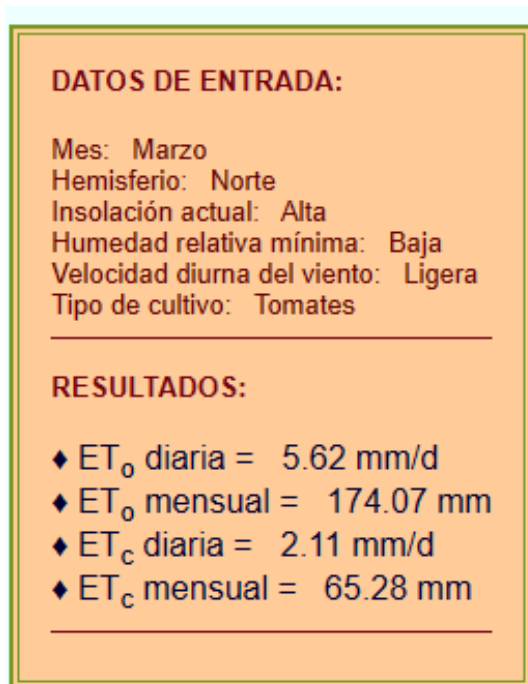


FIGURA 15. Contingencia para el Cálculo de la ET_c. Fuente propia

El área efectiva de riego AER se calculó estimando un ancho efectivo de riego por surco de 40 cm. Formulado así:

$$AER = \text{Longitud del surco (m)} \times \text{surcos(und)} \times \text{ancho del surco (m)}$$

$$AER = 9m \times 5 \times 0,4m$$

$$AER = 18 m^2$$

El cálculo del requerimiento de agua diario (Q diario) para el invernadero se muestra en la siguiente formula:

$$Q \text{ Diario} = AER \times ET_c$$

$$Q \text{ Diario} = 18 m^2 \times 2,11 l/m^2$$

$$Q \text{ Diario} = 37,98 l$$

Para el abastecimiento de agua del invernadero se contó con un tanque reservorio ubicado 12 m por encima de su cota, logrando una presión estática de 0,82 bares apta para descarga por riego localizado, y se utilizó una cinta de goteo con emisores a 10 cm con un Q de descarga nominal según ficha técnica de 0,91 l/h a la presión estática medida. Con estos datos se

calculó el caudal total del sistema QT, así: 5 líneas de riego, de 9 m de longitud cada una, 10 emisores por metro, y cada uno descarga 0,91 l/h.

$$QT = 5 \text{ líneas} \times 9\text{m} \times 10 \text{ emisores} \times 0,91 \text{ l/h}$$

$$QT = 409,5 \text{ l/h}$$

Para el tiempo de riego se calculó un tiempo de llenado del sistema de 45 segundos y además se planteó la siguiente regla:

Litros	Minutos	
409,5	60	
37,98	X	X = 5,56 minutos

En términos prácticos se determinó que el tiempo de riego diario para el cultivo es de 7 minutos. Y la frecuencia de aplicación se estableció de acuerdo con la textura FL para efectuar dos aplicaciones diarias, que se establecieron de manera automática con un programador de marca CEPEX. En la figura 16 se observa la disposición de las líneas de riego y las plántulas.



FIGURA 16. Disposición del sistema de riego y de plántulas. Fuente propia

Se dispusieron las plantas de cultivo a 40 cm entre sí, el material usado fue el híbrido ETEREI, de la marca Bayer, indeterminado tipo milano, especial para invernadero, con alta Resistencia a fusarium raza 1, verticillium raza 1, virus del torrado, virus del mosaico del tomate razas 0-2, Cenicilla por Fulvia razas A-E y virus de la peste negra, y resistencia Intermedia a Nemátodos. Posteriormente a la siembra se implementó un plan de fertilización aplicado por riego y usado por el productor por recomendación técnica de un asistente técnico y que se relaciona en la figura 17.

Fertilizante	DIAS DESPUES DEL TRASPLANTE (g por instalación)																				
	3	7	10	14	17	21	24	28	31	35	38	42	45	49	52	56	60	63	67	70	74
UREA						90		90		90		90		90		90		75		75	
Sulfos	50	50	50	75	75		125		125		125		125		125		125		100		100
Nitrato de potasio KNO3			75		75		75		75		75		75		75		100		125		125
Cloruro de potasio KCl								75		75		75		100		100		100		100	
Nitrato de Calcio CaNO3	50		50		50		75		75		75		75		75		100		100		100
Sulfato de magnesio MgSO4		25		25		25		50		50		50		75		75		75		75	
Sulfato de Zinc ZnSO4				5		5		5		5		10		10		10		10		10	
Acido borico o Borax				5		5		5		5		10		10		10		10		10	

Fertilizante	DIAS DESPUES DEL TRASPLANTE (g por instalación)															TOTAL (g)	
	77	81	84	88	91	95	98	102	105	109	112	116	119	123	126		130
UREA	75		75		75		75		75		75		75		75		1290
Fosfato Monoamónico MAP		75		75		75		75		75		50		50		50	1775
Nitrato de potasio KNO3		125		125		125		125		125		125		125		125	1875
Cloruro de potasio KCl	100		15		15		15		15		15		15		15		830
Nitrato de Calcio CaNO3		100		100		100		100		100		100		100		100	1625
Sulfato de magnesio MgSO4	75		75		75		75		75		75		75		75		1125
Sulfato de Zinc ZnSO4	10		10		10		10		10		10						120
Acido borico o Borax	10		10		10		10		10		10						120

FIGURA 17. Plan de fertilización implementado. Fuente propia

El sistema de tutorado se hizo mediante la técnica de espaldera y amarre individual con el uso de anillos que evitan el estrangulamiento de la planta, con cuerda plástica de 4 m de longitud plegada sobre una percha metálica de fabricación propia, que permitió el descuelgue sistemático de las plantas superando la deficiencia de altura con la que se construyó el invernadero (Figura 18).



FIGURA 18. Sistema de tutorado. Fuente propia

Se monitorearon las plagas y enfermedades 3 veces por semana, con revisión en el haz y envés de las hojas, y aplicando periódicamente (2 veces por semana) de manera preventiva

un insumo agrícola biológico a base de los hongos: *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Lecanicillium lecanii* y la bacteria *Bacillus thuringiensis*.

El control de arvenses se realizó de manera manual, y es de destacar su baja incidencia que se puede inferir por la racionalidad del uso de agua solo en los surcos, y la baja diseminación de semillas por ser un espacio cerrado con poca interacción con el medio externo.

Ya con el cultivo en proceso de desarrollo, y con base en las mediciones previas de las variables temperatura y humedad relativa, se procedió a modificar el invernadero, iniciando con el despeje de una de las paredes en plástico, para instalar malla anti-insectos, para favorecer la ventilación y regular la temperatura y la humedad relativa y demás variables agroclimáticas, mediante el intercambio de aire.

El plástico retirado de la pared se usó como cortina plegable según las necesidades. El mecanismo consta de un tubo galvanizado giratorio como eje principal, soportado por cuatro rodamientos tipo chumacera, dispuestas en la parte superior de las columnas de la estructura, lo cual se encarga de recoger o desplegar el plástico.

Con el fin de hacer más eficiente el procedimiento de apertura y cierre manual de la cortina, se desarrolló un nuevo algoritmo de programación en Arduino, que mantiene la toma constante de datos, y además tiene la capacidad de enviar señales a un motor de corriente directa que abre y cierra la cortina a determinadas horas del día.

Al nuevo código se le agregó un ciclo con la función de activar y desactivar de forma automática el sistema de cortina (ver código en anexo 2). El programa envía señales mediante pines de comunicación a un dispositivo llamado “puente H”, que funciona como interruptor y hace cambiar el sentido de giro del motor. Se programó la apertura a las 7:00am y el cierre a las 5:00 pm.

El componente electrónico mantuvo los elementos que ya se habían instalado, pero se le adicionó, además del motor y el puente H, dos interruptores de final de marcha, que se encargan de detener el mecanismo cuando la cortina llega a sus topes. La figura 19 muestra el diseño del nuevo circuito, dibujado en el software Fritzing.

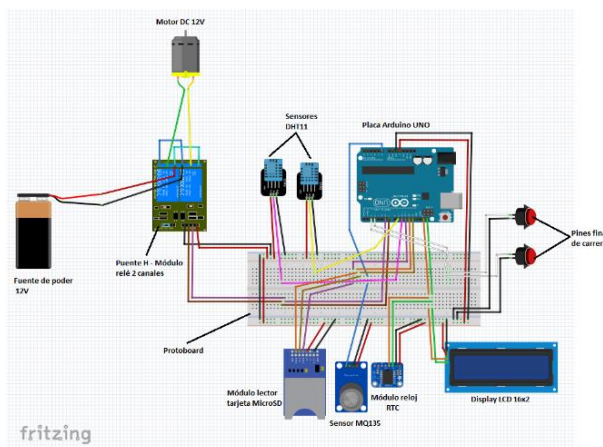


FIGURA 19. Circuito de control de mecanismo implementado. Fuente propia

Para hacer girar el eje se empleó un mecanismo de cadena – piñón con un motor de limpiaparabrisas de carro que funciona con 12 voltios, proporcionados por una fuente de poder que convierte la corriente alterna a corriente directa y entrega el voltaje y amperaje necesarios para mover el dispositivo.

Al plástico de la cortina se le ató un tubo en el extremo inferior, usado como contrapeso para evitar que el viento la levantara, además sirvió para accionar los interruptores de final de marcha cuando llegara a sus topes. La figura 20 muestra la disposición del mecanismo descrito en la pared del invernadero.

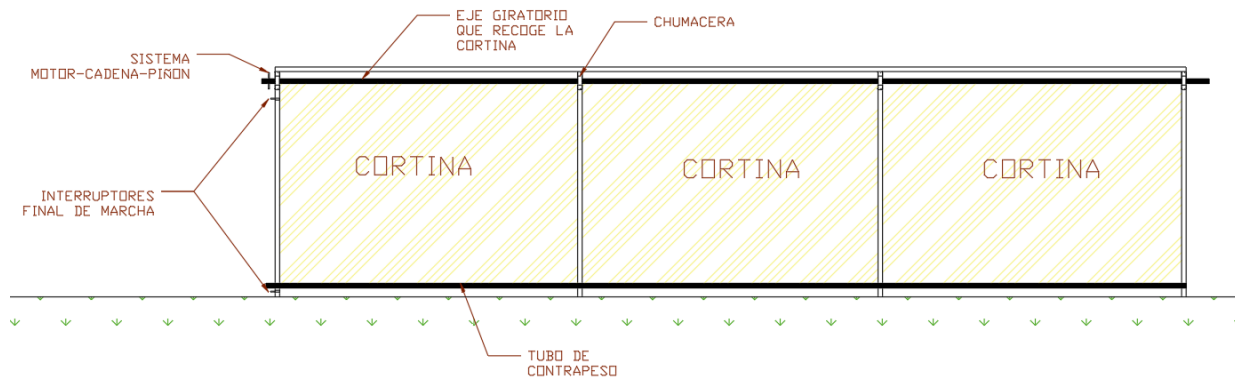


FIGURA 20. Diseño de instalación de mecanismo de cortina. Fuente propia

Luego de las modificaciones se continuó con la toma de datos y monitoreo de las variables, identificando cambios positivos para el cultivo en desarrollo.

Para el análisis de datos, se realizó una prueba de hipótesis o t de Student para muestras emparejadas, para una muestra del promedio horario de los 7 días de la semana de cada una de las variables medidas, incluyendo el DPV. Este análisis se ejecutó con ayuda de Microsoft Excel, con el fin de hallar el nivel de significancia de los resultados obtenidos antes y después de la intervención.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diagnóstico

En esta fase se identificó que la productividad no era la ideal para el híbrido cultivado, según información suministrada por el administrador de la finca Biocampo, quien logró una producción de 4,2 Kg por planta, con afectaciones fitosanitarias considerables. Se infiere que esta situación se debió a condiciones agroclimáticas inadecuadas, principalmente por las altas temperaturas y la falta de un sistema de riego automatizado y eficiente, lo cual predispone el cultivo a enfermedades y alteraciones fisiológicas. En la figura 21 se evidencia el estado del cultivo anterior durante su etapa productiva.



FIGURA 21. Imágenes del cultivo anterior. Fuente: Biocampo

Durante la inspección visual al invernadero, se observó que las paredes y el techo estaban sucias por polvo y moho, como se muestra en la figura 22, esto disminuía sustancialmente la luminosidad y por tanto la fotosíntesis del cultivo, se hizo limpieza general del establecimiento. El sistema de riego se ejecutaba de forma manual y en tiempos variables, de lo que se pudo inferir que las plantas podrían presentar desequilibrio hídrico afectando su desarrollo y producción. Las paredes laterales estaban cubiertas por plástico, lo cual impedía el intercambio de aire dentro del microambiente.



FIGURA 22. Estado del exterior del invernadero antes del estudio.

El diagnóstico cualitativo se ratificó mediante medición de la temperatura y humedad relativa con el uso de sensores que permitieron la cuantificación de las variables. Se hizo el montaje del circuito para la toma de datos como se muestra en la figura 23.

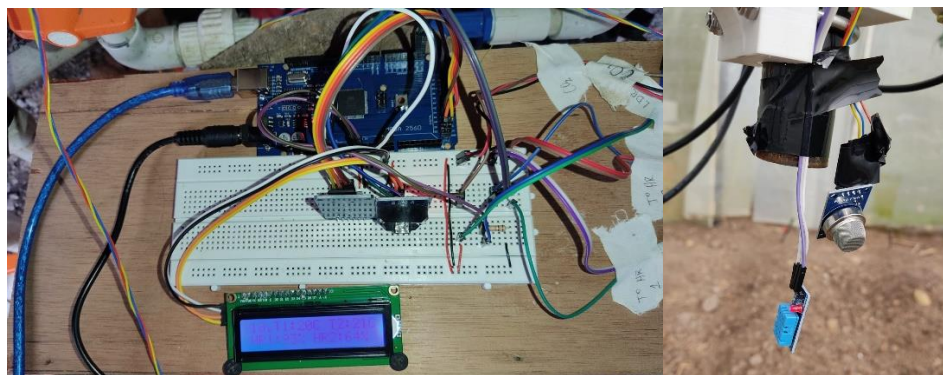


FIGURA 23. Instalación de sensores en el invernadero sin cultivo.

Los datos tomados durante el primer mes, evidenciaron una situación desfavorable para el cultivo de tomate, las temperaturas sobrepasaron los 30°C en el día, y en la noche se sitúan por debajo de los 15°C. Con base en los resultados obtenidos, se sacó una muestra de datos de una semana, los cuales se promediaron entre cada una de las 24 horas de los 7 días. La tabla 2 recoge la muestra de datos de temperatura de una semana, con su promedio horario.

TEMPERATURA									
	HORA	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM	PROM
1	1:00 AM	15.34	16.45	17.45	15.98	16.8	15.45	16.89	16.34
2	2:00 AM	15.45	16.45	17.5	15.8	16.82	15.5	16.8	16.33
3	3:00 AM	15.4	16.45	17	16	16.8	15.4	16.8	16.26
4	4:00 AM	15.34	16.5	17.5	16.01	16.84	15.56	16.82	16.37
5	5:00 AM	15.33	16.56	17.5	16.01	16.9	15.69	16.83	16.40
6	6:00 AM	15.9	16.56	15.9	16.09	16.91	15.9	16.84	16.30
7	7:00 AM	16.87	17.3	17.99	16.8	16.96	16.2	19.45	17.37
8	8:00 AM	18.9	18.78	19.45	19.67	17.45	18.9	23.67	19.55
9	9:00 AM	22.98	20.34	21.98	23.12	19.44	21.9	28.11	22.55
10	10:00 AM	29.39	24.45	26.66	28.23	22.44	25.89	30.33	26.77
11	11:00 AM	35.65	30.23	30.33	36	26.56	29.98	35.31	32.01
12	12:00 PM	39.33	37.89	36.12	40.1	36.98	36.01	38.89	37.90
13	1:00 PM	40.23	37.89	38.99	42	39.99	40.1	40.14	39.91
14	2:00 PM	40.3	38.03	40.034	40.08	39.99	40.4	40.21	39.86
15	3:00 PM	38.45	30.23	39.4	36.4	33.44	39.99	36.34	36.32
16	4:00 PM	33.01	27.45	35.4	33.22	28.45	36.45	31.98	32.28
17	5:00 PM	26.98	22.89	30.12	26.34	23.45	30.09	27.34	26.74
18	6:00 PM	20.23	18.02	27.8	20	19	27.01	21.56	21.95
19	7:00 PM	17.45	16.9	22.45	16.98	18.23	22.12	19.45	19.08
20	8:00 PM	16.34	16.2	18.9	15.33	16.99	18.34	17.76	17.12
21	9:00 PM	16.3	15.34	16.8	15.1	16.1	17.98	16.98	16.37
22	10:00 PM	16.1	15.3	16.6	15	16	16	16.23	15.89
23	11:00 PM	16.03	15.2	16.2	14.99	15.88	16.05	16.09	15.78
24	12:00 AM	16.02	15.1	15.99	14.8	15.66	16	16	15.65

TABLA 2. Muestra de datos de medición de temperatura sin presencia de cultivo.

El gráfico 1 muestra la curva de temperatura en el invernadero sin presencia de cultivo, con el promedio de datos, señalando el rango ideal según la literatura consultada (15-30°C).

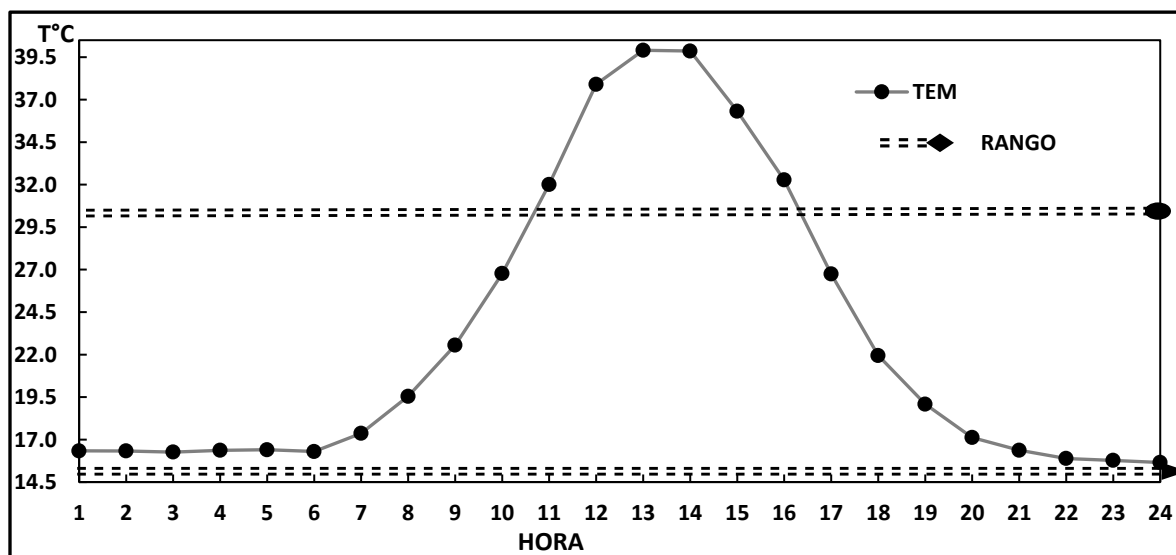


GRÁFICO 1. Curva de temperatura con datos promediados de una semana sin presencia de cultivo.

La humedad relativa, durante el día arrojó valores menores a 50% y durante la noche por encima del 90%. Los porcentajes altos aumentan las probabilidades de aparición de hongos y bacterias en el cultivo. En la tabla 3 se observa la muestra de datos de la variable con resultados de una semana, con su promedio horario.

HUMEDAD RELATIVA									
HORA	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM	PROM	
1	1:00 AM	98	97	99	97	96	95	93	96.43
2	2:00 AM	97	98	98	97	96	95	93	96.29
3	3:00 AM	98	98	99	97	96	95	93	96.57
4	4:00 AM	97	98	99	96	96	95	93	96.29
5	5:00 AM	96	98	99	96	93	95	94	95.86
6	6:00 AM	97	97	95	96	92	95	90	94.57
7	7:00 AM	97	97	93	94	92	91	85	92.71
8	8:00 AM	94	96	86	90	86	87	83	88.86
9	9:00 AM	96	91	81	86	83	84	80	85.86
10	10:00 AM	70	82	76	83	80	76	74	77.29
11	11:00 AM	66	74	65	80	78	70	70	71.86
12	12:00 PM	55	70	57	74	73	62	68	65.57
13	1:00 PM	49	66	43	66	41	55	62	54.57
14	2:00 PM	54	58	40	59	48	50	59	52.57
15	3:00 PM	59	62	63	66	58	43	51	57.43
16	4:00 PM	51	69	66	72	63	56	48	60.71

17	5:00 PM	62	74	69	79	69	63	59	67.86
18	6:00 PM	60	86	76	84	78	78	64	75.14
19	7:00 PM	66	90	84	89	89	83	76	82.43
20	8:00 PM	78	95	88	94	92	90	84	88.71
21	9:00 PM	83	96	89	97	95	91	89	91.43
22	10:00 PM	88	97	93	97	96	94	93	94.00
23	11:00 PM	98	97	96	97	97	94	95	96.29
24	12:00 AM	97	98	96	98	99	98	98	97.71

TABLA 3. Muestra de datos de medición de humedad relativa sin presencia de cultivo.

El gráfico 2 muestra el comportamiento en valores máximos y mínimos de la humedad relativa dentro del invernadero sin presencia de cultivo durante 24 horas (promedio de una semana).

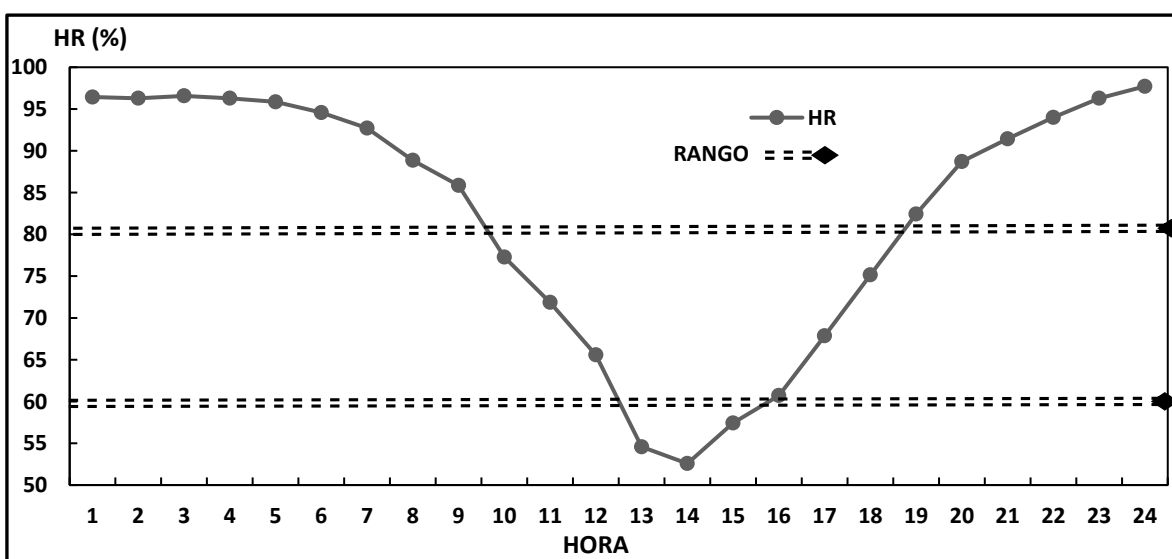


GRÁFICO 2. Curva de humedad relativa con datos promediados de una semana sin presencia de cultivo.

Otra de las variables que se pretendía medir es el contenido de dióxido de carbono, pero los resultados que arrojó el sensor utilizado (MQ135) no son confiables, ya que no mide solamente CO₂ sino cualquier clase de gas presente en el ambiente. Debido a esto, finalmente esta variable no se tuvo en cuenta para el presente estudio.

Se realizó el cálculo del déficit de presión de vapor y se obtuvieron los resultados de la tabla 4.

DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR									
HORA	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM	PROM	
1	1:00 AM	0.035	0.056	0.020	0.054	0.077	0.088	0.135	0.07
2	2:00 AM	0.053	0.037	0.040	0.054	0.077	0.088	0.134	0.07
3	3:00 AM	0.035	0.037	0.019	0.055	0.077	0.087	0.134	0.06
4	4:00 AM	0.052	0.038	0.020	0.073	0.077	0.088	0.134	0.07

5	5:00 AM	0.070	0.038	0.020	0.073	0.135	0.089	0.115	0.08
6	6:00 AM	0.054	0.057	0.090	0.073	0.154	0.090	0.192	0.10
7	7:00 AM	0.058	0.059	0.144	0.115	0.155	0.166	0.339	0.15
8	8:00 AM	0.131	0.087	0.316	0.229	0.279	0.284	0.497	0.26
9	9:00 AM	0.112	0.215	0.502	0.396	0.384	0.420	0.761	0.40
10	10:00 AM	1.229	0.552	0.839	0.651	0.543	0.801	1.124	0.82
11	11:00 AM	1.981	1.118	1.513	1.188	0.764	1.271	1.716	1.36
12	12:00 PM	3.202	1.975	2.571	1.927	1.692	2.258	2.224	2.26
13	1:00 PM	3.807	2.238	3.982	2.787	4.348	3.336	2.823	3.33
14	2:00 PM	3.447	2.786	4.432	3.036	3.832	3.766	3.057	3.48
15	3:00 PM	2.782	1.633	2.642	2.064	2.165	4.201	2.965	2.64
16	4:00 PM	2.466	1.135	1.954	1.426	1.435	2.679	2.469	1.94
17	5:00 PM	1.353	0.725	1.324	0.720	0.895	1.578	1.491	1.16
18	6:00 PM	0.949	0.289	0.896	0.374	0.483	0.785	0.926	0.67
19	7:00 PM	0.678	0.193	0.435	0.213	0.230	0.453	0.542	0.39
20	8:00 PM	0.409	0.092	0.262	0.104	0.155	0.211	0.325	0.22
21	9:00 PM	0.315	0.070	0.210	0.051	0.091	0.185	0.213	0.16
22	10:00 PM	0.220	0.052	0.132	0.051	0.073	0.109	0.129	0.11
23	11:00 PM	0.036	0.052	0.074	0.051	0.054	0.109	0.091	0.07
24	12:00 AM	0.055	0.034	0.073	0.034	0.018	0.036	0.036	0.04

TABLA 4. Resultados cálculo del DVP sin presencia de cultivo.

En el gráfico 3 se puede evidenciar que entre las 12:00 am a las 4:00 pm y de las 5:00 pm a las 10:00 am del día siguiente, se presentan condiciones desfavorables para el cultivo, y solamente 3 horas del día las plantas se encuentran en un estado de confort en cuanto a la relación de humedad y temperatura, expresada en DPV.

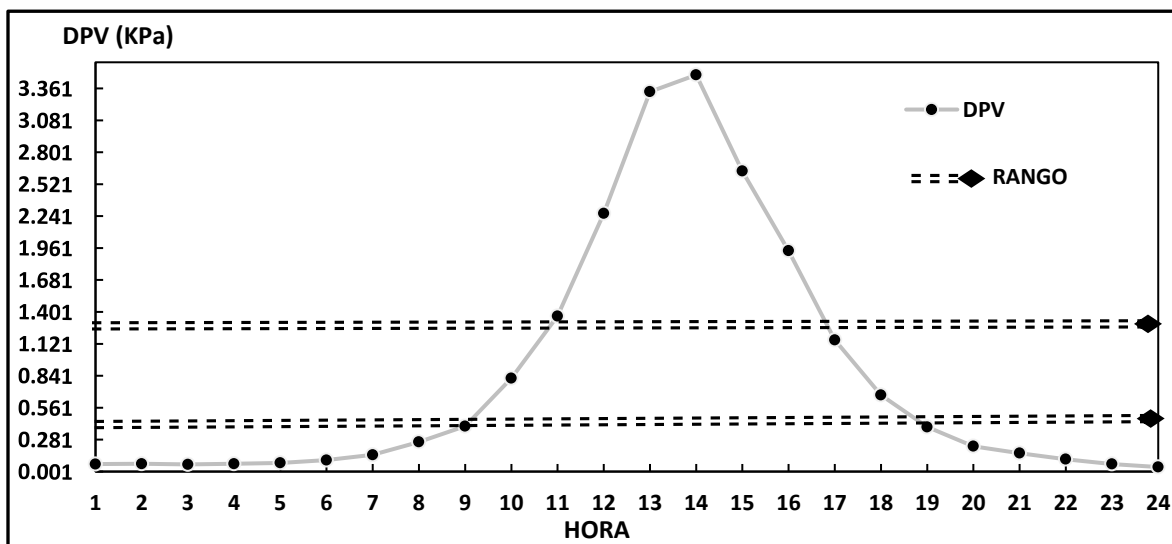


GRÁFICO 3. Curva de DPV con datos promediados de una semana sin presencia de cultivo.

Intervención del invernadero

En cumplimiento del segundo objetivo del proyecto, y con base en los datos obtenidos en la fase de diagnóstico se procedió a su intervención. Se retiró el plástico de una de las paredes laterales del invernadero, que corresponde con los frentes de viento predominantes en el sitio, para favorecer la ventilación; y para limitar la entrada de insectos se puso en su lugar una malla anti-insectos (figura 24).



FIGURA 24. Extracción del plástico de la pared lateral, e instalación de malla anti-insectos.

Las intervenciones en el manejo agronómico del cultivo descritas en la metodología en cuanto a adecuación del terreno, inoculación biológica y enmiendas, riego, fertilización, control de arvenses, tutorado, demostraron una favorabilidad en el desarrollo del cultivo, en la figura 25 se evidencia un comportamiento fisiológico ideal para el cultivo de tomate bajo invernadero.



FIGURA 25. Estado fisiológico y morfológico posterior a la intervención.

De acuerdo con los datos obtenidos en horas de la noche y la madrugada, la temperatura tiende a estar por debajo de los 15°C ideales para el cultivo, y fue necesario diseñar un mecanismo de apertura y cierre de cortina, accionado mediante el microcontrolador Arduino como se describe en la metodología; de este modo se hizo la instalación de los componentes electrónicos (ver figura 26) y el montaje en el invernadero.

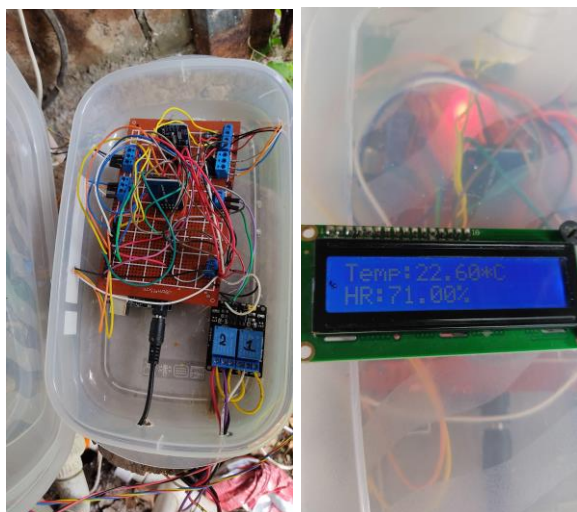


FIGURA 26. Montaje y conexión de los componentes del circuito final.

En la figura 27 se evidencia la instalación de la cortina y el funcionamiento con el motor.



FIGURA 27. Cortina en funcionamiento con motor.

VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Posteriormente a la intervención del invernadero, en la tabla 5 se muestra el comportamiento de la temperatura; se evidencia un ajuste de los valores más acordes con el requerimiento del cultivo de tomate, aunque los cambios sustanciales se dieron durante las horas del día.

TEMPERATURA									
HORA	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM	PROM	
1	1:00 AM	15.34	16.45	17.45	15.98	16.8	15.45	16.89	16.34
2	2:00 AM	15.45	16.45	17.5	15.8	16.82	15.5	16.8	16.33
3	3:00 AM	15.4	16.45	17	16	16.8	15.4	16.8	16.26
4	4:00 AM	15.34	16.5	17.5	16.01	16.84	15.56	16.82	16.37
5	5:00 AM	15.33	16.56	17.5	16.01	16.9	15.69	16.83	16.40
6	6:00 AM	15.9	16.56	15.9	16.09	16.91	15.9	16.84	16.30
7	7:00 AM	16.87	17.3	17.99	16.8	16.96	16.2	19.45	17.37
8	8:00 AM	18.9	18.78	19.45	19.67	17.45	18.9	19.9	19.01
9	9:00 AM	22.98	20.34	21.98	23.12	19.44	21.9	20.32	21.44
10	10:00 AM	29.39	24.45	26.66	28.23	19.99	22.43	21.45	24.66
11	11:00 AM	33.56	30.23	30.33	29.43	22.34	23.98	25.67	27.93
12	12:00 PM	30.05	32	36.12	28.45	24.33	25.45	29.45	29.41
13	1:00 PM	31.45	33.55	38.99	31.09	26.33	28.56	32.4	31.77
14	2:00 PM	29.99	33.7	40.034	31.3	27.45	29.44	32.9	32.12
15	3:00 PM	28.45	30.23	39.4	28.45	25.33	25.99	19.87	28.25
16	4:00 PM	24.7	27.45	35.4	25.44	21.09	20.45	19.1	24.80
17	5:00 PM	24.4	22.89	30.12	22.09	20.68	18.9	18.8	22.55
18	6:00 PM	23.09	18.02	27.8	20	19	18.5	18.5	20.70
19	7:00 PM	17.45	16.9	22.45	16.98	18.23	18.1	17.9	18.29
20	8:00 PM	16.34	16.2	18.9	15.33	16.99	18.09	17.76	17.09
21	9:00 PM	16.3	15.34	16.8	15.1	16.1	17.98	16.98	16.37
22	10:00 PM	16.1	15.3	16.6	15	16	16	16.23	15.89
23	11:00 PM	16.03	15.2	16.2	14.99	15.88	16.05	16.09	15.78
24	12:00 AM	16.02	15.1	15.99	14.8	15.66	16	16	15.65

TABLA 5. Muestra de datos de medición de temperatura luego de la intervención.

El gráfico 4 muestra la comparación de curvas de temperatura, en la que se nota una importante diferencia entre la hora 8 hasta la 19 aproximadamente, cuyo resultado demuestra que las modificaciones que se ejecutaron tuvieron efecto positivo en esta variable, disminuyendo de manera significativa los picos máximos, los cuales representaban condiciones extremas para el cultivo de tomate. De igual forma, es evidente que en las horas de la noche (hora 1 a 6 y hora 20 a 24) no hubo diferencias importantes ya que dichas reformas no alteraron las condiciones climáticas para este periodo de tiempo.

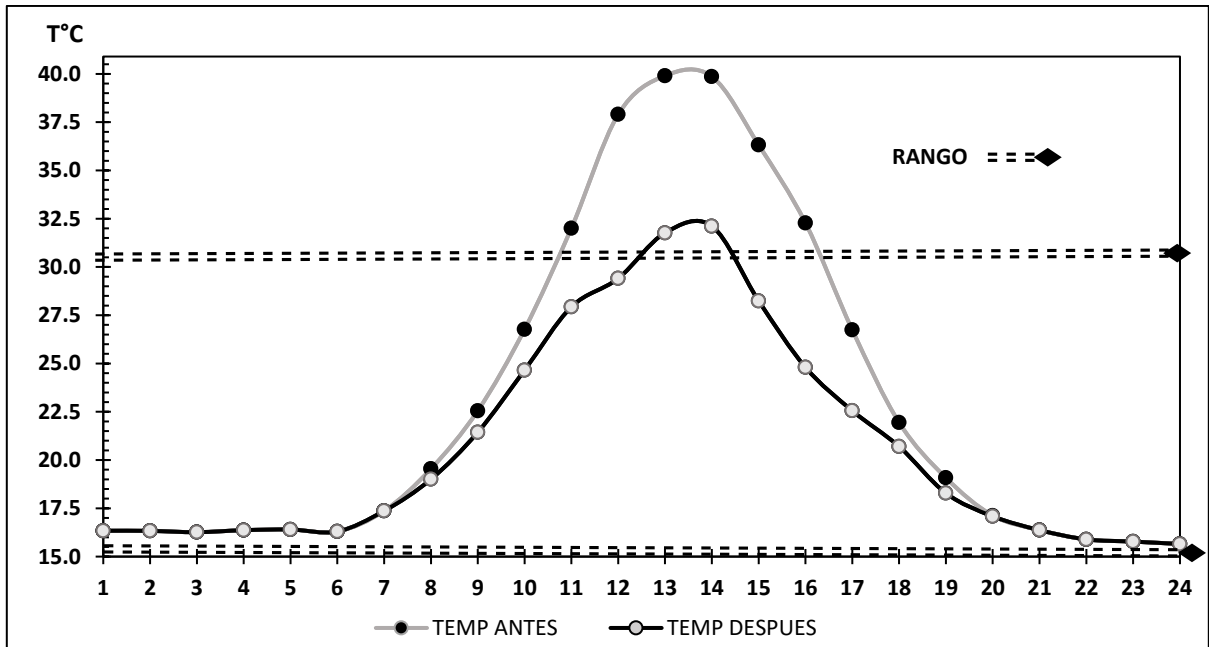


GRÁFICO 4. Curva comparativa de temperatura con datos promediados de una semana, luego de la intervención.

La humedad relativa tuvo un comportamiento favorable para el cultivo, pero los cambios significativos, al igual que la temperatura, se dieron durante las horas del día. En la tabla 6 se muestran los resultados de la medición durante una semana y su respectivo promedio horario.

HUMEDAD RELATIVA									
HORA	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM	PROM	
1	1:00 AM	93	95	94	95	90	92	93	93.14
2	2:00 AM	93	95	94	95	93	93	93	93.71
3	3:00 AM	90	95	93	93	93	93	93	92.86
4	4:00 AM	90	95	93	94	93	92	93	92.86
5	5:00 AM	89	93	93	94	92	90	94	92.14
6	6:00 AM	86	92	91	92	89	89	89	89.71
7	7:00 AM	80	90	89	90	88	87	85	87.00
8	8:00 AM	79	85	88	87	85	84	83	84.43
9	9:00 AM	79	80	84	85	83	80	80	81.57
10	10:00 AM	76	79	80	83	78	76	74	78.00
11	11:00 AM	78	74	77	80	78	70	70	75.29
12	12:00 PM	78	65	70	74	73	62	68	70.00
13	1:00 PM	74	66	64	66	63	62	59	64.86
14	2:00 PM	77	60	61	59	60	58	59	62.00
15	3:00 PM	75	62	63	66	58	59	62	63.57
16	4:00 PM	73	69	66	72	62	62	63	66.71
17	5:00 PM	75	74	69	79	69	65	65	70.86

18	6:00 PM	79	79	76	84	78	75	69	77.14
19	7:00 PM	83	82	80	89	89	83	72	82.57
20	8:00 PM	84	85	84	93	92	90	79	86.71
21	9:00 PM	83	88	89	93	95	91	83	88.86
22	10:00 PM	86	90	90	95	96	94	88	91.29
23	11:00 PM	89	93	92	97	97	94	90	93.14
24	12:00 AM	90	95	94	97	97	95	94	94.57

TABLA 6. Muestra de datos de medición de humedad relativa luego de la intervención.

En el gráfico 5 se observa la comparativa entre las curvas de humedad relativa. Aquí se notan diferencias importantes en casi todas las horas del día. Al igual que la temperatura, los resultados de HR demuestran que las modificaciones que se ejecutaron tuvieron efecto positivo en esta variable, mejorando de manera significativa los valores máximos y mínimos, sobre todo en horas del día en los que situaban por debajo de 60%. En las horas nocturnas también hubo mejoras, ya que disminuyeron un poco los valores que antes de las reformas se situaban casi en punto de saturación.

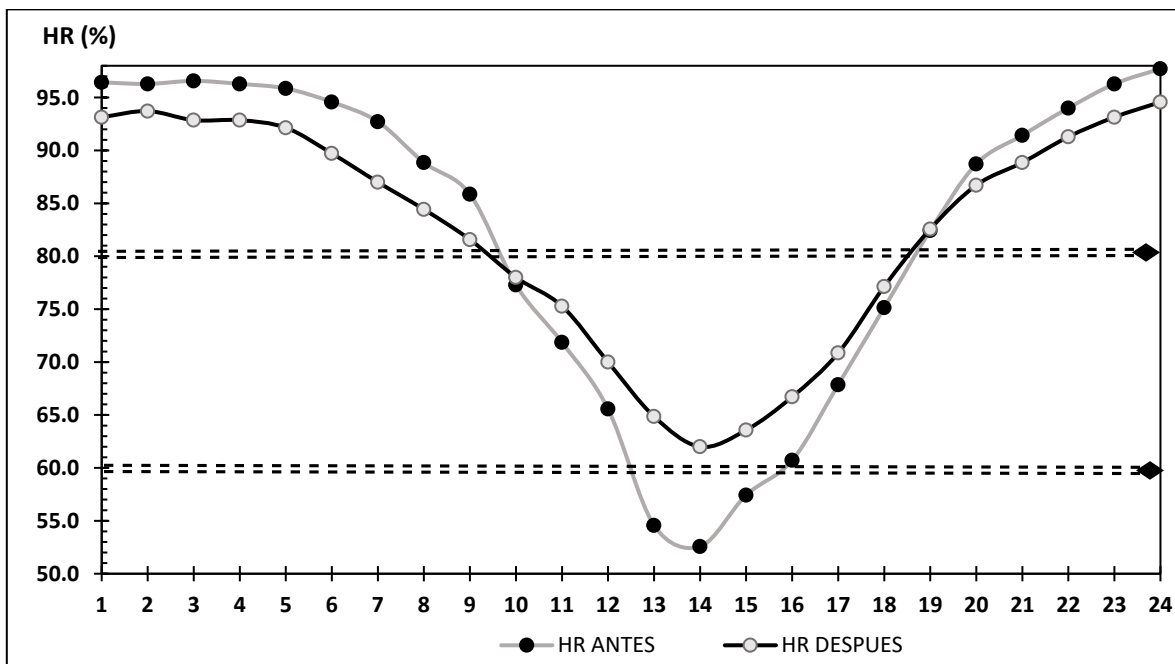


GRÁFICO 5. Curva comparativa de humedad relativa con datos promediados de una semana, luego de la intervención.

El déficit de presión de vapor tuvo cambios sustanciales ya que depende de las variables anteriormente analizadas. En la tabla 7 se evidencian los resultados del cálculo realizado con los datos de una semana.

DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR									
	HORA	LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SÁB	DOM	PROM
1	1:00 AM	0.122	0.094	0.120	0.091	0.191	0.140	0.135	0.127
2	2:00 AM	0.123	0.094	0.120	0.090	0.134	0.123	0.134	0.117
3	3:00 AM	0.175	0.094	0.136	0.127	0.134	0.122	0.134	0.132
4	4:00 AM	0.174	0.094	0.140	0.109	0.134	0.141	0.134	0.132
5	5:00 AM	0.192	0.132	0.140	0.109	0.154	0.178	0.115	0.146
6	6:00 AM	0.253	0.151	0.163	0.146	0.212	0.199	0.211	0.191
7	7:00 AM	0.384	0.197	0.227	0.191	0.232	0.239	0.339	0.259
8	8:00 AM	0.458	0.325	0.271	0.298	0.299	0.349	0.395	0.342
9	9:00 AM	0.589	0.477	0.422	0.424	0.384	0.525	0.477	0.471
10	10:00 AM	0.983	0.644	0.699	0.651	0.514	0.651	0.665	0.687
11	11:00 AM	1.142	1.118	0.994	0.821	0.594	0.894	0.989	0.936
12	12:00 PM	0.936	1.664	1.794	1.009	0.822	1.236	1.315	1.254
13	1:00 PM	1.198	1.763	2.515	1.535	1.268	1.484	1.993	1.679
14	2:00 PM	0.975	2.092	2.881	1.873	1.464	1.725	2.050	1.866
15	3:00 PM	0.970	1.633	2.642	1.319	1.357	1.377	0.881	1.454
16	4:00 PM	0.840	1.135	1.954	0.910	0.950	0.913	0.818	1.074
17	5:00 PM	0.764	0.725	1.324	0.558	0.756	0.764	0.759	0.807
18	6:00 PM	0.593	0.434	0.896	0.374	0.483	0.532	0.660	0.568
19	7:00 PM	0.339	0.347	0.543	0.213	0.230	0.353	0.574	0.371
20	8:00 PM	0.297	0.276	0.349	0.122	0.155	0.208	0.427	0.262
21	9:00 PM	0.315	0.209	0.210	0.120	0.091	0.185	0.329	0.209
22	10:00 PM	0.256	0.174	0.189	0.085	0.073	0.109	0.221	0.158
23	11:00 PM	0.200	0.121	0.147	0.051	0.054	0.109	0.183	0.124
24	12:00 AM	0.182	0.086	0.109	0.050	0.053	0.091	0.109	0.097

TABLA 7. Resultados cálculo del DPV luego de la intervención

La diferencia de comportamiento, como se muestra en el gráfico 6, se observa que entre la hora 9 y 12 se presentan valores óptimos, al igual que entre la hora 16 y 19, aunque tanto en las horas de la noche, como en la madrugada, y parte del día continua la tendencia a estar fuera del rango adecuado, se presenta mejora considerable en comparación con las mediciones preliminares, teniendo en cuenta que en estos mismos periodos de tiempo, los valores se situaba por debajo de los 0.45 KPa y por encima de 1.25 KPa respectivamente, alcanzando picos mucho mayores a los actuales.

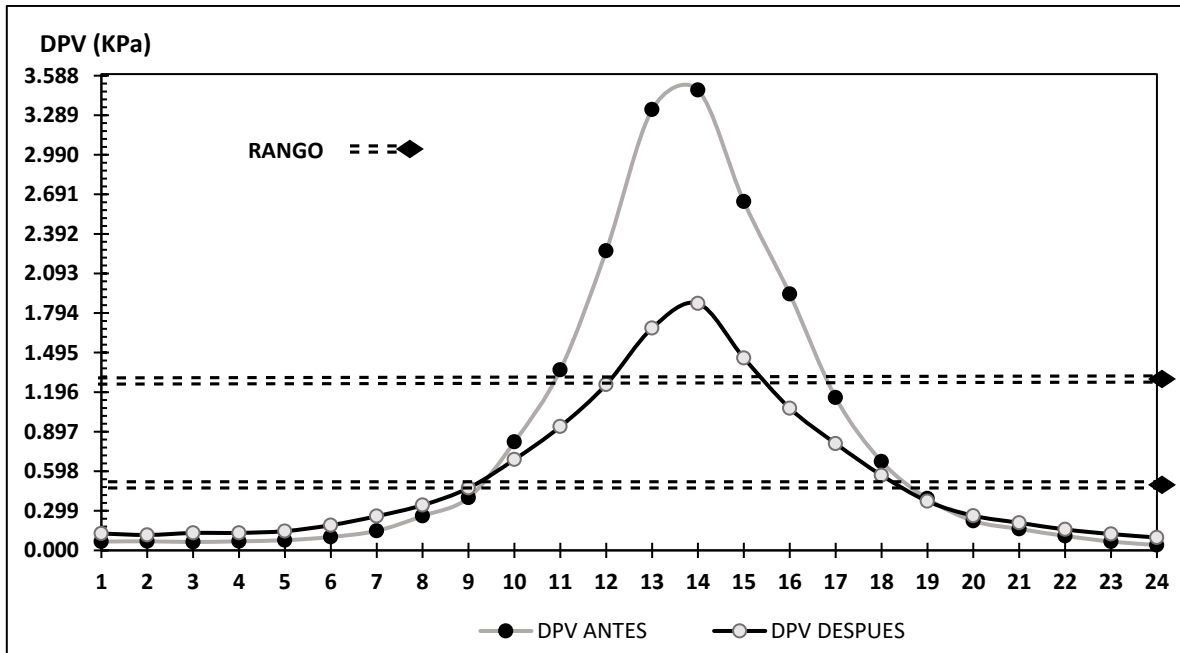


GRÁFICO 6. Curva comparativa de DPV con datos promediados de una semana, luego de la intervención.

Análisis estadístico

Luego de revisar los resultados se tomó la muestra de los promedios horarios de cada una de las variables (T, HR y DPV) antes y después de la intervención, a los cuales se les hizo un análisis de hipótesis para muestras agrupadas, como se muestra en las tablas 8, 9 y 10 respectivamente, de las que se obtuvo el siguiente resultado:

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas

	<i>T ANTES</i>	<i>T DESPUÉS</i>
Media	22.96283929	20.71127381
Varianza	75.1022728	31.00913215
Observaciones	24	24
Coefficiente de correlación de Pearson	0.991206824	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	23	
Estadístico t	3.413219687	
P(T<=t) una cola	0.001190491	
Valor crítico de t (una cola)	1.713871528	
P(T<=t) dos colas	0.002380983	
Valor crítico de t (dos colas)	2.06865761	

TABLA 8. Prueba t para variable temperatura. Fuente propia

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	<i>HR ANTES</i>	<i>HR DESPUÉS</i>
Media	82.375	82.20833333
Varianza	234.7166149	119.458703
Observaciones	24	24
Coefficiente de correlación de Pearson	0.992474654	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	23	
Estadístico t	0.174878862	
P(T<=t) una cola	0.431352581	
Valor crítico de t (una cola)	1.713871528	
P(T<=t) dos colas	0.862705162	
Valor crítico de t (dos colas)	2.06865761	

TABLA 9. Prueba t para variable humedad relativa. Fuente propia

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	<i>DPV ANTES</i>	<i>DPV DESPUÉS</i>
Media	0.829449174	0.560936312
Varianza	1.190182839	0.29303435
Observaciones	24	24
Coefficiente de correlación de Pearson	0.992028718	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	23	
Estadístico t	2.356877853	
P(T<=t) una cola	0.013658617	
Valor crítico de t (una cola)	1.713871528	
P(T<=t) dos colas	0.027317234	
Valor crítico de t (dos colas)	2.06865761	

TABLA 10. Prueba t para déficit de presión de vapor. Fuente propia

Este análisis proporcionó, desde una perspectiva estadística, la confirmación de que la intervención realizada en el invernadero tuvo un impacto positivo en el cultivo, como se evidencia en su desarrollo fisiológico. Los resultados de este análisis han demostrado que la regulación de la temperatura fue efectiva y, además, se observó una correlación con el DPV (Déficit de Presión de Vapor). Esto se respalda con un valor estadísticamente significativo de ($p < 0,002$) para la temperatura y ($p < 0,027$) para el DPV, ambos por debajo del estándar

establecido en la prueba t-Student, que es ($p \leq 0,05$). Estos hallazgos respaldan la efectividad de la intervención en la regulación de la temperatura en el invernadero y su impacto en el DPV del ambiente, Además, el modelado de datos arrojó resultados concluyentes que amparan la precisión de la intervención. En promedio, la temperatura experimentó una reducción de $22,96^{\circ}\text{C}$ a $20,71^{\circ}\text{C}$, y el DPV disminuyó de $0,829$ kPa a $0,56$ kPa. Estos resultados indican que, al realizar comparaciones en muestras más extensas, es probable que se obtenga una diferencia estadísticamente significativa entre las mediciones previas y posteriores a la intervención.

En lo que respecta a la humedad relativa, el análisis mediante la prueba t-Student arrojó un valor de ($p > 0,82$) por encima del estándar ($p > 0,05$) lo que sugiere que no existe una probabilidad significativa de diferencia en la humedad relativa (HR). No obstante, es importante destacar que este resultado no permite afirmar de manera concluyente que no se haya logrado una diferencia práctica, ya que este análisis no establece una hipótesis definitiva.

En el caso de realizar comparaciones en muestras de mayor tamaño, es probable que se obtenga una diferencia estadísticamente significativa, sobre todo si la magnitud de la diferencia (tamaño del efecto) es considerable. En relación al estado fisiológico de la planta y los resultados obtenidos, el valor de p se encuentra dentro del intervalo de significancia. En concreto, el promedio de la humedad relativa se mantuvo en un rango cercano, oscilando entre el $82,37\%$ y el $82,20\%$. Esto sugiere que, aunque esté ligeramente por encima de cierto umbral, sigue siendo coherente con lo observado en el desarrollo del cultivo.

RESULTADO FINAL DE PRODUCCIÓN

En la figura 28, se muestran las plantas en fase productiva, con un buen desarrollo fisiológico según la etapa fenológica del cultivo y presentan un excelente estado fitosanitario, que les permitió incrementar el periodo productivo pasando de 6 semanas a 15 semanas, lo que aumentó también la productividad por planta hasta $7,3$ Kg.



FIGURA 28. Cultivo en producción.

CONCLUSIONES

El diagnóstico de un invernadero debe considerar un componente cualitativo y otro cuantitativo con equipos robustos que permitan mediciones confiables para una adecuada toma de decisiones; una inspección detallada con criterios técnicos en función de los requerimientos del cultivar del establecimiento; aspectos cualitativos como el aseo, el orden locativo, la ventilación; y variables cuantitativas como la temperatura, la humedad relativa y los indicadores que se puedan cuantificar a partir de estas como DPV son fundamentales para el óptimo desarrollo de un cultivo de tomate. El diagnóstico del ambiente circundante del invernadero es indispensable para la toma de decisiones sobre modificaciones funcionales y estructurales, a fin de aprovechar las condiciones externas en los ajustes necesarios.

La intervención de un invernadero con base en valoraciones y datos obtenidos con criterios técnicos, permite la optimización de recursos económicos y de talento humano en la modificación y ajustes de las condiciones del microclima privilegiando el confort y la productividad del cultivo. Modificaciones de bajo costo y relativamente sencillas haciendo uso de la dinámica de fluidos y de la termodinámica mejoran la capacidad de respuesta del cultivo a su ambiente circundante.

La apertura de una cortina lateral permitió ajustar favorablemente la humedad relativa para el cultivo de tomate, sobre todo en las horas del día, debido a que el intercambio de aire entre el exterior y el interior favorece su equilibrio, en las horas de la noche no presentó cambios significativos, por lo que se debe continuar trabajando en su ajuste. Esta intervención también favoreció el ajuste de la temperatura porque en el medio circundante, las temperaturas máximas 33°C corresponden con las ideales para el cultivo de tomate, y en cuanto a las mínimas de este ambiente externo 13°C, se ven amortiguadas en horas de la noche por la protección que representa la cortina plástica que en estas horas está cerrada.

El uso de artefactos tecnológicos de bajo costo (sensores, actuadores, entre otros) permiten avanzar hacia una agricultura moderna y técnica y económicamente más viable, mediante una intervención desde el diagnóstico, modificación, ajuste, monitoreo y evaluación. Con este trabajo se demuestra cómo una intervención automatizada, inteligente y adaptativa, puede tener un impacto positivo en la productividad, calidad y eficacia en mano de obra en el cultivo, proporcionando una solución efectiva para enfrentar los desafíos agrícolas en la actualidad.

Un sistema de riego que cumpla con los criterios técnicos de irrigación como homogeneidad, oportunidad, eficiencia, eficacia, entre otros. mejora sustancialmente el balance hídrico tanto del cultivo, como de las condiciones del microambiente de un invernadero, y la automatización de éste disminuye el requerimiento de mano de obra, y mejora la rentabilidad del cultivo.

Con una inversión de aproximadamente \$1'000.000 en equipamiento tecnológico para un invernadero de 50 m² con 120 plantas, que pueden servir para un invernadero de 1.000 m² con 2.400 plantas; y 10 Jornales de trabajo para la intervención locativa, se logró un incremento de 3 Kg por planta. Es decir, una producción adicional de 7,2 Ton en un cultivo de 1.000 m². Esto se traduce en ingresos muy representativos en cuanto a su relación beneficio costo de la tecnología aplicada.

Una limitante que se encontró en el desarrollo del proyecto fue la falta de precisión del sensor de gases con el que se pretendía medir el dióxido de carbono. Existe en el mercado un sensor compatible con Arduino y diseñado especialmente para la medición de este parámetro, pero para este prototipo no se adquirió debido a su alto costo. Sin embargo, es probable que indirectamente haya mejorado el contenido de dicha variable debido a los buenos resultados que se obtuvieron en el cultivo.

La implementación de un proyecto de esta envergadura requirió de la integración de varios campos de la ingeniería Agrícola, como la adecuación de tierras, mecanización, programación, simulación y producción agrícola.

RECOMENDACIONES

Para construir un invernadero en clima medio con temperaturas máximas de 33 °C y mínimas de 13 °C, no se deben instalar paredes cerradas con plástico, las altas temperaturas que se generan en el día generan daños en los cultivos, como se diagnosticó en este estudio. Se recomienda utilizar mallas anti insectos, que permiten el intercambio de aire.

Para la medición exacta del contenido de dióxido de carbono, es recomendable emplear un sensor con capacidad de medir valores exactos en partes por millón, con esto se obtendrán datos precisos con los cuales se pueda hacer otro tipo de modificaciones y ajustar más las condiciones para el cultivo.

Se recomienda la implementación de mecanismos de cortina automática en todas las paredes del invernadero, con esto se garantiza una mayor circulación de aire durante el día y se evitan picos altos en la temperatura, cuando la radiación solar es alta; además, esto ayudaría a que la humedad relativa se mantenga también en equilibrio sin necesidad de la activación del sistema de nebulización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, A., Aguilar, A. 2015. *Automatización de bajo costo utilizada en la producción agrícola en invernaderos y huertos caseros*. Panamá. <https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/4886>
- Allende, M., Salinas, L., Rodríguez, F., Olivares, N., Riquelme, J., Antúnez, A. (2017). *Manual de cultivo del tomate bajo invernadero*. Boletín INIA N° 377. Chile. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6708/Bolet%C3%ADn%20INIA%20N%C2%B0%20377?sequence=1&isAllowed=y>
- Arduinove. *Módulo Lector Micro SD*. (s/f). https://www.arduinove.com/index.php?route=product/product&product_id=194
- Barraza, F. V., Fischer, G., & Cardona, C. E. (2004). *Studying the process of tomato crop (Lycopersicon esculentum Mill.) growth in the Middle Sinu Valley, Colombia*. *Agronomía Colombiana*, 22(1), 81–90. <https://www.redalyc.org/pdf/1803/180317823011.pdf>.
- Calicioglu, O., Flammini, A., Bracco, S., Bellù, L., & Sims, R. (2019). *The Future Challenges of Food and Agriculture: An Integrated Analysis of Trends and Solutions*. *Sustainability*, 11(1), 222. <https://doi.org/10.3390/su11010222>
- Castilla, N., Hernández, J., Abou-Hadid, A. (2002, August). *Strategic crop and greenhouse management in mild winter climate areas*. In XXVI International Horticultural Congress: Protected Cultivation 2002: In Search of Structures, Systems and Plant Materials for 633 (pp. 183-196). <https://doi.org/10.17660/actahortic.2004.633.22>
- Cervantes, M. (2020). *Ventilación en cultivos intensivos*. Infoagro. https://www.infoagro.com/documentos/ventilacion_cultivos_intensivos.asp
- Departamento del Huila. (2019). *Plan de ordenamiento productivo y social de la propiedad rural del departamento del Huila*. Anexo 4. <https://www.huila.gov.co/loader.php?!Servicio=Tools2&ITipo=descargas&IFuncion=descargar&idFile=36049>.
- Díaz, H., Solano, O. (2006). *Diseño y simulación del control climático para un invernadero y base de datos de registro*. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1079&context=ing_automatizacion
- Escobar, H., Lee, R. 2009. *Manual de producción de tomate bajo invernadero*. (en línea). v.2. 2 ed. Bogotá, Colombia. 180 p. Consultado 22 de jul. 2016. [manual_produccion_de_tomate_-_pag._web-11-15.pdf https://doi.org/10.2307/j.ctv2175nvj](https://doi.org/10.2307/j.ctv2175nvj)
- Fernández, S., Osorio, E., Álvarez, E., López, A., & Aldana, R. (2013). *Control de temperatura de un invernadero a escala mediante Programación en Arduino*. In el XV congreso Nacional de Control automático CNCA, México. <http://amca.mx/memorias/amca2013/papers/0056.pdf>

- García, M., Balasch, S., Alcón, F., Fernández, M. (2010). *Characterization of technological levels in Mediterranean horticultural greenhouses*. Spanish Journal of Agricultural Research, 8(3), 509-525. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010083-1247>
- Guijarro, A., Cevallos, L., Preciado, D., Zambrano, B. (2018). *Sistema de riego automatizado con Arduino*. Revista Espacios. Vol 39 (N°37). p. 27 <https://revistaespacios.com/a18v39n37/a18v39n37p27.pdf>
- Instituto de salud pública y laboral de navarra. (2021). medidores de dióxido de carbono (co2). <https://www.navarra.es/nr/rdonlyres/006b4cf9-c01d-40aa-abc4-5b8ecc91721e/469240/medidoresdeco2.pdf>
- INTA (Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria). 2014. *Manejo integrado de plagas*. Cultivo de tomate: Guía MIP (en línea). Managua, Nicaragua. 66 p.
- Intagri. (2019). Importancia de la Radiación Solar en la Producción Bajo Invernadero | Intagri S.C <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/importancia-de-la-radiacion-solar-en-la-produccion-bajo-invernadero>
- Internet de las Cosas. 2015. *Midiendo temperatura y humedad con Arduino y el sensor DHT11*. [Online]. Available: <http://www.internetdelascosas.cl/2014/07/08/midiendo-temperatura-y-humedad-con-arduino-y-el-sensordht11/>
- Jaramillo, J., Rodriguez, V., Gil, L., Garcia, M., Climaco, J., Quevedo, D., ... Guzman, M. (2013). *Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas*. <https://doi.org/10.21930/978-958-740-120-2>
- Kaloxylas, A., Eigenmann, R., Teye, F., Politopoulou, Z., Wolfert, S., Shrank, C., ... & Kormentzas, G. (2012). *Farm management systems and the Future Internet era. Computers and electronics in agriculture*, 89, 130-144. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.002>
- López, H. U., & Parrado, C. A. (2004). *Buenas prácticas agrícolas en sistemas de producción de tomate bajo invernadero* (1st ed.). Universidad Jorge Tadeo Lozano. <https://doi.org/10.2307/j.ctv23dxc51>.
- Lukianova, N. (2021). Display 16x2 I2C. Arduino.cl <https://arduino.cl/display-16x2-i2c/>
- Mahmood, D. M. F. M. B. (2014). *Data acquisition of greenhouse using Arduino*. Journal of Babylon University/Pure and Applied Sciences, 22(7), 1908-1916.
- Martínez, M., Ortíz, J., Hernández, N. (2016). *Bastón electrónico para personas invidentes con sensor de distancia y luz*. Revista de Prototipos Tecnológicos 2-3: 1- 5
- Microsoft Bing. 2023. *Biocampo Pitalito*. <https://www.bing.com/maps?osid=77339f9c-2e76-4595-a60e-348903f078b0&cp=1.920254~-76.036918&lvl=17.083727&style=a&pi=0&v=2&sV=2&form=S00027>

- Monardes, H., Escalona, V., Alvarado, P., Urbina, C., Martín, 2009. *Manual de cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum Mill): Características botánicas. Origen. Chile.* Universidad de Chile 13 p.
http://www.hortyfresco.uchile.cl/docs/manuales_innova/Manual_cultivo_tomate.pdf
- Montoya (2021). *Aportaciones al modelado y control climático de invernaderos.* [tesis doctoral, universidad de Almería España]
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=290690>
- Opirom Electronics. *Todo sobre los sensores DHT11 y DHT22 by Opirom - Opirom Electronics.*” <http://www.opirom.com/portfolio/todosobre-los-sensores-dht11-dht22-by-opirom-2>
- Paredes, A. 2009. *Cultivo de tomate en invernadero.* Cundinamarca - Colombia. Corpoica. 2009. 56 p. Recuperado el 25 de abril de 2023, de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/2196/43989_55756.pdf
- Perea, E. (2017). *Invernadero: fábrica de alimentos.* 2023, Marzo 14, de Imagen Agropecuaria.
https://imagenagropecuaria.com/2007/invernaderos_fabricas_de_alimentos/
- Perilla, A., Rodríguez, L. F., & Bermúdez, L. T. (2012). *Estudio técnico-económico del sistema de producción de tomate bajo invernadero en Guateque, Sutatenza y Tenza (Boyacá).* Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 5(2), 279–294.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2011v5i2.1269>
- Pinzón, A., Castillo, M., González, E., Araúz, J., & Villarreal, V. (2018). *Sistema de detección de sustancias y partículas contaminantes para el ambiente a través de sensores arduino.* Revista de Iniciación Científica, 4(1), 55-59. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1868>
- Prenger J.J., Ling P.P. 2000. *Greenhouse Condensation Control.* Fact Sheet (Series) EX-800. Ohio State University Extension, Columbus, OH. 1.4
- Prieto, J. P. (2017). *Prototipo de un sistema de automatización de invernadero basado en arduino y sensores con control de comando web.* Tecnología, Diseño e Innovación, 3(1)
- Rincón, P., Plazas, J., Torres, A.. (2016). *Automatización de invernadero para producción agrícola con tecnología de punta a bajo costo.* 2016. <https://revistas.sena.edu.co>.
<https://revistas.sena.edu.co/index.php/riag/article/view/1419/1523>
- Rizo, E. (2010, 01 septiembre). *Utiliza el Déficit de Presión del Vapor en invernadero.* Hortalizas.<https://www.hortalizas.com/horticultura-protégida/invernadero/utiliza-el-deficit-de-presion-del-vapor-en-invernadero/?amp>
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J., y Ramirez, A. (2015). *Modeling and control greenhouse crop growth.* Switzerland: Springer International. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11134-6>

- Rodríguez, F., García, I., Vásquez, S., Juárez, L. (2017). *Análisis, diseño e implementación de un invernadero automatizado para la producción de fresa en Tehuacán*. Revista del Desarrollo Tecnológico, 1(3), 8-17.)
- Rodríguez, M., Chagolla, H., López, M. (2014). *Diseño Conceptual de Sistema para la Automatización del Invernadero* Uno de la Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato. Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, IV, pp. 299-318.
- Ruiz, M. (2014). *Análisis de rendimiento en el proceso de producción de Plántula injertada de sandía*.
- Rumalutur, S., & Mappa, A. (2019). *Temperature and humidity moisture monitoring system with arduino r3 and dht 11*. Electro Luceat, 5(2), 40-47. <https://doi.org/10.32531/jelekn.v5i2.154>
- Semillaria. 2015. *Clasificación taxonómica de tomate*. s.p. Consultado el 10 may. 2016. <http://semillaria.es/index.php/cultivos-ok/29-cultivos/94-taxonomia>
- Shamshiri, R., & Ismail, W. I. W. (2013). *A review of greenhouse climate control and automation systems in tropical regions*. J. Agric. Sci. Appl, 2(3), 176-183 <https://doi.org/10.14511/jasa.2013.020307>
- Valerio, M. [INVERNADERO by Marino Valerio] (2021). *El co2 en el tomate*. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=scwo3cRzb7A&ab_channel=INVERNADERObyMarinoValerio
- Veikko, R. 2018. *What Is and How to Calculate Vapour Pressure Deficit (VPD)?* Better Organix. Estonia. <https://betterorganix.com/what-is-how-to-calculate-vapour-pressure-deficit/>
- Zhihao, H., Chunjie, S., Zelin, C., Zheng, W., Rui, L., Jiecheng, L., Jianqiang, H., Zhi, Z. (2022). *Multi-factorcoupling regulation of greenhouse environment based on comprehensive growth of cherry tomato seedlings*. Scientia Horticulturae. Volume 297. 110960, ISSN 0304-4238, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110960>

ANEXOS

Anexo 1. Código de programación del Data Logger

```
#include "DHT.h"
#define HT1 9
#define HT2 10
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht1 (HT1, DHTTYPE);
DHT dht2 (HT2, DHTTYPE);

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>

RTC_DS3231 rtc;

#include <SD.h>
File myFile;

int sco2;

void setup(){
  dht1.begin();
  dht2.begin();

  lcd.init();
  lcd.backlight();

  rtc.begin();
  //rtc.adjust(DateTime(2023,3,5,12,57,00));

  if (!SD.begin(4)) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.println("Error al leer SD");
    delay(2000);
    return;
  }
}

void loop(){
```

```
DateTime now = rtc.now();

lcd.clear();
float h1, h2, t1, t2 = 0;
h1 = dht1.readHumidity();
t1 = dht1.readTemperature();

h2 = dht2.readHumidity();
t2 = dht2.readTemperature();

sco2 = analogRead(A0);

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp:");
  lcd.print(t1);
  lcd.print("*C");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("HR:");
  lcd.print(h1);
  lcd.print("% ");
  delay(5000);

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp2:");
  lcd.print(t2);
  lcd.print("*C");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("HR2:");
  lcd.print(h2);
  lcd.print("% ");
  delay(5000);

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Date:");
  lcd.print(now.day());
  lcd.print('/');
  lcd.print(now.month());
  lcd.print('/');
  lcd.print(now.year());
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Time:");
  lcd.print(now.hour());
  lcd.print(":");
  lcd.print(now.minute());
```

```

lcd.print(":");
lcd.print(now.second());
delay(5000);

if (!SD.begin(4)) {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.println("Error al leer SD");
  delay(2000);
  return;
}
myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

if (myFile) {
  myFile.print("T1:");
  myFile.print(t1);
  myFile.print(",");
  myFile.print("H1:");
  myFile.print(h1);
  myFile.print(",");

  myFile.print("T2:");
  myFile.print(t2);
  myFile.print(",");
  myFile.print("H2:");
  myFile.print(h2);
  myFile.print(",");

  myFile.print("co2:");
  myFile.print(sco2);
  myFile.print(",");

  myFile.print("Date:");
  myFile.print(now.day());
  myFile.print('/');
  myFile.print(now.month());
  myFile.print('/');
  myFile.print(now.year());
  myFile.print(",");
  myFile.print("Time:");
  myFile.print(now.hour());
  myFile.print(':');
  myFile.print(now.minute());
  myFile.print(':');
  myFile.println(now.second())

  myFile.close(); //cerramos el archivo

```

```
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.println("Writing to SD...");  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.println("T1,H1,T2,H2,Time");  
    delay(60000);  
  
} else {  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.println("Error al abrir el archivo ");  
}  
delay(100);  
}
```

Anexo 2. Código de programación del Data Logger + controlador de mecanismo de cortina

```
#include "DHT.h"
#define HT1 9
#define HT2 10
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht1 (HT1, DHTTYPE);
DHT dht2 (HT2, DHTTYPE);

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
RTC_DS3231 rtc;

int motor1 = 7;
int motor2 = 6;

#include <SD.h>
File myFile;

int sco2;

int p1=2;
int p2=3;
int valor1=0;
int valor2=0;

void setup(){
  dht1.begin();
  dht2.begin();

  lcd.init();
  lcd.backlight();

  rtc.begin();
  //rtc.adjust(DateTime(2023,3,5,12,57,00));

  pinMode(motor1, OUTPUT);
  pinMode(motor2, OUTPUT);

  digitalWrite(motor1, HIGH);
```

```

digitalWrite(motor2, HIGH);

pinMode(p1, INPUT);
pinMode(p2, INPUT);

if (!SD.begin(4)) {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.println("Error al leer SD");
  delay(2000);
  return;
}
}

void loop(){

  digitalWrite(motor1, HIGH);
  digitalWrite(motor2, HIGH);

valor1=digitalRead(p1);
valor2=digitalRead(p2);

  DateTime now = rtc.now();

  lcd.clear();
float h1, h2, t1, t2 = 0;
h1 = dht1.readHumidity();
t1 = dht1.readTemperature();

h2 = dht2.readHumidity();
t2 = dht2.readTemperature();

sco2 = analogRead(A0);

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp:");
  lcd.print(t1);
  lcd.print("*C");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("HR:");
  lcd.print(h1);
  lcd.print("%");
  delay(5000);

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp2:");
  lcd.print(t2);

```

```

    lcd.print("*C");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("HR2:");
    lcd.print(h2);
    lcd.print("%");
    delay(5000);

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Date:");
    lcd.print(now.day());
    lcd.print('/');
    lcd.print(now.month());
    lcd.print('/');
    lcd.print(now.year());
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Time:");
    lcd.print(now.hour());
    lcd.print(":");
    lcd.print(now.minute());
    lcd.print(":");
    lcd.print(now.second());
    delay(5000);

    int hora =now.hour();
    int minuto =now.minute();

    while(hora == 7 && valor2 == 0)
    {
        digitalWrite(motor1, LOW);

        DateTime now = rtc.now();
        int hora =now.hour();
        int minuto =now.minute();

        valor1=digitalRead(p1);
        valor2=digitalRead(p2);

        if(hora == 7 && valor2 == 1) {
            digitalWrite(motor1, HIGH);
            delay(50);
            break;
        }
    }

    while(hora == 17 && valor1 == 0)
    {

```

```

digitalWrite(motor2, LOW);

DateTime now = rtc.now();
int hora =now.hour();
int minuto =now.minute();

valor1=digitalRead(p1);
valor2=digitalRead(p2);

if(hora == 17 && valor1 == 1) {
    digitalWrite(motor2, HIGH);
    delay(50);
    break;
}
}

if (!SD.begin(4)) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.println("Error al leer SD");
    delay(2000);
    return;
}
myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

if (myFile) {
    myFile.print("T1:");
    myFile.print(t1);
    myFile.print(",");
    myFile.print("H1:");
    myFile.print(h1);
    myFile.print(",");

    myFile.print("T2:");
    myFile.print(t2);
    myFile.print(",");
    myFile.print("H2:");
    myFile.print(h2);
    myFile.print(",");

    myFile.print("co2:");
    myFile.print(sco2);
    myFile.print(",");

    myFile.print("Date:");
    myFile.print(now.day());
    myFile.print('/');
}

```

```
myFile.print(now.month());
myFile.print('/');
myFile.print(now.year());
myFile.print(",");
myFile.print("Time:");
myFile.print(now.hour());
myFile.print(':');
myFile.print(now.minute());
myFile.print(':');
myFile.println(now.second())
```

```
myFile.close();//cerramos el archivo
```

```
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.println("Writing to SD...");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.println("T1,H1,T2,H2,Time");
delay(60000);
```

```
} else {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.println("Error al abrir el archivo ");
}
delay(100);
}
```