

# Invernadero bioclimático y modular para clima cálido

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO



Edwin Andrés Villagrán Munar | Jorge Eliécer Jaramillo Noreña | Andrea Onelia Rodríguez Roa  
Rommel Igor León Pacheco | Marlon José Yacomelo Hernández



**FONTAGRO**

**AGROSAVIA**

Corporación colombiana de investigación agropecuaria

# Invernadero bioclimático y modular para clima cálido

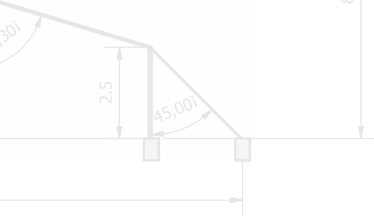
DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Edwin Andrés Villagrán Munar | Jorge Eliécer Jaramillo Noreña | Andrea Onelia Rodríguez Roa  
Rommel Igor León Pacheco | Marlon José Yacomelo Hernández



**AGROSAVIA**

Corporación colombiana de investigación agropecuaria



Códigos JEL: Q16  
ISBN: 978-958-740-489-0

**FONTAGRO** (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un programa de cooperación administrado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), pero con su propia membresía, estructura de gobernabilidad y activos. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Edwin Andrés Villagrán Munar, Jorge Eliécer Jaramillo Noreña, Andrea Onelia Rodríguez Roa, Rommel Igor León Pacheco y Marlón José Yacomelo Hernández

Copyright © 2021 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:  
FONTAGRO

Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)

[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)

**Invernadero bioclimático y modular para clima cálido: diseño, construcción, operación y mantenimiento.** /  
Edwin Andrés Villagrán Munar [y otros cuatro] – Mosquera (Colombia) : AGROSAVIA, 2021.

56 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)

Incluye ilustraciones, gráficos, tablas

ISBN E-book: 978-958-740-489-0

1. Invernaderos 2. Producción de productos agrícolas 3. Microclima 4. Modelos de simulación 5. Ventilación.  
I. Villagrán Munar, Edwin Andrés II. Jaramillo Noreña, Jorge Eliécer III. Rodríguez Roa, Andrea Onelia  
IV. León Pacheco, Rommel Igor V. Yacomelo Hernández, Marlón José.

**Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc**  
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

## Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA

Centro de Investigación Tibaitatá kilómetro 14  
vía Mosquera-Bogotá, Mosquera, Cundinamarca.  
Código postal: 250047, Colombia.

### Colección Alianzas AGROSAVIA

Esta publicación es resultado del proyecto "Innovaciones para la horticultura en ambientes protegidos en zonas tropicales: opción de intensificación sostenible de la agricultura familiar en el contexto de cambio climático en América Latina y el Caribe", financiado por Fontagro, con el código ATN/RF-16343-RG.

### Editorial AGROSAVIA

Primera edición: noviembre del 2021

editorial@agrosavia.co

Líder Editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz

Editor: Jorge Enrique Beltrán Vargas

Corrección de estilo: Alejandro Ladino

Diseño y diagramación: Mónica Cabiativa Daza

doi: <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7404890>

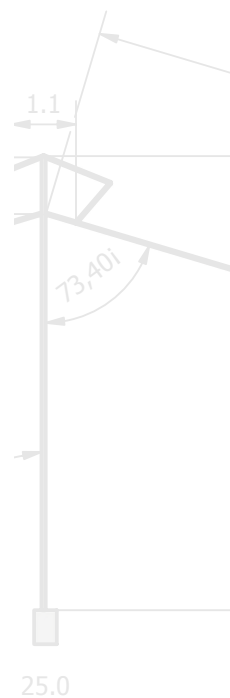
Citación sugerida: Villagrán Munar, E. A., Jaramillo Noreña, J. E., Rodríguez Roa, O. A., León Pacheco, R. I. & Yacomelo Hernández, M. J. (2021). *Invernadero bioclimático y modular para clima cálido: diseño, construcción, operación y mantenimiento*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria -AGROSAVIA; Fontagro.

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones y de la información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulneren como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515  
atencionalcliente@agrosavia.co  
[www.agrosavia.co](http://www.agrosavia.co)



[https://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](https://co.creativecommons.org/?page_id=13)

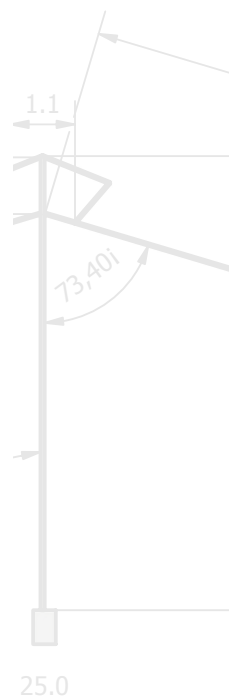


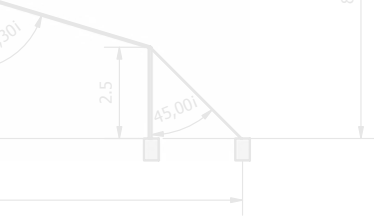




# Contenido

Resumen .....	7
Agradecimientos.....	9
Presentación .....	11
Introducción .....	12
<b>Capítulo I. Descripción del proceso de diseño .....</b>	<b>14</b>
<b>Invernadero pasivo.....</b>	<b>14</b>
<b>Diseño del invernadero .....</b>	<b>16</b>
Preproceso: área de estudio y condiciones climáticas dominantes .....	16
Proceso .....	22
Posproceso .....	23
<b>Estructura del modelo de invernadero diseñado ....</b>	<b>25</b>
<b>Construcción del prototipo real .....</b>	<b>28</b>
Cimentación .....	28
Estructura .....	28
Cubierta .....	29
Áreas de ventilación lateral y cenital .....	29
<b>Construcción en sitio .....</b>	<b>29</b>
Preparación y demarcación del terreno .....	29
Construcción de la cimentación.....	31
Instalación de los pilares.....	31





Instalación de las cerchas . . . . .	33
Instalación de amarres transversales y longitudinales . . . . .	34
Instalación de malla antinsecto en los laterales . . .	34
Instalación de pantalla térmica y polietileno . . . . .	36
Construcción del área de transfer y puertas . . . . .	37
<b>Capítulo II. Cantidades de obra . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>Capítulo III. Operación del invernadero . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>Monitoreo climático . . . . .</b>	<b>42</b>
Registro de variables externas . . . . .	42
Registro de variables internas . . . . .	43
<b>Capítulo IV. Mantenimiento del invernadero . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>Estructura del invernadero . . . . .</b>	<b>47</b>
Mantenimiento preventivo . . . . .	47
<b>Cubierta plástica, pantalla térmica . . . . .</b>	<b>47</b>
Mantenimiento preventivo . . . . .	47
Mantenimiento correctivo . . . . .	47
<b>Ventilaciones laterales y cenitales . . . . .</b>	<b>48</b>
Mantenimiento preventivo . . . . .	48
Mantenimiento correctivo . . . . .	48
<b>Área de transfer . . . . .</b>	<b>48</b>
Mantenimiento preventivo . . . . .	48
Mantenimiento correctivo . . . . .	49
<b>Equipos de monitoreo climático . . . . .</b>	<b>49</b>
Mantenimiento preventivo . . . . .	49
Mantenimiento correctivo . . . . .	49
<b>Referencias . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>Los autores . . . . .</b>	<b>54</b>

## Resumen

Esta obra tiene por objeto mostrar las características del montaje de un invernadero bioclimático ventilado, de acuerdo con un diseño desarrollado en el 2019 en el departamento de Magdalena, Colombia. Este diseño está basado en un modelo computacional de fluidos (CFD) 3-D para el desarrollo de simulaciones en estado estacionario, modelo que fue validado experimentalmente en el prototipo del invernadero real evaluado. Se destacan los siguientes contenidos de esta publicación: 1) descripción de la fase de diseño computacional apoyado en herramientas de modelado y simulación numérica, en el que se detallan preproceso, proceso y posproceso; 2) diseño arquitectónico, validación de las condiciones microclimáticas dentro de la estructura y método de medición de las variables asociadas al clima; 3) proceso de construcción; 4) cantidades de obra; y 5) criterios para el mantenimiento.

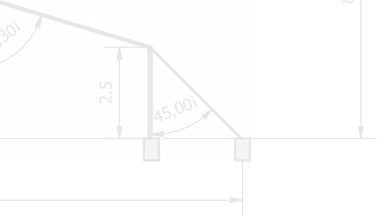
El invernadero bioclimático ventilado de forma natural es una alternativa para intensificar la agricultura y mejorar la seguridad alimentaria en estas regiones de clima cálido, ya que está orientado a superar de manera eficiente las limitaciones usualmente impuestas por factores bióticos y abióticos que afectan la producción agrícola de estas zonas.

### Palabras clave:

Invernadero, microclima, producción agrícola, simulación numérica, tasa de ventilación.

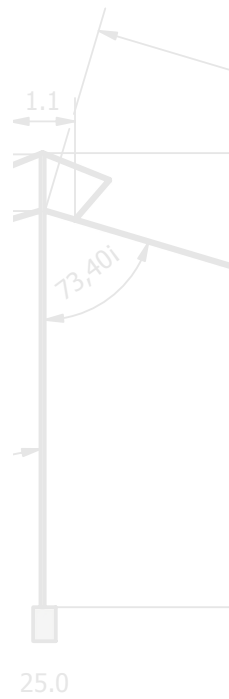


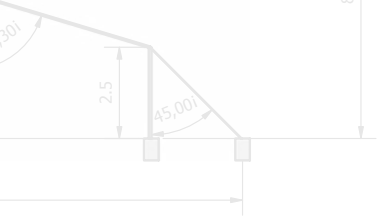




## Agradecimientos

Este trabajo formó parte del proyecto "Innovaciones para la horticultura en ambientes protegidos en zonas tropicales: opción de intensificación sostenible de la agricultura familiar en el contexto de cambio climático en ALC", financiado por el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (Fontagro).

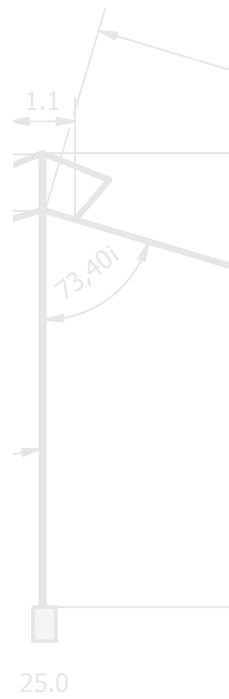


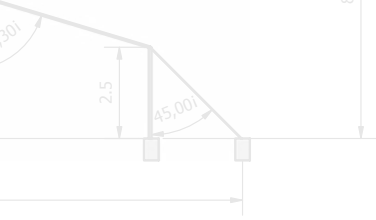


## Presentación

El presente manual de diseño, construcción, operaciones y mantenimiento contiene las características del prototipo experimental de invernadero ubicado en las instalaciones del Centro de Investigación Caribia de AGROSAVIA. A partir de la descripción general del invernadero y sus características, se muestra su forma de operación y la gestión de su clima interno, de tal forma que este sea lo más adecuado posible para los cultivos establecidos. De igual manera, se presentan una serie de recomendaciones de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, con el fin de prolongar el mayor tiempo posible la vida útil de la estructura.

Este manual está destinado a ser utilizado por el personal técnico a cargo de la supervisión, operación y mantenimiento del invernadero. A su vez, puede ser consultado por agricultores que deseen implementar este tipo de tecnología.





## Introducción

El uso de invernaderos para la producción agrícola es una técnica ampliamente desarrollada y utilizada en todo el mundo, razón por la cual existe una gran cantidad de estructuras que varían en forma, tamaño, tipo de material y nivel tecnológico (Rodríguez & Velázquez, 2019). En Colombia, así como en otros países de la región latinoamericana y el Caribe, predominan los invernaderos de tipo pasivo, los cuales limitan el control del microclima a la eficiencia de la ventilación natural (Villagrán & Bojacá, 2019). En el contexto local, uno de los grandes desafíos ha sido la búsqueda de diseños de invernadero adaptados a las condiciones climáticas locales, de modo que sean una opción alternativa al diseño del invernadero típico tradicional colombiano, cuya estructura fue desarrollada para la producción de flores de corte y cultivos ornamentales, y bajo las condiciones del trópico alto andino, en el que predominan los climas fríos y húmedos (Díaz et al., 2018).

El concepto principal de diseño de estas nuevas alternativas de invernadero o estructuras de agricultura protegida ventiladas naturalmente es optimizar los flujos de aire interno con el fin de lograr tasas de ventilación adecuadas, que permitan garantizar la generación de un microclima adecuado para la producción agrícola. Una de las herramientas de modelado y simulación más aplicadas en los últimos años para el desarrollo de nuevos diseños de invernadero es la dinámica de fluidos computacional (CFD) (Bournet, 2014; Senhaji et al., 2019; Villagrán et al., 2019). Esta herramienta permite observar gráficamente el movimiento del aire generado por ventilación natural dentro del volumen de un invernadero (Rojano et al., 2014). En el desarrollo del diseño de invernadero contemplado para la región Caribe colombiana se usó esta técnica de simulaciones bajo un enfoque de modelado CFD-3D. Esta metodología permitió



evaluar el comportamiento termo-higrométrico y los patrones de flujo de aire en el interior del invernadero en un escenario virtual y bajo las condiciones climáticas cálidas dominantes del trópico bajo colombiano.

Es importante recordar que en esta región la producción hortícola es limitada, principalmente debido a factores climáticos. Por ello, el diseño de estructuras adaptadas a las condiciones climáticas locales es un insumo técnico esencial para impulsar la producción de hortalizas bajo cubierta con un enfoque de agricultura familiar. En el caso particular de este tipo de invernaderos ventilados naturalmente, se busca proteger los cultivos de valores extremos de temperatura, radiación, velocidad de viento y precipitaciones. Además, el uso de este tipo de invernaderos permite limitar el ataque de plagas y enfermedades, mejorar la inocuidad de los productos cosechados, realizar un mejor uso del recurso hídrico y lograr una mayor eficiencia en la fertilización de los cultivos. Todas estas son las ventajas comparativas respecto a la producción a campo abierto, relacionadas con el mejoramiento de la sostenibilidad en los sistemas de producción hortícola en regiones de clima cálido (Villagrán et al., 2020).





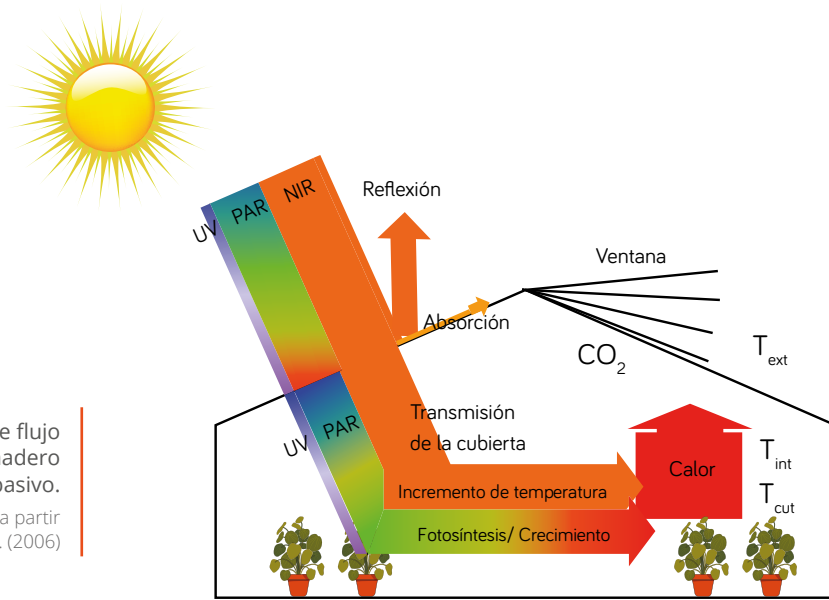
# Capítulo I

## Descripción del proceso de diseño

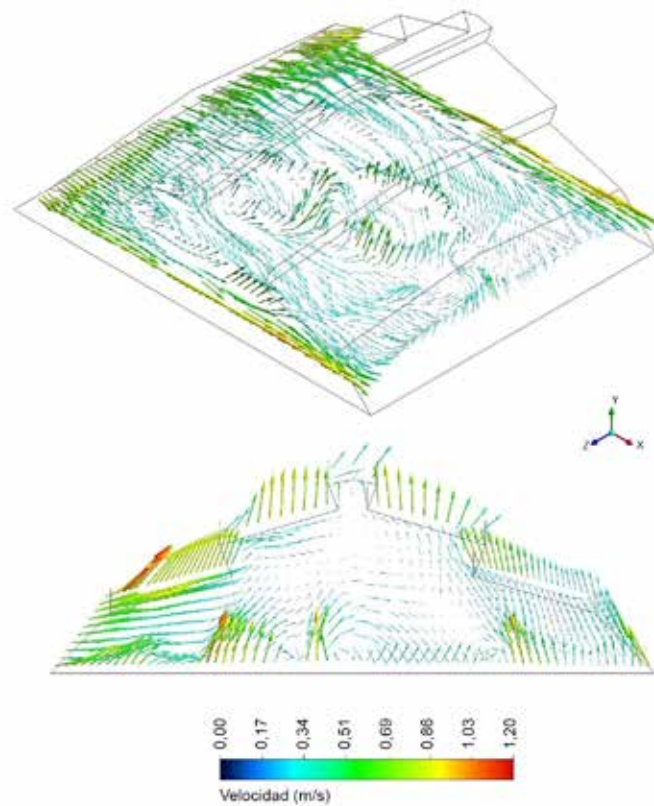
### Invernadero pasivo

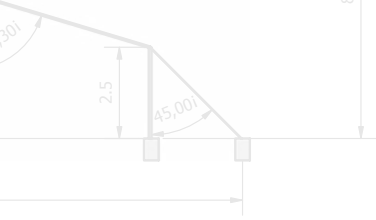
Un invernadero pasivo es un tipo de estructura que se concibe bajo un concepto de eficiencia y ahorro energético, en comparación con los invernaderos tradicionales (Villagrán, 2021). Este tipo de estructuras gestionan las condiciones microclimáticas mediante el uso de la energía de la radiación solar, la cual es utilizada para generar calentamiento y procesos fisiológicos en los cultivos, tales como fotosíntesis y transpiración (figura 1). Así mismo, en el interior del invernadero se genera un microclima con unas condiciones específicas de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), HR (%), radiación ( $\text{wm}^{-2}$ ) y  $\text{CO}_2$  (ppm). Para las condiciones climáticas dominantes en el trópico bajo, donde son características las condiciones de alta radiación y temperatura, es relevante también buscar estrategias que permitan obtener la mayor eficiencia del fenómeno de ventilación natural. Este fenómeno es el responsable de generar los movimientos de flujo de aire en el interior de este tipo de invernaderos, con lo cual se logra regular las condiciones térmicas y de humedad en el interior del invernadero y mantenerlas en límites apropiados para la producción agrícola (figura 2).

**Figura 1.** Esquema de flujo energético en un invernadero de tipo pasivo.  
 Fuente: Elaboración propia a partir de Hemming et al. (2006)



**Figura 2.** Flujos de aire en el interior de un invernadero pasivo.  
 Fuente: Elaboración propia





## Diseño del invernadero

La optimización climática de estructuras para la producción agrícola en Colombia, incluso en sus fases de diseño, es inexistente (Villagrán et al., 2021). Por tal razón, se ha propuesto una metodología compuesta que involucra una fase de diseño computacional, con base en herramientas de modelado y simulación numérica (figura 3). Esta metodología se divide en las siguientes fases:

- Preproceso
- Proceso
- Postproceso

Esta metodología permite evaluar un número indeterminado de estructuras de invernadero y materiales de cubierta, con el fin de obtener el diseño más adecuado en función de las condiciones climáticas locales.

Una vez se cumple con esta fase de diseño, se procede a la construcción real del invernadero en la zona de estudio.

### Preproceso: área de estudio y condiciones climáticas dominantes

#### Selección de las estaciones climáticas en la zona de influencia

Para obtener la información climática se deben identificar y seleccionar estaciones climáticas en tres bases de datos o fuentes de información:

1. Base de datos nacional AGROSAVIA: Series históricas diarias de 30 años (1981 a 2010), de las variables precipitación, humedad relativa y temperaturas máximas, mínimas y medias. Esta base tuvo un proceso de calidad, homogenización y complementación

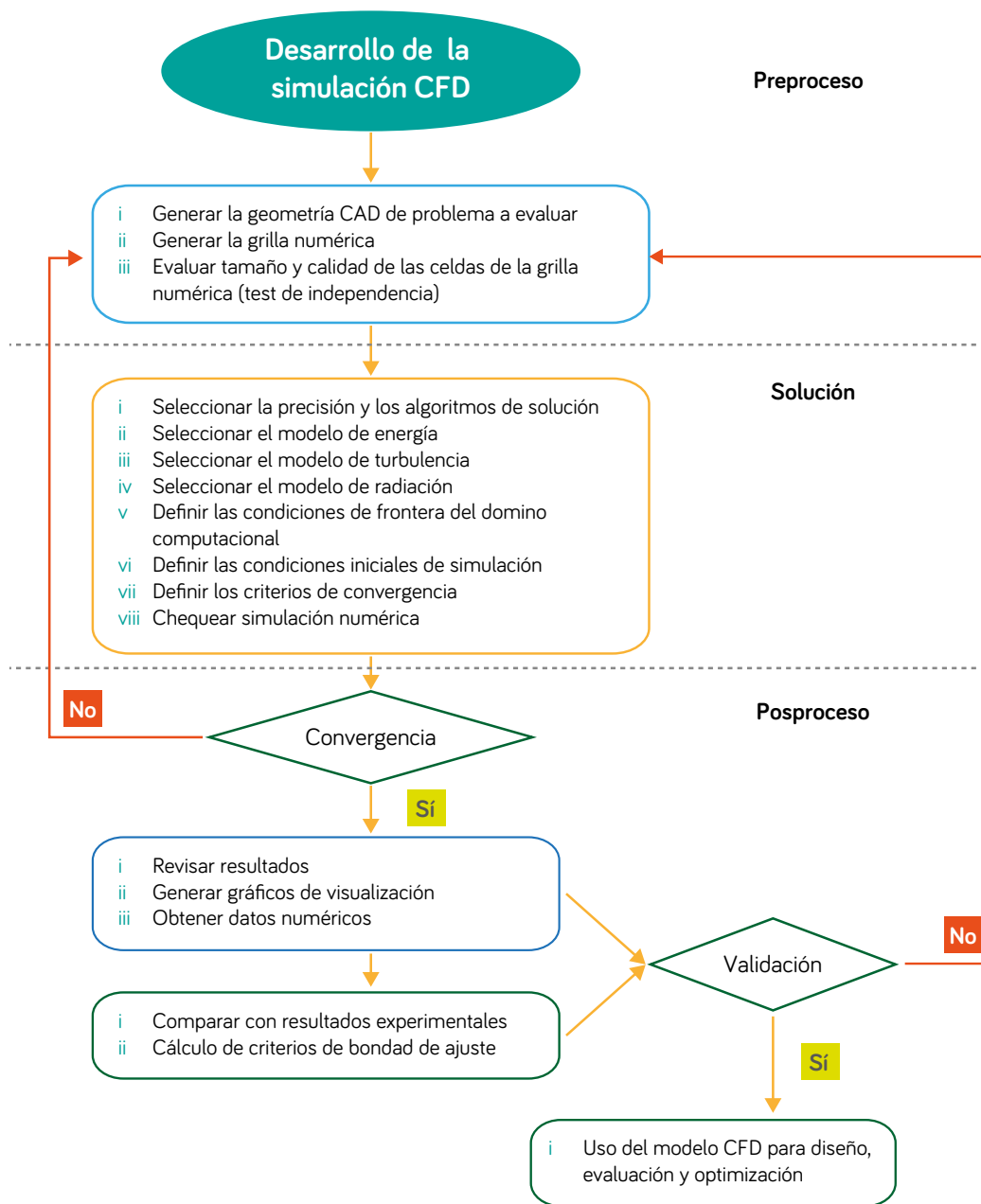
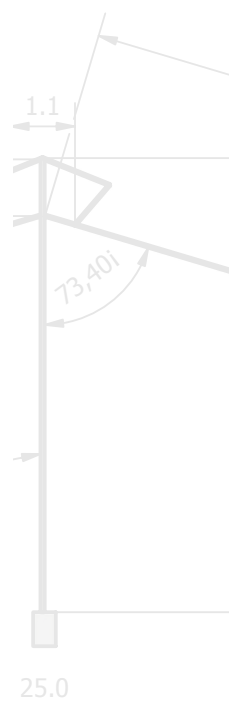
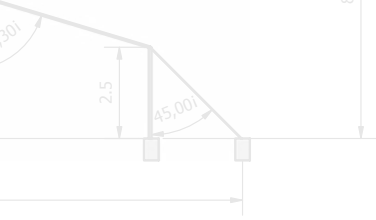


Figura 3. Metodología de simulación numérica.  
Fuente: Elaboración propia





de datos a través de un convenio entre AGROSAVIA y el Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM).

2. Catálogo IDEAM: Con el fin de identificar estaciones con mayor número de variables e información más actualizada se consultó el Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM.
3. Información de los centros de investigación o fincas aledañas: Estación agroclimática con series horarias de los últimos cinco años de las variables de precipitación, temperaturas máximas, mínimas y medias, humedad relativa, brillo solar, radiación solar, viento, dirección del viento, entre otras.

De las tres fuentes de información se deben seleccionar estaciones ubicadas dentro de un radio de influencia de 6 km alrededor de la región donde se construirá el invernadero. A esta información se le debe realizar el control de calidad para las variables de precipitación, temperaturas (máximas, mínimas y media), viento, radiación solar y humedad relativa.

## Criterios de diseño

Un invernadero de tipo pasivo para condiciones de clima cálido debe cumplir con las siguientes características:

- Índice de renovación > 60 renovaciones por hora.
- La tasa mínima de ventilación deber ser de  $0,04 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ , que es un valor recomendado para invernaderos pasivos (ASAE, 2003; Villagrán & Bojacá, 2019a, 2019b).
- Su eje transversal debe tener unas dimensiones de entre 30 y 50 metros.
- El eje transversal debe quedar orientado en sentido paralelo a la velocidad dominante del viento.
- El invernadero debe disponer de áreas de ventilación en sus 4 costados y en las zonas de cubierta.
- El invernadero debe tener una pendiente longitudinal entre el centro del invernadero y las fachadas de mínimo un 5 %.

- Las superficies de ventilación (sv) en relación con la superficie de suelo cubierto (ssc) deben ser de mínimo un 40 %.
- El salto térmico diferencial entre el ambiente interior y exterior del invernadero debe ser inferior a 2 °C.
- Debe existir uniformidad del comportamiento bioclimático en el interior del invernadero.

## Diseño mediante herramientas computacionales

El diseño asistido por computador y en especial mediante CFD es una práctica que se ha venido realizando en las dos últimas décadas en todo tipo de estructuras para el sector agropecuario (Vivekanandan et al., 2020). Este hecho se debe, en buena parte, a la evolución computacional durante los últimos 15 años, la cual permite evaluar escenarios no construidos, así como identificar errores de diseño y corregirlos antes de su construcción a escala real (Villagrán et al., 2020). Mediante el uso de CFD, se genera una solución numérica a problemas de ingeniería que involucran el movimiento de fluidos y su interacción con las fuentes de calor y de masa. Por lo tanto, la simulación CFD es muy práctica para el estudio del microclima en invernaderos y hasta para la interacción con las plantas de diferentes tipos de cultivo (Akrami et al., 2020).

## Modelado físico

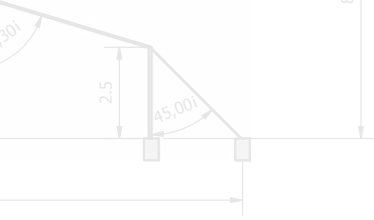
El cálculo de los flujos de aire y la distribución de la temperatura en el interior de la estructura se realizó con el programa comercial Ansys-Fluent. El movimiento y la transferencia de calor de un fluido puede ser descrito matemáticamente mediante las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla(\rho \phi \vec{v}) = \nabla(\Gamma \nabla \phi) + S \phi$$

Donde  $\vec{v}$  es el vector de velocidad ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\Gamma$  es el coeficiente de difusión ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $\rho$  es la densidad del fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $\nabla$  es el operador







nabla,  $\phi$  representa la variable de concentración y  $S$  representa el término fuente (Piscia et al., 2015; Villagrán & Bojacá, 2019).

La ecuación anterior se resuelve mediante el método de volúmenes finitos para la condición de estado estable y en cada volumen de control ( $V$ ) su forma integral se representa así:

$$\int_V \nabla \cdot (\rho \phi \vec{v}) dV = \int_V \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_V S \phi dV$$

La naturaleza turbulenta del flujo de aire se simuló utilizando el modelo de turbulencia estándar  $k-\epsilon$  con funciones de pared estándar. Este modelo ha sido ampliamente usado y validado en estudios de ventilación natural de invernaderos (Bournet et al., 2017; Teitel & Wenger, 2014; Villagrán et al., 2018). Los efectos de flotabilidad influenciados por el cambio de densidad del aire estarán presentes (Espinal-Montes et al., 2015) y pueden ser modelados a través del modelo de Boussinesq, que relaciona los cambios de densidad del aire a diferentes temperaturas, y que se describe mediante la siguiente expresión:

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0\beta(T-T_0)g$$

Donde  $\rho$  y  $\rho_0$  son la densidad del aire a temperatura de 20 °C ( $T$ ) y la densidad a una temperatura mayor ( $T_0$ ) respectivamente,  $g$  es la fuerza de la gravedad y  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica del aire.

## Generación de los modelos CAD y proceso de mallado

El programa Ansys-Icem se utilizó para construir un dominio computacional con un tamaño que permita el desarrollo del flujo de aire y una definición adecuada de la capa límite atmosférica. Este dominio computacional, que incluía el invernadero y su ambiente exterior próximo, tenía unas dimensiones de 225 m de ancho (eje x) y

70 m de altura (eje y), y se construyó siguiendo las recomendaciones dadas por Kim et al. (2017). En el proceso de generación de malla se seleccionó una grilla no estructurada de elementos cuadrados con un total de 10.021.713 de elementos (figura 4).

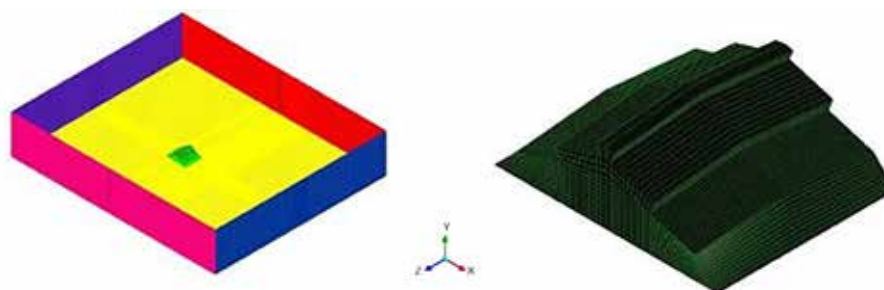


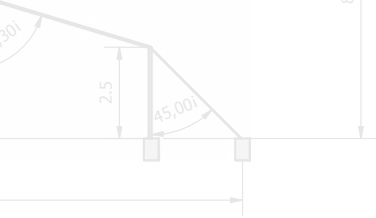
Figura 4. Proceso CAD y de mallado.

Fuente: Elaboración propia

Esta grilla numérica fue seleccionada previa verificación de independencia de la solución numérica del tamaño de cuadrícula. Así mismo, la calidad de la malla fue evaluada y se identificó que un 95,2 % de los elementos presentan alta calidad en relación con el parámetro de tamaño de las celdas y su variación entre celdas vecinas (Ansys). Se adoptó un método semi-implícito para las ecuaciones vinculadas a la presión para resolver las ecuaciones acopladas presión-momento mediante el algoritmo SIMPLE. El criterio de convergencia fue de  $10^{-6}$  para las ecuaciones de energía, continuidad, momento y turbulencia (Baxevanou et al., 2017)

El límite superior del dominio fue fijado con condiciones de frontera de propiedades simétricas, con el fin de no generar pérdidas de fricción del flujo de aire en contacto con esta superficie. El límite de salida en el lado del sotavento fue fijado con condición de salida de presión. Estas simulaciones numéricas deben contemplar propiedades físicas, ópticas y térmicas de los materiales considerados en el invernadero y así mismo las condiciones climáticas de la región de estudio, incluidos parámetros físicos del aire como la presión atmosférica, la viscosidad, la densidad y la fuerza de la gravedad (Villagrán et al., 2012). También es recomendable que en el costado





por donde ingresa el viento se establezcan las condiciones reales del perfil logarítmico de distribución de velocidad, tal como se recomienda en el estudio de He et al. (2017).

En este proceso se generan prototipos CAD de los modelos de invernadero a evaluar, los cuales se crean en 2D y 3D; posteriormente, son incluidos en túnel de viento virtual, el cual ha sido mallado en un número finito de elementos cuadrados o cúbicos. En este túnel virtual se evaluará el comportamiento aerodinámico y microclimático de cada uno de los diseños evaluados. Para cada una de las simulaciones se establecen las condiciones generales del modelo de simulación. El resumen de los principales parámetros se presenta en la tabla 1.

**Tabla 1. Condiciones generales de la simulación CFD**

Propiedades físicas y ópticas de los materiales	Aire	Suelo	Polietileno	Malla antinsecto
Densidad ( $\rho$ , kg m <sup>-3</sup> )	1.225	1.400	920	990
Conductividad térmica (k, W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0,0242	1,5	0,3	0,33
Calor específico (Cp, J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	1.006,43	1.738	1.900	1.900
Coefficiente de expansión térmica (K <sup>-1</sup> )	0,0033			
Absorción	0,19	0,9	0,69	0,2
Coefficiente de dispersión	0	-10	0	0
Índice de refracción	1	1,92	0,11	0,05
Emisividad	0,9	0,95	0,7	0,45

Fuente: Villagrán et al. (2020)

## Proceso

En esta fase se seleccionan los modelos numéricos y las condiciones de discretización de las ecuaciones parciales no lineales; además, se buscan los criterios de convergencia para la solución numérica y se realizan una serie de simulaciones para identificar el diseño de invernadero más adecuado a las condiciones climáticas locales.

## Posproceso

En esta etapa se realizan gráficos de velocidad de los campos de flujo y del comportamiento de la temperatura al interior de cada estructura, con el fin de determinar su comportamiento cualitativo (figura 5).

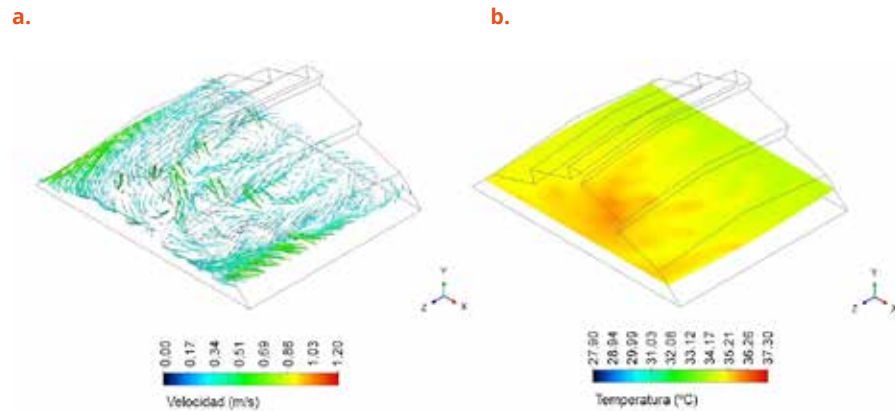
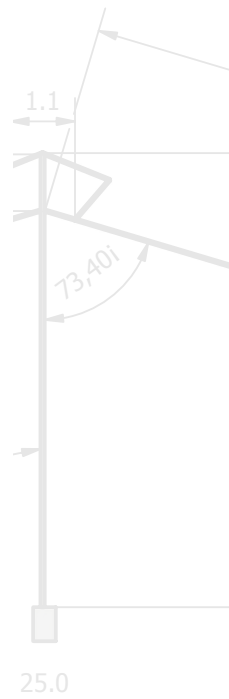


Figura 5. Gráficos de distribución. a. Distribución de velocidad; b. Distribución de temperatura en el interior de un invernadero.

Fuente: Elaboración propia

A su vez, se realiza la extracción de la totalidad de datos de todas las celdas de la malla del túnel virtual y se realizan análisis de sensibilidad de los datos de velocidad y las demás variables de estudio. En términos generales, siempre se selecciona el diseño de invernadero que mejor comportamiento térmico y aerodinámico ofrezca en las condiciones climáticas predominantes (figura 6).



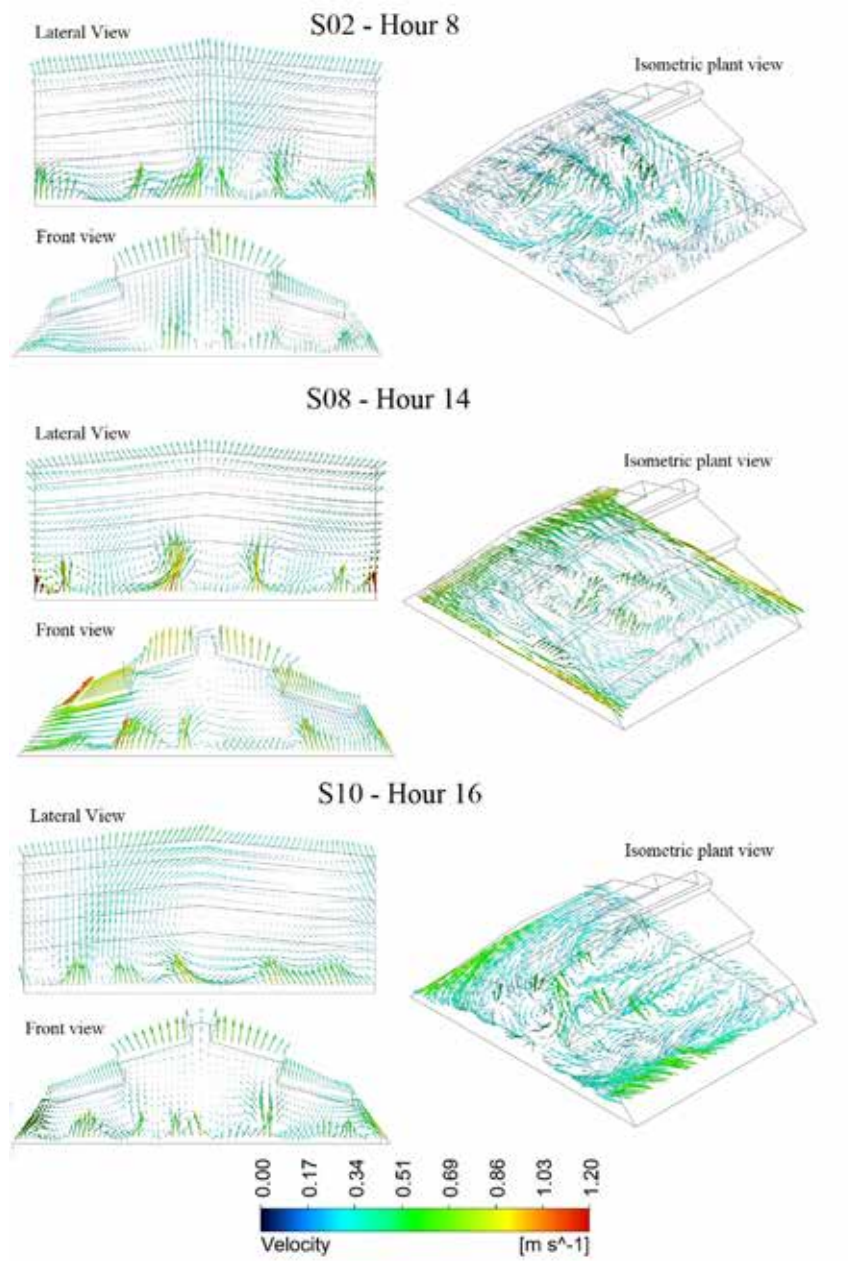
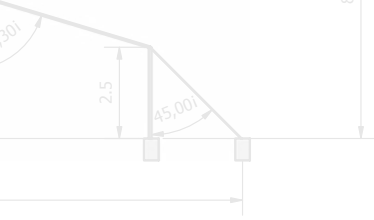


Figura 6. Patrones de distribución de velocidad dentro de los invernaderos.  
Fuente: Elaboración propia

## Estructura del modelo de invernadero diseñado

Se diseñó un invernadero de tipo capilla, con ventilaciones laterales y cenitales fijas en las zonas de cumbrera (figura 7). El área total de suelo cubierta es de 500 m<sup>2</sup> y los índices de superficie de ventilación natural del prototipo construido fueron del 83 %, superiores al valor mínimo recomendado de 30 % para invernaderos pasivos.

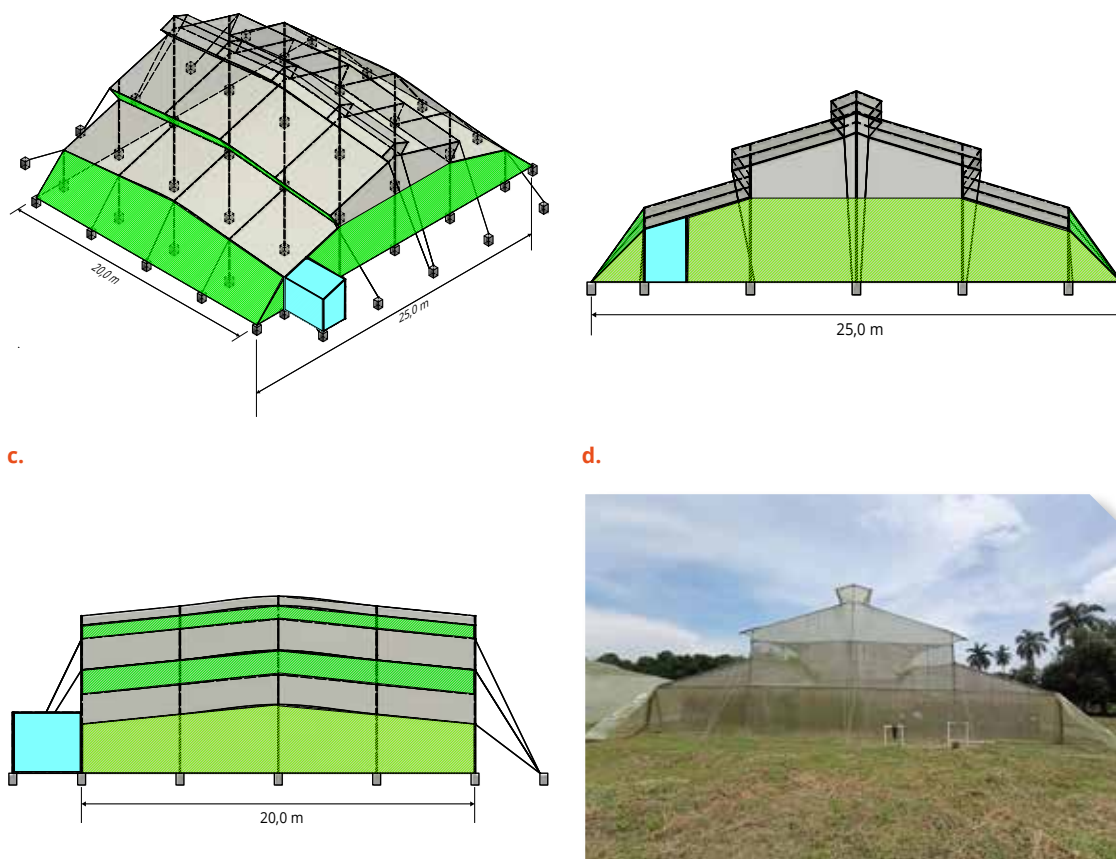
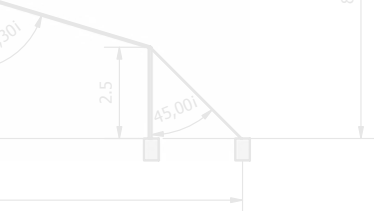


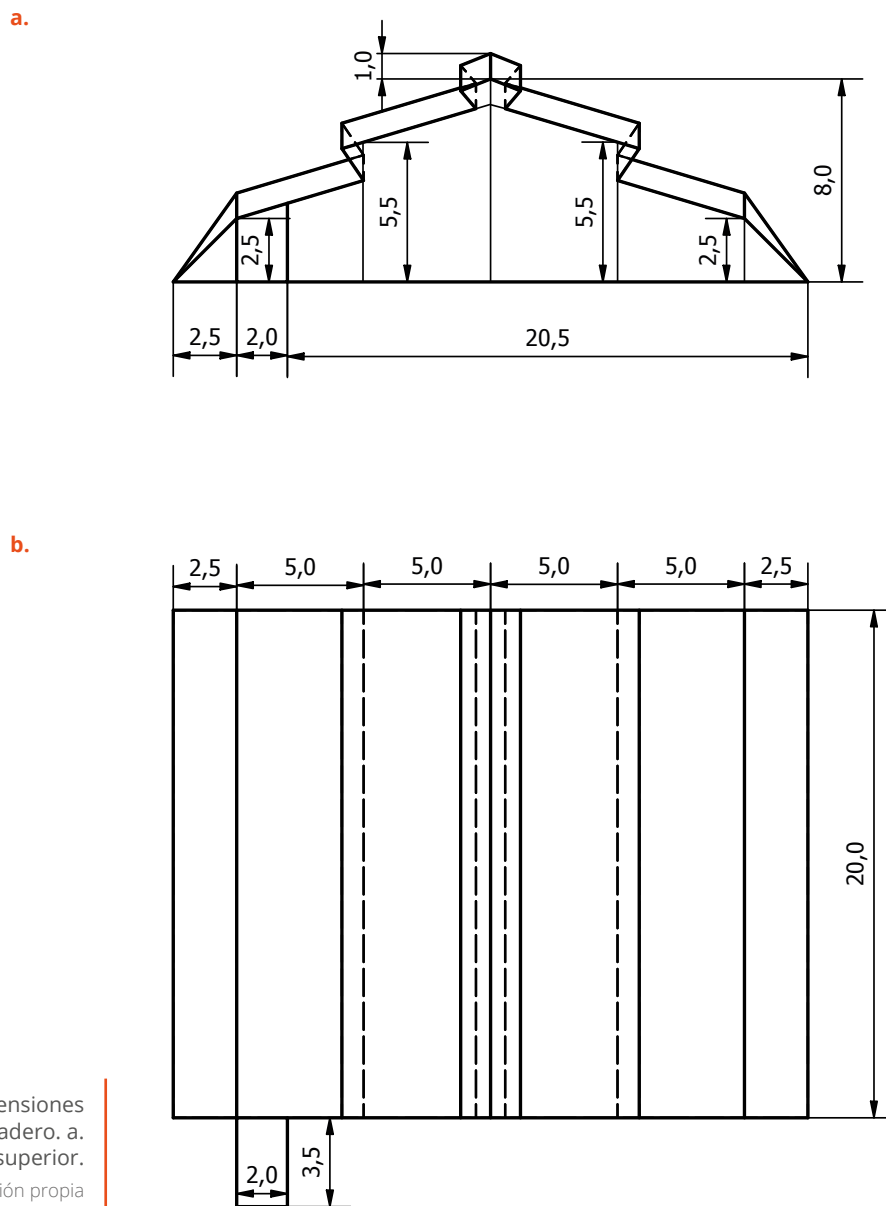
Figura 7. Vista y dimensiones generales del invernadero propuesto. a. Vista isométrica CAD; b. Vista frontal; c. Vista lateral; d. Vista real.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León





Las dimensiones generales de la estructura son 25 m de frente y 20 m de fondo. La altura más baja sobre canal es de 2,5 m y la altura más alta sobre cumbrera de 9,0 m (figuras 8 y 9).



**Figura 8.** Dimensiones generales del invernadero. a. Vista frontal; b. Vista superior.  
Fuente: Elaboración propia

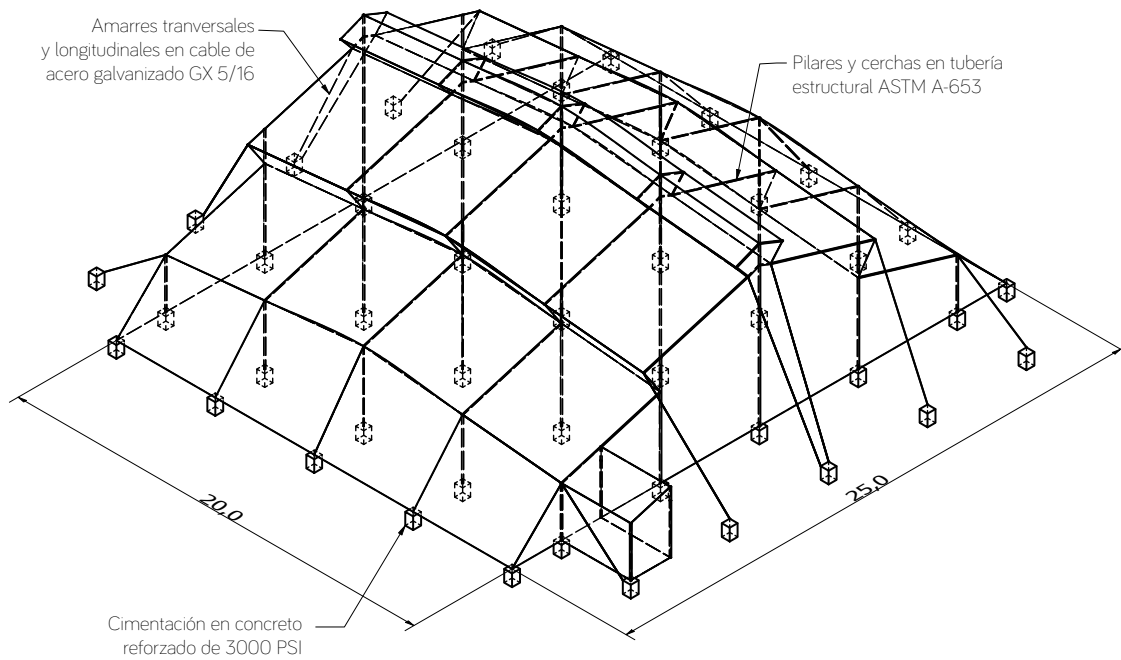
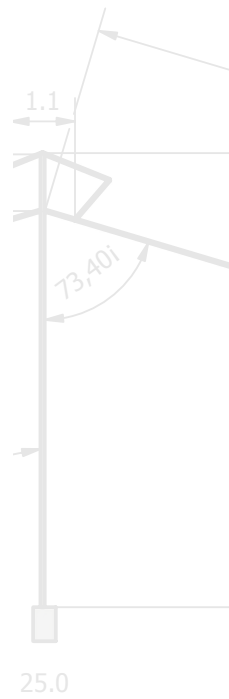
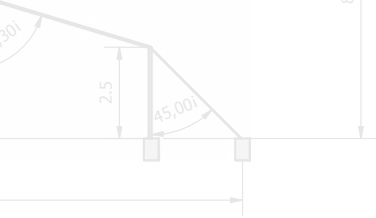


Figura 9. Vista isométrica de la estructura.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, para tener un control de ingreso de personal al área de cultivo, se construyó una zona de transfer con placa en concreto reforzado, doble puerta y pediluvio (figura 10). Esta zona es un espacio que debe manejarse con un riguroso control para prevenir el ingreso de insectos plaga y patógenos que puedan causar algún tipo de enfermedad; a su vez, es una zona donde se pueden llevar a cabo actividades de desinfección de herramientas, vestuario de trabajo y calzado.





a.



b.



Figura 10. Detalle del prototipo real. a. Vista exterior; b. Vista interior.

Fotos: Rommel León

## Construcción del prototipo real

Los materiales a utilizar en estructuras de condiciones protegidas dependerán del tipo de suelo, velocidad del viento, presupuesto, entre otros.

### Cimentación

La cimentación se debe construir en concreto reforzado, estructurada con varilla normalizada y con una resistencia de 3000 PSI. Es recomendable verificar la capacidad portante del suelo y establecer un lugar plano, libre de inundaciones o fallas geológicas que a futuro puedan afectar la estabilidad estructural del invernadero.

### Estructura

La estructura del invernadero debe construirse en perfiles de acero certificado ASTM A 653. Este material es laminado en caliente y cubierto con zinc. Los amarres transversales y longitudinales deben ser construidos en cable de acero galvanizado. Estos materiales estructurales garantizan una alta durabilidad de la estructura en el tiempo y le dan mayor resistencia contra afectaciones que puedan ocasionar las fuertes corrientes de viento.

## Cubierta

La cubierta del invernadero debe llevar un plástico multicapa de alta resistencia y contar con adecuadas propiedades térmicas y ópticas. Así mismo, para gestionar el microclima y limitar la incidencia de la alta radiación en el interior del invernadero, la lámina de polietileno debe ser complementada con una pantalla térmica de ahorro energético de como mínimo un 30 % de sombreamiento y, en lo posible, fabricada en materiales con alta capacidad de difusión de radiación solar.

## Áreas de ventilación lateral y cenital

Las áreas de ventilación deben ser cubiertas con una malla de protección antinsecto de 40 MESH (16,1 \* 10,1 huecos cm<sup>2</sup>), de color blanco o perla, y con un porcentaje de sombra de 30 %. Esta malla debe limitar el ingreso de insectos al área de cultivo del invernadero. Es recomendable que para regiones de baja velocidad de viento (< 1m/s) las partes de ventilación del techo sean cubiertas con una malla antipájaro, con tamaños de hueco de 2 cm \* 2 cm.

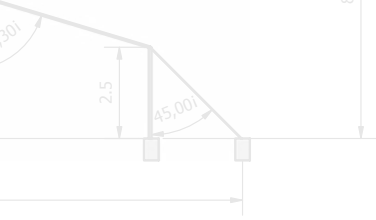
## Construcción en sitio

### Preparación y demarcación del terreno

La selección del terreno debe realizarse bajo los siguientes criterios:

- Contar con un área disponible para construir la cimentación.
- Ser un área plana y descapotada. En su defecto, se deben realizar labores de nivelación y retiro del material vegetal presente.
- Ser un área libre de inundaciones o problemas geológicos.
- Tener un acceso fácil al terreno y a las vías de comunicación para el ingreso de insumos, materiales y salida de los productos cosechados.

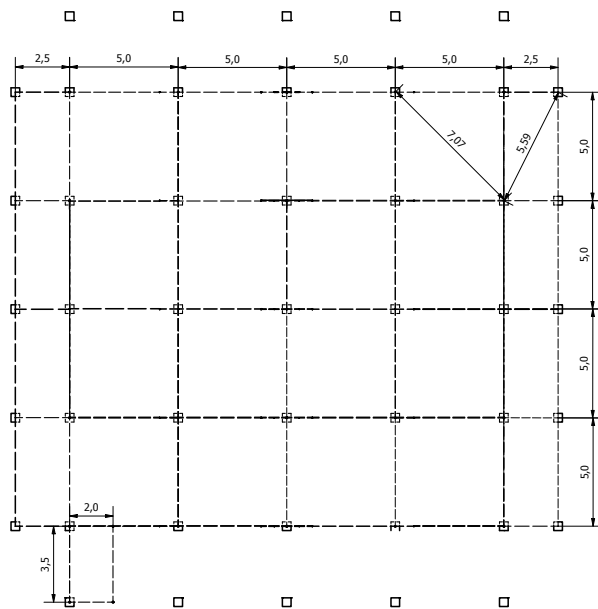




- Disponibilidad de agua para riego.
- Fuente de energía eléctrica.
- La orientación del invernadero depende del sentido predominante de los vientos. En este caso, es ideal que las áreas de ventilación se ubiquen en dirección perpendicular a dicha corriente de viento dominante, este va a ser un factor característico y diferencial de cada región de estudio.

En este caso, es necesario contar con un terreno que tenga un área mínima de 675 m<sup>2</sup>, correspondientes a un área transversal de 25 metros y un área longitudinal de 27 m. En esta área se construirá la cimentación necesaria para el ensamble de la estructura del invernadero.

a.



b.



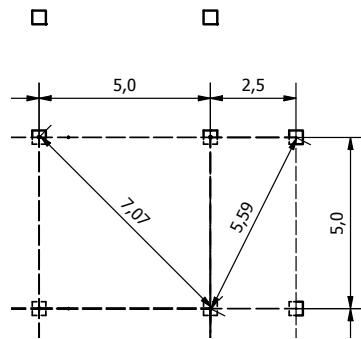
Figura 11. Selección y delimitación del terreno. a. Vista planta; b. Vista real.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León

## Construcción de la cimentación

La cimentación para este modelo de invernadero consta de 45 pilotes construidos sobre el terreno. Cada pilar tiene una dimensión que corresponde a un cuadrado de lado de 0,6 m, con una profundidad de 1,0 m. Cada pilote se debe separar, en el sentido transversal, 5,0 m entre pilares, y 2,5 m entre pilar y anclajes laterales; así mismo, en el eje longitudinal esta separación es de 5,0 m entre pilares y 3,5 m entre el pilar y los anclajes frontales. Cada pilote debe ser construido en concreto reforzado de 3.000 PSI de resistencia (figura 12).

Figura 12. Construcción de la cimentación.  
Fuente: Elaboración propia  
Foto: Iliana Arango



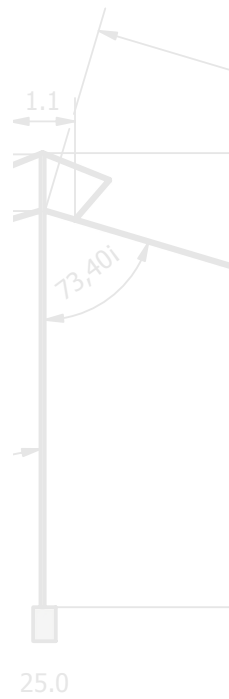
## Instalación de los pilares

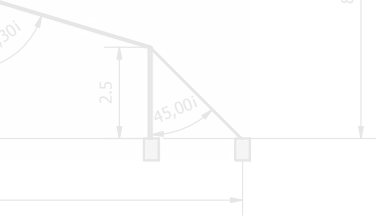
La instalación de los pilares es una actividad que se realiza de manera simultánea con la fabricación de la cimentación. Por lo tanto:

Se debe tener a disposición el acero estructural ASTM A 653 con las dimensiones necesarias para la construcción del invernadero, según los planos y el listado de materiales necesarios (figura 13).

Los pilares deben ser empotrados a una profundidad similar a la de la cimentación.

Cada pilar debe ser alineado con plomada y nivelado a la topografía del terreno (figura 13).





Los pilares perimetrales fueron perfiles en tubo rectangular de 120 mm \* 60 mm calibre 14, mientras que los pilares internos fueron tubos circulares de 60 mm calibre 14. Este material de acero debe cumplir con la norma ASTM A-653.



Figura 13. Empotramiento de los pilares.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Iliana Arango

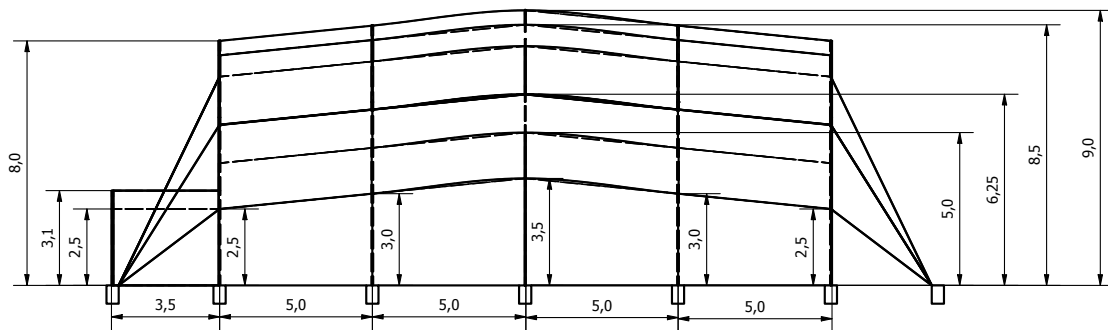


Figura 14. Dimensiones de los pilares.

Fuente: Elaboración propia



## Instalación de las cerchas

La instalación de las cerchas del invernadero se realiza una vez se tienen empotrados todos los pilares que componen la estructura. Las cerchas instaladas son tubos circulares de 60 mm, calibre 14, de acero ASTM A-653. Cada cercha debe instalarse siguiendo las dimensiones que se especifican en cada uno de los planos (figura 15). La unión entre cercha y pilar se realiza en soldadura normalizada de alta resistencia (figura 16).

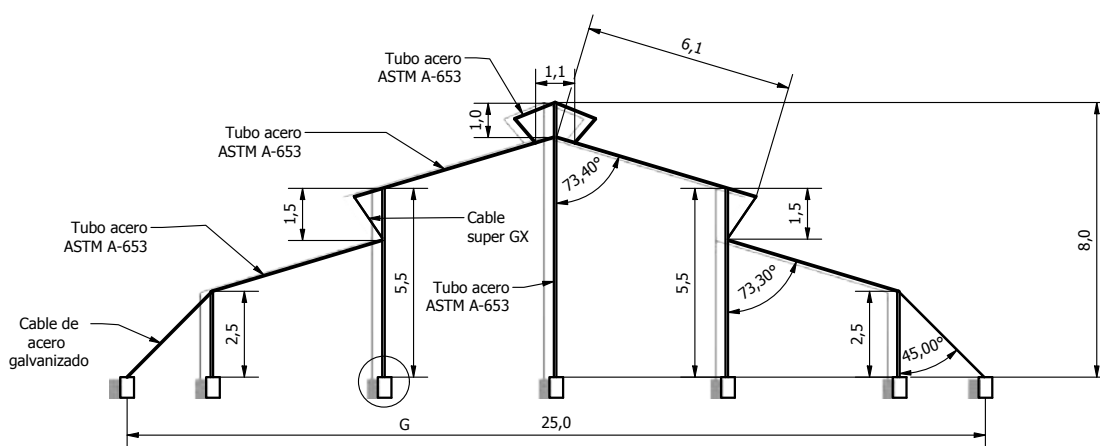


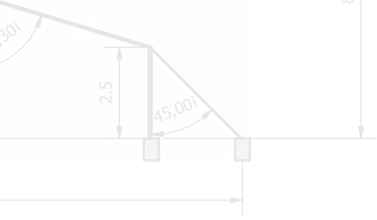
Figura 15. Dimensiones de las cerchas.

Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Instalación de las cerchas.

Foto: Rommel León.





## Instalación de amarres transversales y longitudinales

Una vez se ha instalado la totalidad de la estructura del invernadero, se deben instalar cada uno de los amarres longitudinales y transversales (figura 17). Estos amarres permitirán unir todos los elementos estructurales y posteriormente fijar la lámina de polietileno y la pantalla térmica. La ubicación de los amarres puede encontrarse en los planos de la estructura y deben ser fabricados en cable de acero galvanizado de 3/16".

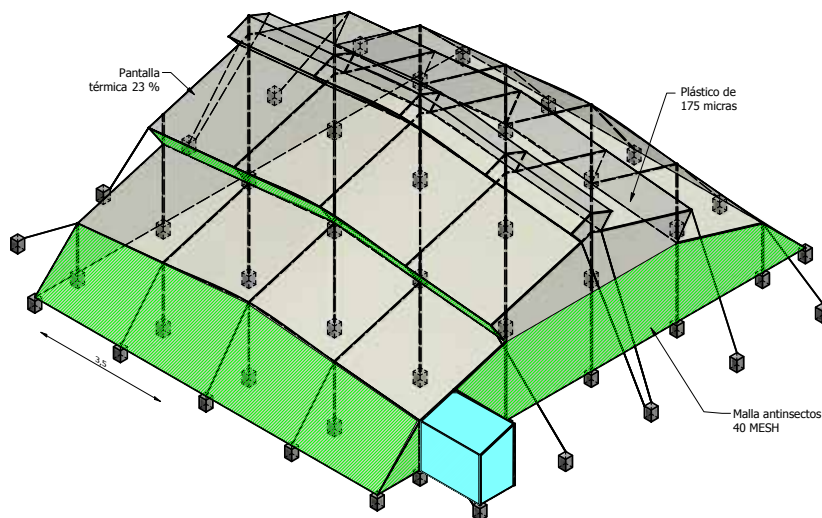
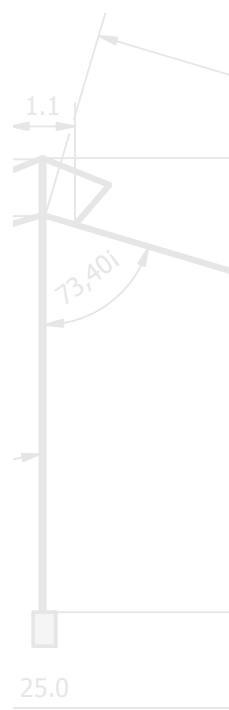
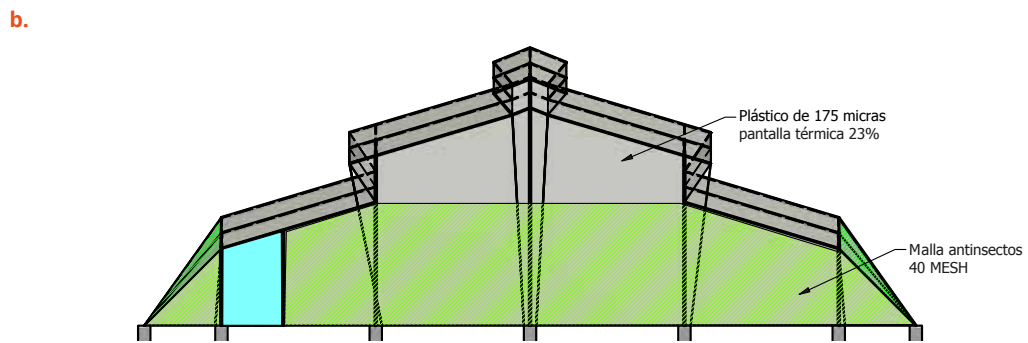
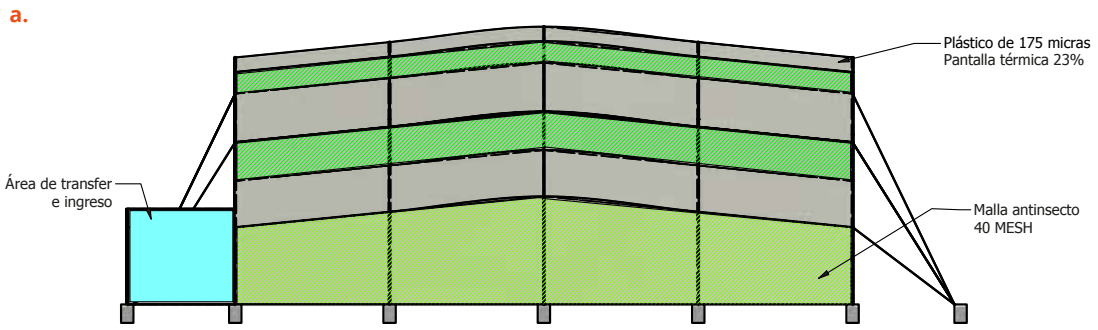


Figura 17. Instalación de amarres longitudinales y transversales.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León

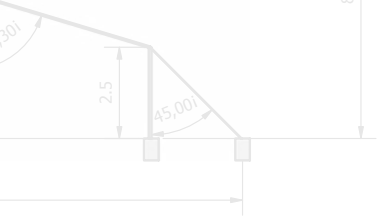
## Instalación de malla antinsecto en los laterales

En las zonas laterales y frontales del invernadero debe instalarse una malla antinsecto de 40 MESH (figura 18).



**Figura 18.** Instalación malla antinsecto. a. Vista frontal; b. Vista lateral; c. Vista real.

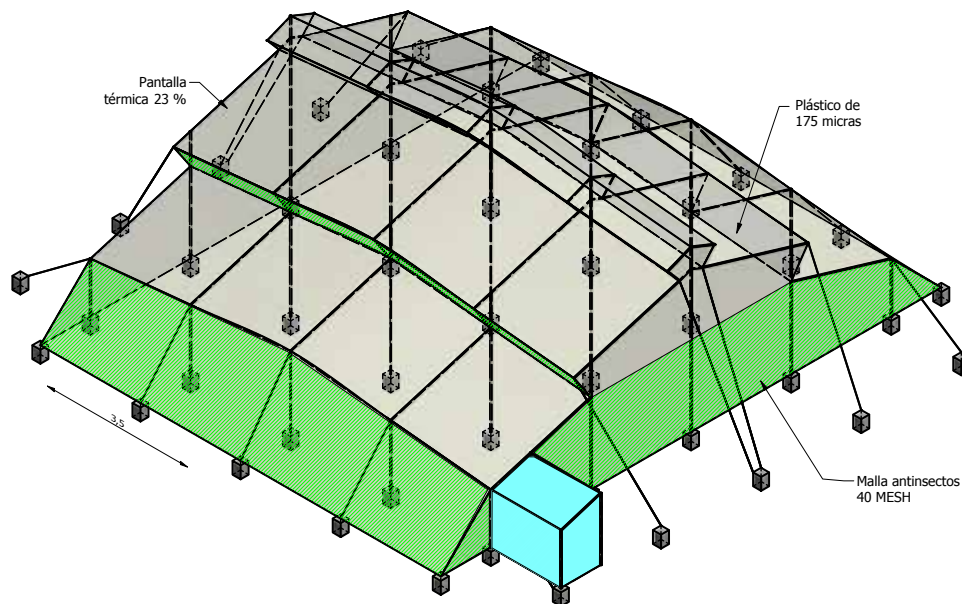
Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León.



## Instalación de pantalla térmica y polietileno

Para la cubierta del invernadero se seleccionó una lámina de polietileno calibre 7. Este es un material transparente con adecuadas propiedades de termicidad, transmisión y difusión de la radiación solar. Adicionalmente, con el fin de contrarrestar los altos niveles de radiación solar característicos de la región de estudio en el interior del invernadero, se instaló una pantalla térmica fabricada en monofilamento negro con mezclas de rafia aluminizada, que proporciona un porcentaje de sombra del 23 % en el interior del invernadero (figura 19). La instalación de esta pantalla térmica permitirá obtener algún grado de gestión de la temperatura en horas de alta radiación.

a.



b.



**Figura 19.** Instalación de cubierta plástica y pantalla térmica. a. Vista externa; b. Vista interior pantalla térmica.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León.

## Construcción del área de transfer y puertas

Adicionalmente, para tener un control de ingreso de personal al área de cultivo, se construyó una zona de transfer con placa en concreto reforzado, doble puerta y pediluvio (figura 20). Con este paso, el invernadero queda listo para la producción agrícola.

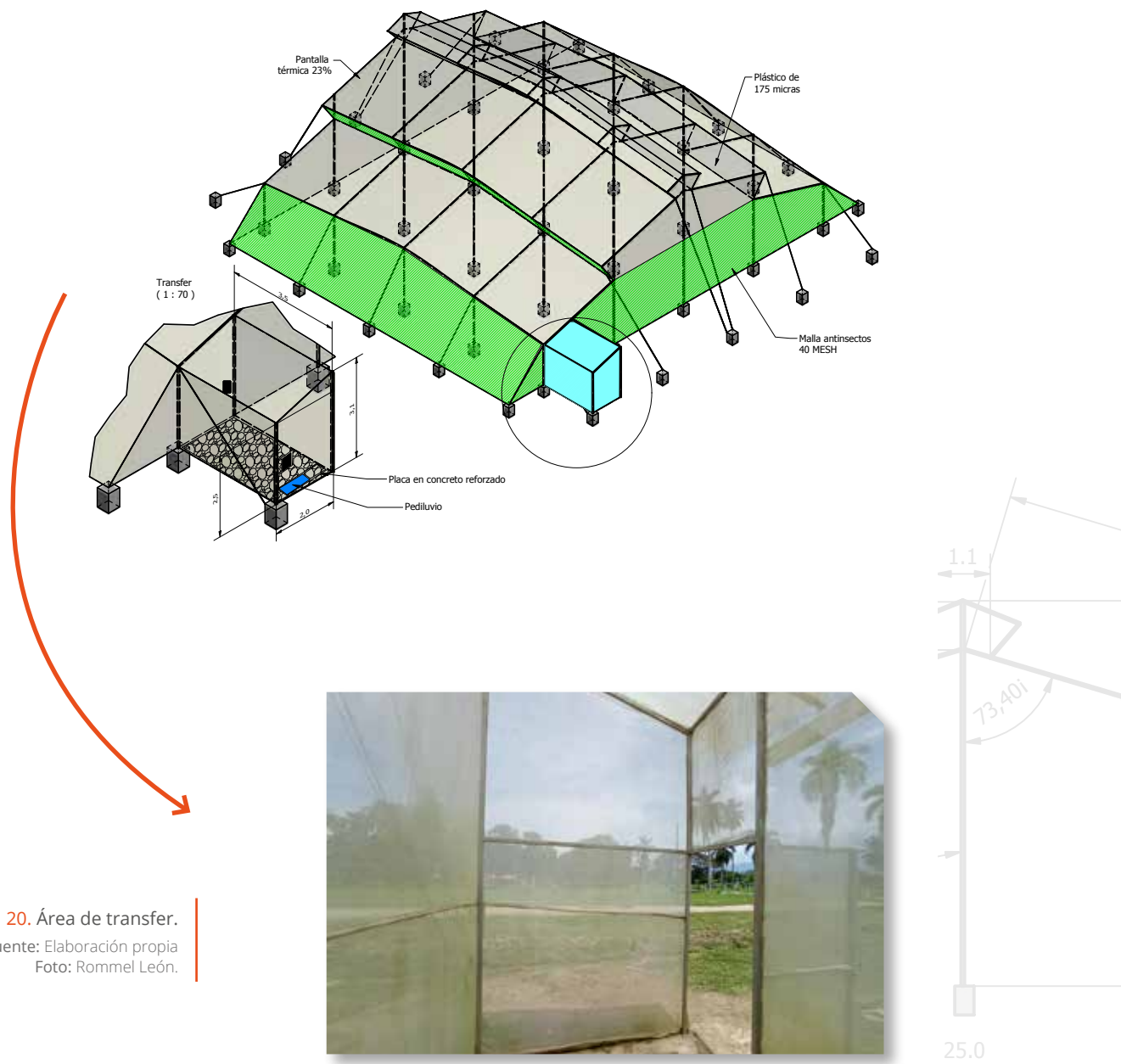
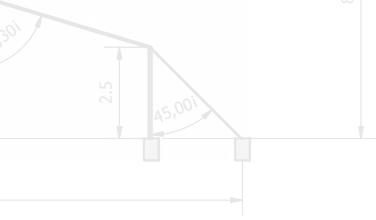


Figura 20. Área de transfer.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León.





**Figura 21.** Invernadero final.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León.





# Capítulo II

## Cantidades de obra

Los materiales necesarios para la construcción del invernadero se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Materiales de construcción del invernadero			
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Arena	m <sup>3</sup>	4,44
2	Cemento. Bolsa x 50 kg	Ud.	53,00
3	Triturado	m <sup>3</sup>	6,05
4	Tubo rectangular de 120 mm x 60 mm, calibre 14, acero galvanizado ASTM A-653	Unidad	14,00
5	Tubo redondo con diámetro de 60 mm, calibre 14, acero galvanizado ASTM A-653	Unidad	37,00
6	Cable de acero galvanizado de 3/16"	ml	336,00
7	Cable de acero galvanizado de 1/8"	ml	393,00
8	Varillas para anclajes en acero 1045, galvanizado en caliente	Unidad	20,00
9	Malla antitrips de 40 MESH con 30 % de sombra	m <sup>2</sup>	480,00
11	Plástico de 175 micras	m <sup>2</sup>	660,0
12	Malla 60 %	m <sup>2</sup>	800
13	Tensores de tornillo	Unidad	61,00
14	Puerta corrediza en tubería metálica de 1" de 1 x 2 m, con malla antitrips de 40 MESH. Debe incluir anticorrosivo, pintura tipo esmalte mate, marco, sello plástico para marco y demás elementos y accesorios para su total hermetización.	Unidad	2,00

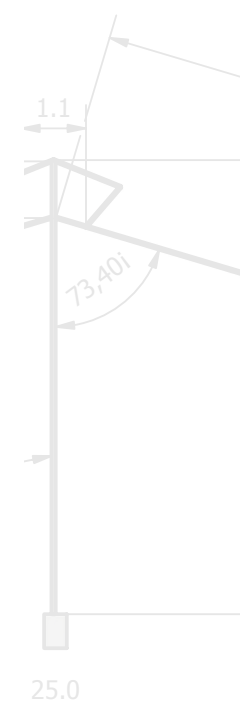
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, la construcción necesitará la contratación de los siguientes servicios especializados (tabla 3).

**Tabla 3. Servicios técnicos requeridos para la construcción del invernadero**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Localización y replanteo.	m <sup>2</sup>	546,00
2	Excavación manual del terreno para la cimentación.	m <sup>3</sup>	7,20
3	Fundición de la cimentación tipo dados de 40 x 40 x 100 cm en concreto de 3.000 PSI.	m <sup>3</sup>	7,20
4	Instalación de pilares perimetrales en tubo rectangular, 120 mm x 60 mm, calibre 14, acero galvanizado ASTM A-653.	ml	67,00
5	Instalación de pilares interiores de tubo redondo, diámetro de 60 mm, calibre 14, acero galvanizado ASTM A-653.	ml	65,40
6	Instalación de arcos de tubo redondo, diámetro de 60 mm, calibre 14, acero galvanizado ASTM A-653.	ml	132,85
7	Instalación de contravientos y amarres longitudinales de cable acero galvanizado de 3/16".	ml	319,92
8	Instalación de contravientos y amarres transversales de cable acero galvanizado de 1/8".	ml	88,40
9	Instalación de anclajes en acero 1045, galvanizado en caliente.	Unidad	20,00
10	Instalación de malla antitrips de 40 MESH, con 30 % de sombra, incluye grapas o costura y otros accesorios para su correcta instalación y funcionamiento.	m <sup>2</sup>	456,80
11	Instalación de plástico. Refuerzo y otros accesorios para su correcta instalación y funcionamiento.	m <sup>2</sup>	660,0
	Instalación de plástico. Refuerzo y otros accesorios para su correcta instalación y funcionamiento.		800,00
12	Construcción de área de transfer de 3 x 1,5 x 2,3 m, en tubería metálica cuadrada de 1 1/2", espesor 2 mm y malla antitrips de 60 MESH. Incluye, placa en concreto de 3.000 PSI con refuerzo en malla electrosoldada de 15 cm x 15 cm; empalmes de estructura, soldaduras, lija, anticorrosivo y pintura tipo esmalte; puertas corredizas, que conserven el principio de la doble precámara con hermetización total y pediluvio en concreto de 0,60 x 0,50 x 0,30 m.	Unidad	1,00
13	Instalación de puerta corrediza en tubería metálica de 1", de 1 m x 2 m, con malla antitrips de 40 MESH. Incluye anticorrosivo, pintura tipo esmalte mate, marco, bisagras, haladeras, sello plástico para marco y otros elementos y accesorios para su total hermetización.	Unidad	2,00

Fuente: Elaboración propia



# Capítulo III

## Operación del invernadero

Al ser un modelo de tipo pasivo para clima cálido, este invernadero está diseñado para que se autogestione de acuerdo con los parámetros de bioclimatización establecidos; por lo tanto, no necesita de ningún tipo de manejo de cortinas. En su interior se puede establecer cualquier tipo de especie hortícola, sea de porte alto, medio o bajo. El sistema de riego del invernadero es de tipo presurizado localizado. Así mismo, para realizar un adecuado seguimiento del comportamiento bioclimático de la estructura es importante llevar un registro de las principales variables climáticas en el exterior e interior del invernadero.

### Monitoreo climático

Se debe llevar un registro continuo del comportamiento microclimático de la estructura, a través del monitoreo y registro de variables climáticas en el ambiente exterior e interior del invernadero

### Registro de variables externas

Se debe realizar la medición de las variables climáticas en un punto externo de la estructura, a través de una estación meteorológica ubicada a una distancia de aproximadamente 50 m. Las variables requeridas son: radiación solar ( $\text{Wm}^{-2}$ ), velocidad ( $\text{ms}^{-1}$ ), dirección del viento, humedad relativa (%), temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) y precipitación (mm). La escala temporal del registro de las variables externas debe ser de 30 min a 60 min.

## Registro de variables internas

Se debe realizar un registro de las variables agroclimáticas en varios puntos uniformemente distribuidos dentro de la estructura, tal como se muestra en la figura 22.

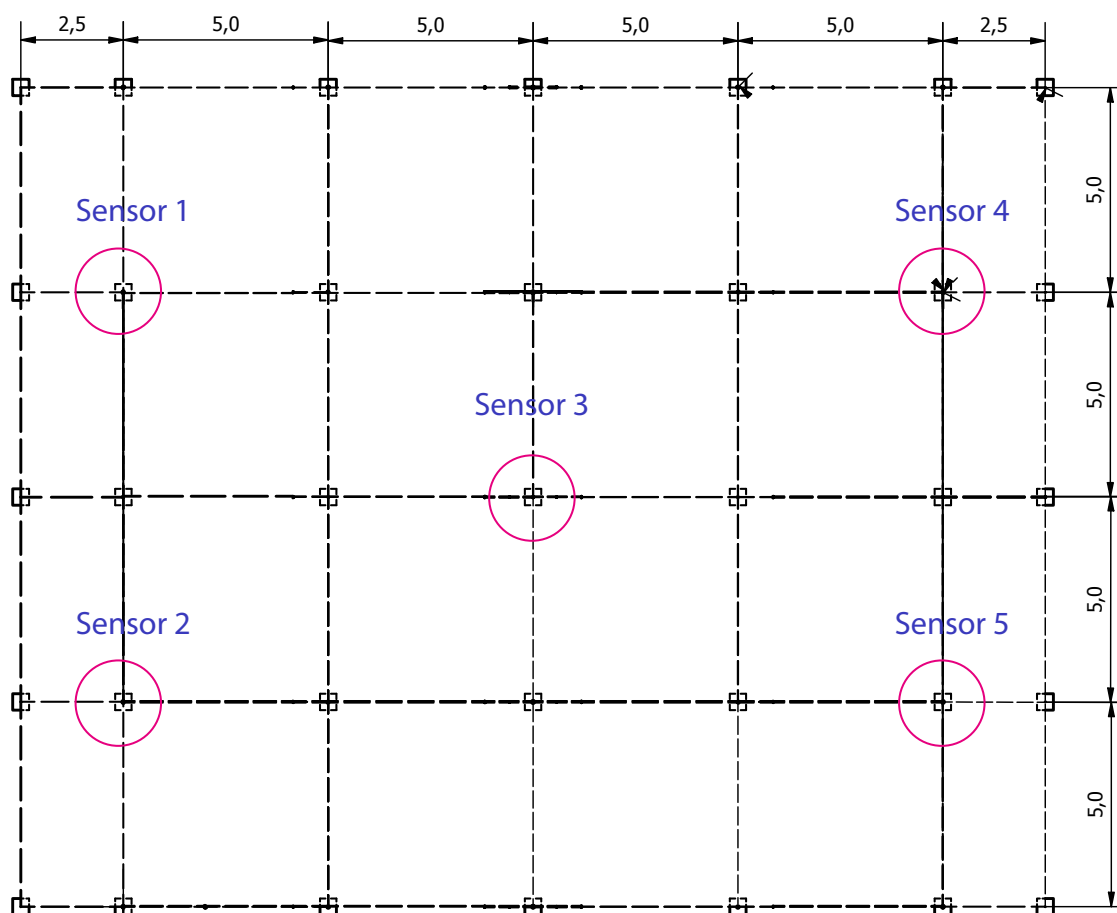
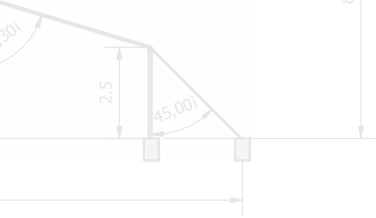


Figura 22. Ubicación de los sensores de monitoreo en el interior del invernadero.  
Fuente: Elaboración propia





- En la zona central de la estructura, a 1,5 m de altura sobre el nivel del suelo, se registraron las variables: temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), radiación solar ( $W/m^2$ ), temperatura del suelo (°C) y, opcionalmente, humedad del suelo (%) (a una profundidad entre los 15 cm y 20 cm).
- En por lo menos cuatros puntos, ubicados aproximadamente a 5 m de cada arista de la estructura, se registra la temperatura del aire (°C) y la humedad relativa (%), a 1,5 m sobre el nivel del suelo.

Los sensores deben codificarse de acuerdo con su distribución dentro de la estructura y elaborar un plano de la ubicación de cada equipo, de tal forma que para la validación se conozca el punto donde se está realizando la captura del dato. Los registros en el interior de la estructura deben ser tomados cada diez minutos. Los equipos necesarios para realizar el monitoreo climático son los siguientes:

- Un (1) sensor interno de temperatura y humedad relativa del aire, a los cuales se les integraron un sensor para la medición de la radiación solar y un sensor para el registro de la temperatura del suelo (figura 23).

**Figura 23.** Sensores de temperatura y humedad relativa del aire.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León.

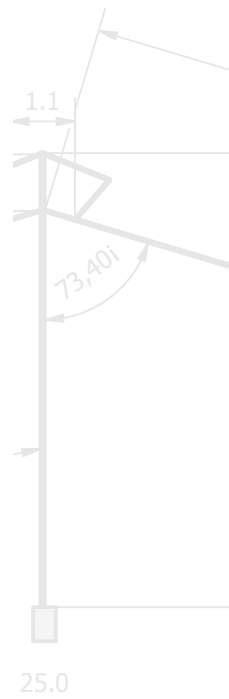


- Cuatro(4) sensores para el registro de las variables de temperatura y la humedad del aire, los cuales deben ser ubicados en las regiones cercanas a las aristas de la estructura.
- Una (1) estación meteorológica con transmisión de datos (figura 24).



**Figura 24.** Estación meteorológica.

Fuente: Elaboración propia  
Foto: Rommel León.



# Capítulo IV

## Mantenimiento del invernadero

Las labores de mantenimiento preventivo y correctivo del invernadero están orientadas a conservar o reparar la estructura y los componentes del sistema mediante su revisión, de manera que pueda ser garantizado su correcto funcionamiento. A continuación, se presentan las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo que deben ser realizadas para los diferentes componentes que forman parte del invernadero.

Las actividades de mantenimiento, principalmente aquellas de carácter correctivo, deben ser adelantadas por personal capacitado en el mantenimiento de invernaderos, por lo que siempre se recomienda realizar este tipo de trabajos a través de una empresa constructora de invernaderos. Estas empresas generalmente ofrecen el servicio de mantenimiento de los invernaderos que ellos han construido.

**Importante:** Todas las actividades de mantenimiento preventivo o correctivo que se realicen al invernadero deben ser llevadas a cabo por personal que cuente con la respectiva certificación para trabajo en alturas.



## Estructura del invernadero

### Mantenimiento preventivo

- › Alineación de parales y cerchas de todo el invernadero en el momento del cambio del material de cubierta.
- › Tensionar nuevamente los amarres transversales y longitudinales del invernadero en el momento de cambiar el material de cubierta.
- › Limpieza de los elementos estructurales del invernadero.

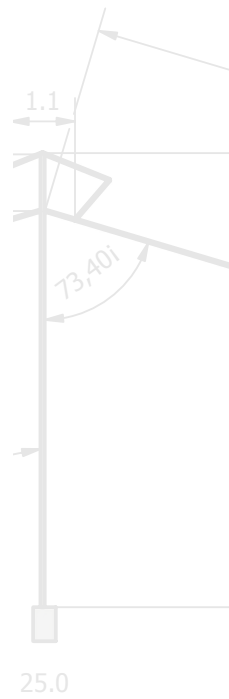
## Cubierta plástica, pantalla térmica

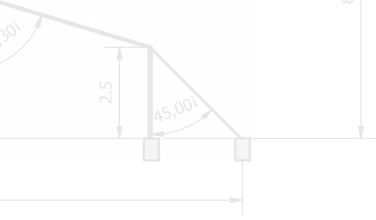
### Mantenimiento preventivo

- › Lavado externo de la cubierta plástica: Con el fin de alargar la vida útil de la cubierta plástica y no disminuir el porcentaje de radiación fotosintéticamente activa que ingresa al área de cultivo, se recomienda hacer un lavado general de la cubierta plástica con una periodicidad semestral.

### Mantenimiento correctivo

- › Rupturas de la cubierta plástica: La ocurrencia de rupturas del plástico del invernadero es una situación que puede presentarse con cierta frecuencia debido a las características de los trabajos realizados dentro del invernadero. Cuando las rupturas o huecos sean relativamente pequeñas, se deben cerrar con cinta adhesiva para invernadero. Si las rupturas son muy grandes (mayores a 1 m), se recomienda el cambio total de la correspondiente sección de plástico, de tal forma que se pueda asegurar la mayor hermeticidad posible del invernadero.
- › Una vez agotada la vida útil de la cubierta plástica, es necesario realizar su cambio total. Este cambio suele darse, generalmente, entre los 2 y 3 años después de instalado el plástico. La toma de la decisión para establecer el momento en el que se debe





realizar el cambio del plástico depende del estado de deterioro que vaya presentando el material. Contactar al servicio técnico para realizar estas tareas de mantenimiento correctivo.

## Ventilaciones laterales y cenitales

### Mantenimiento preventivo

- › Limpieza semestral de las mallas antinsecto con una hidrolavadora. Esta actividad permitirá eliminar partículas de polvo que se vayan acumulando con el tiempo en los poros de la malla.
- › Revisar si las áreas de ventilación presentan pequeñas roturas menores a 30 cm. Si se encuentran, unir el área afectada con nailon.

### Mantenimiento correctivo

- › Ruptura de las mallas antinsecto. Se recomienda contactar al servicio técnico para realizar estas tareas de mantenimiento correctivo.

## Área de transfer

### Mantenimiento preventivo

- › Verificación visual diaria del área de transfer, placa, puertas y pediluvio. Esta zona debe mantenerse limpia y libre de cualquier tipo de material.
- › Revisar periódicamente las puertas de ingreso al área de transfer y al área del invernadero. Si se detectan fallos en los sistemas móviles de alguna de estas puertas, se recomienda solicitar apoyo al área de operaciones de campo para tomar las medidas correspondientes.

### Mantenimiento correctivo

- Realizar cambio de cubiertas y material de sellamiento de las puertas cada vez que se realice el cambio de cubierta general del invernadero.

## Equipos de monitoreo climático

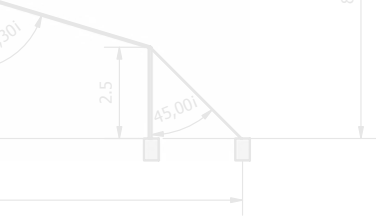
### Mantenimiento preventivo

- Verificación diaria del registro de datos.
- Descarga mensual de los datos registrados y almacenados.

### Mantenimiento correctivo

- Este tipo de mantenimiento debe ser realizado por personal experto en equipos de monitoreo climatológico. Se debe realizar cuando un equipo o sensor presenta fallas por días continuos y el registro de las variables climáticas se vea afectado.





## Referencias

Akrami, M., Javadi, A. A., Hassanein, M. J., Farmani, R., Dibaj, M., Tabor, G. R., & Negm, A. (2020). Study of the effects of vent configuration on mono-span greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Sustainability*, 12(3), 986. <https://doi.org/10.3390/su12030986>

American Society of Agricultural Engineers [ASAE]. (2003). *Heating, ventilating and cooling greenhouses*. ASAE Standards 2003.

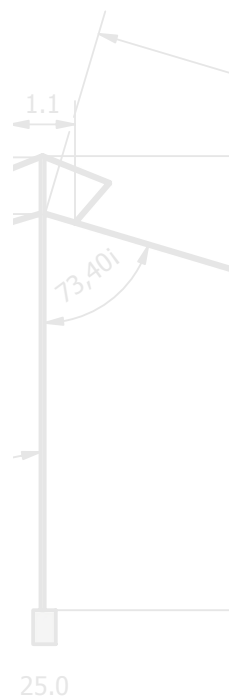
Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronic in Agriculture*, 149, 54-70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>

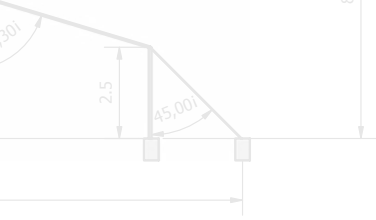
Bournet, P. E. (2014). Assessing greenhouse climate using CFD: A focus on air humidity issues. *Acta Horticulturae*, 1037, 971-986. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.129>

Bournet, P. E., Morille, B., & Migeon, C. (2017). CFD prediction of the daytime climate evolution inside a greenhouse taking account of the crop interaction, sun path and ground conduction. *Acta Horticulturae*, 1170, 61-70. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.6>

Diaz, D. C., Bojacá, C. R., & Schrevens, E. (2018). Modeling the suitability of the traditional plastic greenhouse for tomato production across Colombian regions. *Acta Horticulturae*, 1205, 857-864. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1205.109>

- Espinal-Montes, V., Lorenzo López-Cruz, I., Rojano-Aguilar, A., Roman-tchik-Kriuchova, E., & Ramírez-Arias, A. (2015). Determination of night-time thermal gradients in a greenhouse using computational thermal dynamics. *Agrociencia*, 49 (3), 233–247.
- He, X., Wang, J., Guo, S., Zhang, J., Wei, B., Sun, J., & Shu, S. (2017). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001>
- Hemming, S., Kempkes, F., Van Der Braak, N., Dueck, T., & Marissen, N. (2006). Greenhouse cooling by NIR-reflection. *Acta Horticulturae*, 709, 97-106. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2006.719.8>
- Kim, R. W., Hong, S. W., Lee, I. B., & Kwon, K. S. (2017). Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique. Part 2: Application of the CFD model. *Biosystems Engineering*, 164, 257-280. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.011>
- Piscia, D., Muñoz, P., Panadès, C., & Montero, J. I. (2015). A method of coupling CFD and energy balance simulations to study humidity control in unheated greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.005>
- Rodríguez, C. E., & Velázquez, J. F. (2019). CFD Simulation of heat and mass transfer for climate control in greenhouses. *Heat and Mass Transfer-Advances in Science and Technology Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86322>
- Rojano, F., Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., & Rojano, A. (2014). Dynamics of climatic conditions in a greenhouse: Two locations in Mexico. *Acta Horticulturae*, 1037, 955-962. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.127>
- Senhaji, A., Mouqallid, M., Majdoubi, H., Senhaji, A., Mouqallid, M., & Majdoubi, H. (2019). CFD Assisted study of multi-chapels greenhouse vents openings effect on inside airflow circulation and





microclimate patterns. *Open Journal on Fluid Dynamics*, 9, 119-139. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2019.92009>

Teitel, M., & Wenger, E. (2014). Air exchange and ventilation efficiencies of a monospan greenhouse with one inflow and one outflow through longitudinal side openings. *Biosystems Engineering*, 119, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.11.001>

Villagrán, E. A., Gil, R., Acuña, J. F., & Bojacá, C. R. (2012). Agronomía colombiana. *Agronomía Colombiana*.

Villagrán, E., Bojacá, C. R., & Bahamón, N. A. (2018). Determinación del comportamiento térmico de un invernadero espacial colombiano mediante dinámica de fluidos computacional. *Revista UDCA. Actualidad y Divulgación Científica*. 21(2), 415-426. <https://doi.org/https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1070>

Villagrán, E., & Bojacá, C. (2019 a). CFD Simulation of the increase of the roof ventilation area in a traditional Colombian greenhouse: Effect on air flow patterns and thermal behavior. *International Journal of Heat and Technology*, 37(3), 881-892. <https://doi.org/10.18280/ijht.370326>

Villagrán, E., & Bojacá, C. (2019 b). Study of natural ventilation in a Gothic multi-tunnel greenhouse designed to produce rose (*Rosa spp.*) in the high-Andean tropic. *Ornamental Horticulture*, 25(2), 133-143. <https://doi.org/https://doi.org/10.14295/oh.v25i2.2013>

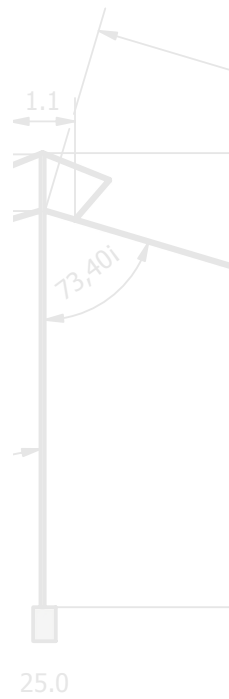
Villagrán, E. A., Baeza Romero, E. J., & Bojacá, C. R. (2019). Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. *Biosystems Engineering*, 188, 288-304. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026>

Villagrán, E., León, R., Rodríguez, A., & Jaramillo, J. (2020). 3D numerical analysis of the natural ventilation behavior in a Colombian greenhouse established in warm climate conditions. *Sustainability*, 12(19), 8101. <https://doi.org/10.3390/su12198101>

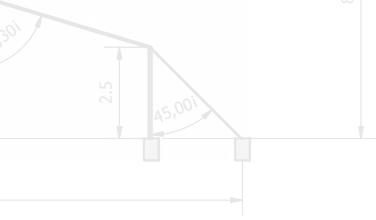
Villagrán, E. (2021). Implementation of ventilation towers in a greenhouse established in low altitude tropical climate conditions: numerical approach to the behavior of the natural ventilation. *Revista Ceres*, 68(1), 10-22. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202168010002>

Villagrán, E., Bojacá, C., & Akrami, M. (2021). Contribution to the sustainability of agricultural production in greenhouses built on slope soils: A numerical study of the microclimatic behavior of a typical Colombian structure. *Sustainability*, 13(9), 4748. <http://doi.org/10.3390/su13094748>

Vivekanandan, M., Periasamy, K., Dinesh Babu, C., Selvakumar, G., & Arivazhagan, R. (2020). Experimental and CFD investigation of six shapes of solar greenhouse dryer in no load conditions to identify the ideal shape of dryer. *Materials Today: Proceedings*, 37 (2), 1409-1416. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.062>







## Los autores

### **Edwin Andrés Villagrán Munar**

[evillagran@agrosavia.co](mailto:evillagran@agrosavia.co)

<https://orcid.org/0000-0003-1860-5932>

Ingeniero agrícola. Magíster en ingeniería agrícola de la Universidad Nacional de Colombia. Candidato a PhD en ciencias ambientales y sostenibilidad. Cuenta con diez años de experiencia en investigación, en el área de agricultura protegida en distintas instituciones. Ha realizado investigaciones en diseño de estructuras de agricultura protegida para el trópico altoandino y en la caracterización aerodinámica y microclimática de invernaderos usados en el sector ornamental.

### **Jorge Eliécer Jaramillo Noreña**

[jejaramillo@agrosavia.co](mailto:jejaramillo@agrosavia.co)

<https://orcid.org/0000-0003-2515-5706>

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Magíster en entomología de la misma institución, con énfasis en manejo integrado de plagas. Cuenta con más de 31 años de experiencia, tanto en el ICA como en AGROSAVIA, en el tema de hortalizas y en el liderazgo de proyectos de investigación y transferencia de tecnología. Así mismo, ha realizado investigación aplicada y participativa en producción artesanal de semillas, en producción limpia de hortalizas (buenas prácticas agrícolas), en evaluación de materiales hortícolas importados y en construcción de modelos tecnológicos en sistemas hortícolas sostenibles bajo condiciones protegidas y campo abierto.

### **Andrea Onelia Rodríguez Roa**

[arodriguezr@agrosavia.co](mailto:arodriguezr@agrosavia.co)

<http://orcid.org/0000-0001-9279-3607>

Investigadora máster en AGROSAVIA. Licenciada en física, magíster en ciencias-meteorología y especialización en geomática. Sus áreas de investigación son las ciencias de la Tierra, principalmente

meteorología, agroclimatología, variabilidad y cambio climático. Ha trabajado en evaluación de modelos climáticos globales, generación de escenarios de cambio climático, construcción de sistemas expertos y alertas tempranas en el campo de la agroclimatología. Igualmente, ha participado en proyectos de investigación y en el análisis de los factores climáticos relacionados con el crecimiento y el desarrollo de cultivos.

### **Rommel Igor León Pacheco**

[rleon@agrosavia.co](mailto:rleon@agrosavia.co)

<https://orcid.org/0000-0002-9928-5282>

Investigador en el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) (2005-2016). Investigador máster en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA (desde el 2016 hasta ahora). Ingeniero agrónomo con maestría en Agronomía y Orientación en Mejoramiento Genético de Plantas y Ecofisiología Vegetal. Investigador con más de 15 años de experiencia en sistemas productivos de cultivos transitorios. Coordinador e investigador en proyectos, subproyectos y acciones orientadas a la identificación de genotipos superiores, a través de recursos fitogenéticos, programas de mejoramiento genético, manejo integrado de la productividad y ecofisiología del estrés en cultivos.

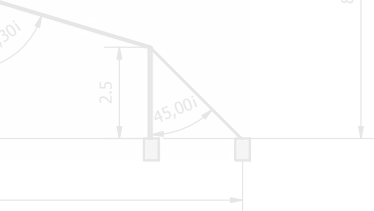
### **Marlón José Yacomelo Hernández**

[myacomelo@agrosavia.co](mailto:myacomelo@agrosavia.co)

<https://orcid.org/0000-0002-5831-5246>

Ingeniero agrónomo de la Universidad del Magdalena, con maestría en ciencias agrarias (énfasis en suelo, agua y nutrición vegetal) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Investigador de la Red de Frutales de AGROSAVIA, con habilidades para desarrollar programas de investigación y transferencia de tecnología y para identificar limitantes y proponer soluciones en el área de suelo, agua y nutrición vegetal que garanticen la preservación de los recursos naturales y contribuyan al aumento de la productividad de los cultivos.





## Instituciones participantes

**AGROSAVIA**

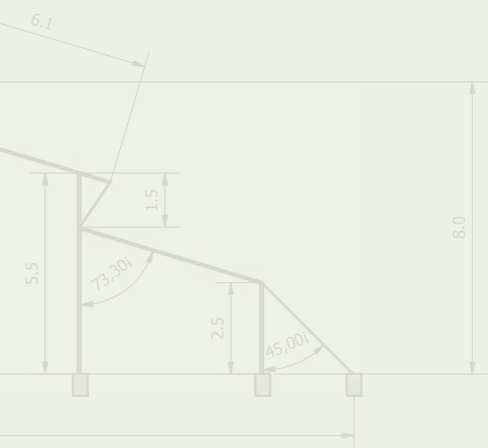
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

**idiap** Instituto de Innovación  
Agropecuaria de Panamá



Instituto Nacional de Innovación y  
Transferencia en Tecnología Agropecuaria





Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)

Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)