

# DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA TIPO MARQUESINA PARA EL SECADO HOMOGÉNEO Y RÁPIDO DEL CAFÉ

Design of a Canopy-Type Structure for Homogeneous and Rapid Drying of Coffee

Sargen Yohan Lozano Arias <sup>1</sup>  
sargen.lozano@unipaz.edu.co

<sup>1</sup>Instituto Universitario de la Paz, Escuela de Ingeniería de Producción, Grupo de Investigación en Reingeniería, Innovación Y Productividad

Recibido: septiembre 15 de 2025 – Aceptado: mayo 28 de 2026

## **Resumen**

El presente artículo tiene como objetivo diseñar una secadora de café tipo marquesina para optimizar el secado del café pergamino en la región del Catatumbo, Norte de Santander, Colombia, abordando la necesidad de mejorar la eficiencia térmica y la calidad del producto. Para ello, se realizaron estudios de campo en fincas locales durante enero de 2024, donde se recopilaban datos de temperatura y dimensiones de marquesinas existentes, además de analizar la geometría y el movimiento homogéneo del grano en el proceso de secado. A partir de los resultados obtenidos, se propuso una estructura con cubierta parabólica y un mecanismo de rastrillo diseñado para garantizar un secado más uniforme y rápido. Los hallazgos demuestran que la modificación en la altura y forma de la cubierta, junto con el nuevo sistema de movimiento, permite reducir las pérdidas de calor, acelerar el proceso y mejorar la calidad final del café. En conclusión, la implementación del diseño propuesto aporta una solución viable para incrementar la eficiencia y sostenibilidad de los caficultores de la región

**Palabras clave:** *Diseño de marquesina, café pergamino, secado homogéneo, caficultor, eficiencia térmica, secado solar*

## **Abstract**

This article aims to design a canopy-type coffee dryer to optimize the drying of parchment coffee in the Catatumbo region, Norte de Santander, Colombia, addressing the need to improve thermal efficiency and product quality. To this end, field studies were conducted on local farms during January 2024, where temperature and dimension data from existing canopies were collected, in addition to analyzing the geometry and homogeneous movement of the bean during the drying process. Based on the results obtained, a structure with a parabolic roof and a rake mechanism designed to ensure more uniform and rapid drying was proposed. The findings demonstrate that modifying the height and shape of the roof, together with the new movement system, reduces heat losses, accelerates the process, and improves the final coffee quality. In conclusion, the implementation of the proposed design provides a viable solution to increase the efficiency and sustainability of coffee growers in the region.

**Keywords:** *Canopy design, parchment coffee, homogeneous drying, coffee grower, thermal efficiency, solar drying.*

## I. INTRODUCCIÓN

En gran parte de las regiones de Colombia, y específicamente en Norte de Santander, la siembra y recolección del café constituyen una actividad fundamental para los campesinos que dependen de este cultivo para obtener ingresos significativos durante la cosecha. Para el periodo del 2020, el departamento cuenta con 36 municipios productores de café y aproximadamente 23.500 hectáreas dedicadas a este cultivo, logrando una producción cercana a 22 sacos de café por hectárea [1]. Además, esta producción significativa del café se sustenta en un proceso productivo compuesto por varias etapas fundamentales, las cuales se ilustran en la Figura 1. En primer lugar, se realiza la recolección manual de las cerezas maduras, garantizando la selección del fruto en su punto óptimo. Posteriormente, el café es sometido a un proceso de despulpado y lavado, donde se retira la pulpa y las impurezas presentes en el grano. A continuación, se lleva a cabo el secado del café, empleando marquesinas, patios solares o secadoras mecánicas, con el fin de reducir el contenido de humedad hasta niveles adecuados para su conservación.

Seguidamente, el grano seco pasa por la etapa de trillado, en la cual se elimina la cáscara para obtener el café verde. Finalmente, se realiza el tostado y la molienda, procesos que permiten desarrollar las propiedades sensoriales del grano y obtener el producto final listo para su comercialización.



Figura 1. Proceso de Producción de Café.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos y adaptados de CAFÉSABORA [2].

Cada una de estas fases es fundamental para asegurar la calidad final del producto, que será procesado en las fábricas de café en polvo. Para garantizar un buen café, es fundamental optimizar el proceso de secado en óptimas condiciones, ya que estudios recientes indican que un control adecuado de la temperatura y ventilación durante el secado reduce significativamente la aparición de defectos físicos y microbiológicos en el café, impactando directamente en la calidad sensorial y la vida útil del grano [3]. Con este enfoque técnico permite a los caficultores mejorar la consistencia del producto final y aumentar su competitividad en mercados exigentes, mitigando riesgos asociados a fermentaciones indeseadas y garantizando una adecuada conservación de los

compuestos aromáticos y nutrientes esenciales [4].

Por ello, optimizar estas etapas no solo impacta la rentabilidad de los productores, sino también la sostenibilidad del cultivo en la región, destacando la importancia de mejorar procesos como el secado para garantizar un café de alta calidad y competitivo en el mercado. [5].

Actualmente, los caficultores emplean diferentes métodos para realizar el proceso de secado del café, entre los cuales se destacan las marquesinas, los patios solares y las secadoras mecánicas a gas, tal como se muestra en la Figura 2. En la Figura 2(a) ilustra el secado en patio solar, caracterizado por su bajo costo de implementación y aprovechamiento de la energía solar directa, aunque es altamente dependiente de las condiciones climáticas y presenta riesgo de secado heterogéneo, lo que puede propiciar la aparición de hongos o fermentación. En la siguiente Figura 2(b) se presenta el secado en marquesina, el cual permite proteger el grano de la lluvia y contaminantes, ofreciendo un mayor control del proceso respecto al patio solar; sin embargo, depende de la radiación solar disponible y puede tardar entre 7 y 15 días.

Finalmente, la Figura 2(c) muestra la secadora a gas, la cual permite un secado rápido y uniforme en un periodo de 24 a 48 horas, reduciendo el riesgo microbiológico; no obstante, implica mayores costos de inversión y operación, además de un elevado consumo energético que puede afectar el perfil sensorial del grano si no se controla adecuadamente la temperatura [6].



a) Secado solar en patio.

b) Marquesina.

c) Secadora a gas.

Figura 2. Tipos de Secadoras de Café.

Fuente: Adaptado de Cárdenas y Pardo (2014).[7]

Entre las alternativas de secado empleadas en el sector cafetero, las estructuras tipo marquesina han adquirido especial relevancia debido a su capacidad para aprovechar la energía solar de manera más eficiente en comparación con métodos tradicionales a cielo abierto. Estas estructuras funcionan como sistemas de secado solar indirecto que operan bajo el principio de efecto invernadero, permitiendo incrementar la temperatura del aire en su interior y favorecer la evaporación de la humedad contenida en el grano. No obstante, las configuraciones convencionales de las marquesinas presentan limitaciones relacionadas con su geometría y la ausencia de mecanismos que faciliten el movimiento del café durante el proceso, lo que puede generar distribuciones térmicas no uniformes y afectar la homogeneidad del secado. [8]

Por tal razón, la persistencia de estas prácticas anticuadas puede limitar que las familias cafeteras de Norte de Santander

obtingan el máximo beneficio económico, comprometiendo la rentabilidad de su producción y poniendo en riesgo su sustento.

Para enfrentar esta problemática, se propone el diseño de una secadora tipo marquesina orientada a optimizar el proceso de secado mediante la reducción de las pérdidas de calor y la mejora en la distribución de la temperatura al interior de la estructura, lo que favorece un secado más homogéneo del grano. Esta optimización se logra a partir de la modificación geométrica de la cubierta y la incorporación de un mecanismo que permite la remoción constante del café durante el proceso, disminuyendo el tiempo de secado y reduciendo el riesgo de aparición de hongos o fermentaciones indeseadas. De esta manera, se contribuye a mejorar la calidad del producto final y la sostenibilidad económica de los productores.

## II. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Ante la problemática detectada en la calidad y eficiencia del secado de café, se llevó a cabo una revisión bibliográfica y documental mediante la consulta de bases de datos académicas como Scopus, ScienceDirect, Google Scholar y repositorios institucionales, utilizando palabras clave como secado de café, secado solar, marquesinas, transferencia de calor y eficiencia térmica. Inicialmente, se identificaron estudios relacionados con métodos tradicionales y mecánicos de secado publicados entre 2010 y 2024, de los cuales se seleccionaron aquellos que abordaban principios de funcionamiento, análisis térmico y desempeño bajo condiciones climáticas similares a las de la región de estudio. Con esta revisión, se permitió integrar antecedentes técnicos y normativos relevantes sobre los principales métodos de secado de café, haciendo especial énfasis en el uso de marquesinas o invernaderos.

Por tal razón, a partir de la revisión bibliográfica realizada, se incluyó la caracterización de los distintos tipos de secadoras que se emplean actualmente en el sector cafetero, evaluando sus principios de funcionamiento, ventajas comparativas y desventajas inherentes bajo condiciones climáticas específicas de la región. En la Tabla 1 se presenta una comparación de los principales métodos de secado del café, elaborada con base en información reportada en estudios técnicos y documentos institucionales [9], lo que permitió fundamentar el diseño conceptual y técnico propuesto, así como sustentar la elección de una marquesina mejorada orientada a pequeños y medianos productores.

Método	Ventajas	Desventajas
<b>Marquesina</b>	Protege de lluvias y contaminantes. Permite mayor control que el patio. Menor inversión que una secadora a gas.	Requiere mayor espacio. Depende de radiación solar. Tiempo de secado 7–15 días.
<b>Patio solar</b>	Bajo costo de implementación.	Altamente dependiente del clima.

	Aprovecha energía solar directa. Puede secar grandes volúmenes.	Riesgo de secado heterogéneo. Susceptible a hongos y fermentación.
<b>Secadora a gas</b>	Secado rápido y uniforme (24–48 h). Menor riesgo de hongos. Permite programar y controlar temperatura.	Alto costo de inversión y operación. Mayor consumo energético. Puede afectar el perfil sensorial del grano si no se controla bien.

Tabla 1. Comparación de métodos de secado del café.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos y adaptados de CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ-CENICAFÉ. [9]

### A. Estudio de Campo y Recolección de Datos Meteorológicos.

Con el fin de validar y complementar la información teórica, se llevaron a cabo mediciones empíricas en condiciones reales de operación los días 8, 9 y 10 de enero de 2024. Dichas mediciones se realizaron en fincas del municipio de Bucarasica, reconocidas por su tradición cafetera en la región del Catatumbo, donde se encuentran diferentes tipos de marquesinas utilizadas en el proceso de beneficio del café. Además, la elección de este lugar obedeció tanto a la facilidad para llevar a cabo las pruebas como al acceso disponible a las instalaciones.

Respecto a el proceso de recolección de datos se llevó a cabo en cada marquesina, donde se monitoreó exclusivamente la temperatura interna y la temperatura ambiental externa. Dado que todas las marquesinas se encontraban en un mismo lugar, se trabajó únicamente con estas estructuras, lo que permitió asegurar condiciones homogéneas de comparación.

Además, para las mediciones se emplearon instrumentos debidamente calibrados, entre ellos termómetros de mercurio para registros horarios y estaciones meteorológicas con almacenamiento digital de datos. Las mediciones se realizaron bajo condiciones ambientales similares de radiación solar, temperatura y velocidad del viento, garantizando que las tres marquesinas evaluadas operaran en igualdad de condiciones durante el proceso de secado. Asimismo, se tomaron las dimensiones físicas de cada estructura, las cuales presentaban las mismas medidas generales: 6 metros de largo, 2,8 metros de ancho y una altura de 0,45 metros desde el suelo hasta la plataforma de secado, siendo la única diferencia registrada la altura desde la plataforma de secado hasta el punto más alto de la cubierta.

En la Tabla 2 presenta las alturas específicas de cada marquesina evaluada, mientras que en la Figura 3 se muestra el esquema de distribución de las estructuras analizadas durante las mediciones de campo. Esta disposición permitió analizar comparativamente el efecto de la altura de la cubierta sobre las pérdidas térmicas y la uniformidad del proceso de secado, manteniendo constantes las demás variables geométricas.

Caso Estudio	Altura de la cubierta(m)
Marquesina 1	1 m
Marquesina 2	0,93
Marquesina 3	1,16

Tabla 2. Comparación de la altura de la cubierta de la marquesina 1, marquesina 2 y marquesina 3.

Fuente: Elaboración propia.

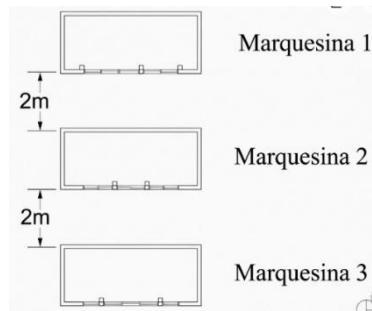


Figura 3. Distribución de las marquesinas de café.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta las dimensiones de cada marquesina, la Figura 4 corresponde a los datos obtenidos en campo y muestra cómo, a menor altura de la cubierta, se logra una mayor retención de calor en el interior de la estructura, lo que favorece un secado más eficiente y homogéneo del café.

Estos datos permiten comparar el comportamiento térmico de cada sistema, evidenciando la influencia de las dimensiones físicas en la optimización del proceso de secado.

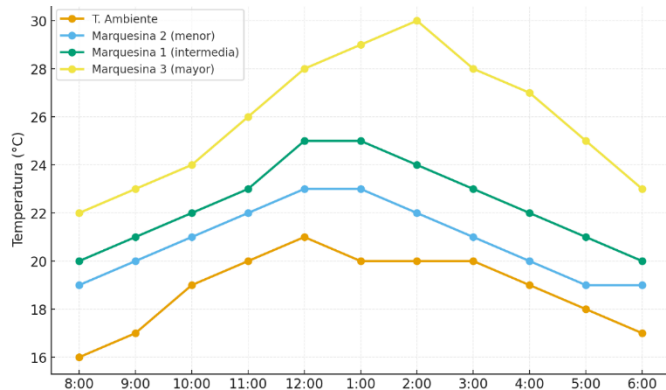


Figura 4. Comparación de las temperaturas de las marquesinas.

Fuente: Elaboración Propia.

### B. Análisis de los Datos.

A partir de las mediciones realizadas en las marquesinas, se observó que aquellas con menor altura presentaron una mayor temperatura en su interior, lo cual evidencia que la geometría influye directamente en el comportamiento térmico de la estructura. Para analizar este fenómeno, se aplicó el modelo de

transmisión térmica a través de cubiertas utilizado en el análisis de invernaderos y estructuras agrícolas, basado en el coeficiente global de transferencia de calor y descrito en manuales de ingeniería térmica y climatización descrita por el autor Çengel y Ghajar (2015). En este estudio, el modelo fue adaptado para incorporar la relación geométrica entre el área de la cubierta y el área del suelo de la marquesina, con el fin de evaluar el efecto de la altura sobre las pérdidas térmicas. La expresión empleada se presenta en la Ecuación 1. [10]

$$Q_{cub} = \alpha_c \left( \frac{A_c}{A_s} \right) (T_a - T_e)$$

Donde,

$Q_{cub}$  = Pérdida de calor a través de la cubierta (W)

$\alpha_c$  = Coeficiente de transferencia de calor de la cubierta ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

$A_c$  = Área de la cubierta ( $m^2$ )

$A_s$  = Área del suelo de la marquesina ( $m^2$ )

$T_i$  = Temperatura interior ( $^\circ C$ )

$T_e$  = Temperatura exterior ( $^\circ C$ )

En este caso, el material de la cubierta utilizado en las marquesinas fue polietileno (PE), para el cual se adoptó un coeficiente de transferencia de calor de  $5 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$  [11].

La selección de este coeficiente se realizó considerando que las marquesinas evaluadas operan sin sistemas de ventilación forzada y están expuestas a condiciones ambientales similares, por lo que dicho valor representa adecuadamente el comportamiento térmico del material en el contexto del estudio. Además, considerando que las demás dimensiones de las marquesinas eran equivalentes, la variación se concentró en la altura de la cubierta, la cual determinó diferencias en la relación  $A_c/A_s$ .

Para el análisis térmico se establecieron valores constantes de temperatura interior y exterior en los tres casos evaluados ( $35^\circ C$  y  $21^\circ C$ , respectivamente), con el fin de aislar el efecto de la variación en la altura de la cubierta y evaluar de manera más precisa su influencia sobre el comportamiento térmico de la estructura. Bajo estas condiciones, fue posible analizar comparativamente las pérdidas de calor asociadas a cada configuración geométrica. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Caso Estudio	$A_c/A_s$	Q
Marquesina 1	1,404	98,25
Marquesina 2	1,579	110,5
Marquesina 3	1,308	91,58

Tabla 3. Análisis de temperaturas para las marquesinas 1, 2 y 3 en condiciones ideales.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en estos resultados, se realizaron pruebas adicionales variando la altura de la cubierta y calculando nuevamente las pérdidas de calor, con el propósito de confirmar la tendencia observada: a menor altura de cubierta, menor pérdida de calor en la marquesina.

1	Q <sub>cub</sub>	2	R <sub>M</sub> [m]
	91,58		1
	90		0,9848
	89		0,9752
	88		0,9656
	87		0,956
	86		0,9463
	85		0,9366
	84		0,9269
	83		0,9171
	82		0,9074

Figura. 5. Relación entre la pérdida de calor de la cubierta y la altura de la cubierta.

Fuente: Elaboración propia, en el software EES.

De acuerdo con los resultados presentados en la figura 5, se observa que la variación en la altura de la cubierta influye directamente sobre el comportamiento térmico de la marquesina y, en consecuencia, sobre el parámetro RM, definido en este estudio como la relación geométrica asociada al radio de la cubierta en función de su altura. Las configuraciones con mayor altura presentan mayores pérdidas de calor(Q), lo que reduce la temperatura interna de la estructura y ralentiza la evaporación de la humedad contenida en el café pergamino.

Por el contrario, las configuraciones con menor altura favorecen una mayor retención térmica al interior del sistema, incrementando la velocidad de secado. En este sentido, la tendencia observada permitió establecer que una altura de 0,6 m desde la plataforma de secado hasta el punto más alto de la cubierta representa una condición adecuada para minimizar las pérdidas térmicas sin comprometer la operatividad de la estructura.

Aunque alturas menores podrían mejorar el desempeño térmico, estas dificultarían el acceso de los operarios durante las labores de remoción del grano en el proceso de secado.

### C. Diseño Mecánico.

Con el fin de que el diseño de la marquesina presentara la menor área posible de cubierta y aprovechara de manera óptima la radiación solar disponible, se seleccionó una geometría parabólica para la cubierta. Con esta configuración se asegura una distribución más uniforme de las cargas estructurales y favorece la captación, acumulación y transmisión del calor al interior de la marquesina, incrementando la eficiencia del proceso de secado. [12]

A partir de los resultados obtenidos en el análisis térmico, se

decidió modificar únicamente la altura de la cubierta, mientras que las demás dimensiones (largo, ancho y altura de la plataforma) se mantuvieron iguales a las tradicionales, con el fin de no alterar la productividad ni las condiciones de trabajo de los caficultores.

Dimensión	Valor
Largo total	6 m
Ancho	2 m
Altura desde la plataforma al punto más alto	0,6 m
Altura de la plataforma de secado sobre el suelo	0,45m

Tabla 4. Dimensiones del prototipo propuesto de la marquesina.  
Fuente: Elaboración propia, con datos adaptados de CENICAFÉ.

Para garantizar un movimiento eficiente del café sobre la superficie de secado, se diseñó un rastrillo mecánico cuyas dimensiones fueron definidas en función del ancho de la marquesina y de las condiciones de trabajo del operario.

El rastrillo presenta un largo total de 2 m, un espesor de marco de 0,03 m, dientes de 0,15 m de longitud y una separación entre dientes de 0,05 m, parámetros que se muestran en la Tabla 5. Estas dimensiones permiten cubrir prácticamente todo el ancho de la superficie de secado, facilitando el movimiento homogéneo del grano durante el proceso.

A diferencia de un rastrillo agrícola comercial convencional, el diseño propuesto incorpora dientes más cortos y con separación uniforme, lo que reduce el riesgo de fractura del grano de café pergamino y permite un volteo más controlado del producto. Además, el rastrillo fue concebido para desplazarse sobre rieles laterales mediante un eje con rodamientos, disminuyendo el esfuerzo físico requerido por el operario. Desde el punto de vista ergonómico, el diseño considera una altura de mango adecuada para la operación en posición de pie, una distribución equilibrada del peso del sistema y un movimiento guiado del rastrillo, lo que contribuye a reducir la fatiga del operario durante las labores repetitivas de remoción del café. En la tabla 5, se presentan las medidas definidas para el diseño del rastrillo.

Parámetro del Rastrillo	Valor(m)
Largo total	2
Espesor del marco	0,03
Separación entre dientes	0,05
Longitud de los dientes	0,15

Tabla 5. Dimensiones del rastrillo propuesto para la marquesina.  
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se realizaron los cálculos de fuerzas y esfuerzos a los que estaría sometido el rastrillo, con el propósito de determinar los materiales más adecuados que garanticen resistencia estructural, durabilidad y facilidad de operación. Para este análisis se consideraron variables como la masa total del rastrillo (27,6 kg), el peso generado por la acción de la gravedad y la distribución de la carga sobre el eje principal

durante el desplazamiento del mecanismo sobre los rieles. A partir de estos parámetros se estimaron las cargas actuantes sobre el sistema, considerando las condiciones normales de operación del rastrillo durante el proceso de remoción del café.

Para garantizar un funcionamiento seguro del mecanismo, se adoptó un factor de servicio de 1,5, valor comúnmente utilizado en sistemas mecánicos sometidos a cargas moderadas y movimientos repetitivos. Este criterio permite incorporar un margen de seguridad frente a posibles variaciones en las condiciones reales de operación, tales como fricción adicional, irregularidades en la superficie de desplazamiento o incrementos ocasionales de carga durante el movimiento del café.

Con base en estos cálculos y criterios de diseño se definieron las propiedades del material, el diámetro del eje y la selección de los rodamientos que conforman el sistema, cuyas características finales se presentan en la Tabla 6.

Ítem	Características
Material del rastrillo	PVC rígido
Densidad del material	1380 kg/m <sup>3</sup>
Masa	27,6 kg
Material de los rieles	Acero inoxidable AISI 304
Diámetro del eje del rastrillo	25 mm (selección comercial, calculado en 24 mm)
Factor de servicio	1,5
Resistencia a fluencia	470 MPa (Acero 1020 estirado en frío)
Rodamientos	61805

Tabla 6. Características del rastrillo propuesto para la marquesina.

Fuente: Elaboración propia.

La selección del material del eje se realiza considerando los esfuerzos obtenidos en el análisis estructural y las condiciones de operación del sistema. En particular, se optó por utilizar acero AISI 1020 estirado en frío, debido a que este material presenta una adecuada combinación entre resistencia mecánica, facilidad de mecanizado, disponibilidad comercial y costo relativamente bajo. Además, su límite de fluencia aproximado de 470 MPa proporciona un margen de seguridad suficiente frente a los esfuerzos generados durante la operación del rastrillo.

Los resultados obtenidos del análisis estructural se presentan en la Figura 6, donde se muestra el análisis estático del eje principal del rastrillo realizado mediante los softwares SolidWorks y MDSolids. En la gráfica se observa la distribución de esfuerzos generados en el eje como consecuencia de las cargas aplicadas durante la operación del sistema. El valor máximo de esfuerzo obtenido fue de 135,38 MPa, valor considerablemente inferior al límite de fluencia del material seleccionado. Esta diferencia confirma que el eje puede soportar las condiciones de trabajo sin presentar

deformaciones permanentes, manteniendo un margen adecuado de seguridad estructural.

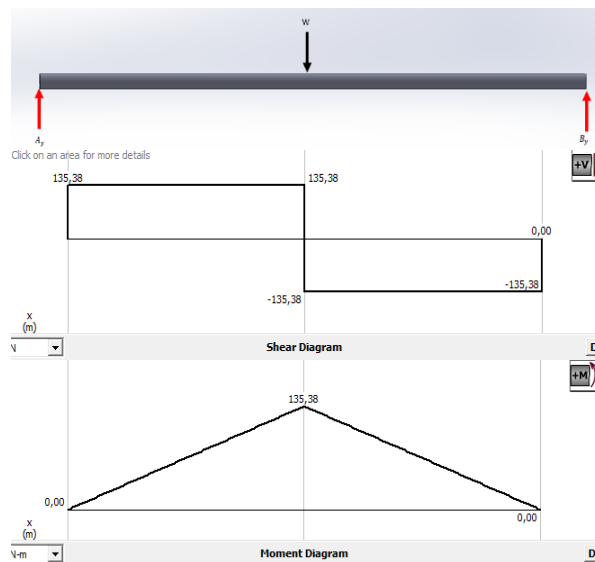


Figura 6. Análisis estático del eje principal del rastrillo.

Fuente: Elaboración propia, en el software SolidWorks y MDSolids.

De acuerdo con estos resultados, se determinó la selección de un eje con diámetro comercial de 25 mm, valor cercano al diámetro mínimo calculado de 24 mm, lo que facilita su disponibilidad comercial y garantiza un desempeño estructural adecuado durante la operación del sistema.

Adicionalmente, el rastrillo se encuentra apoyado sobre una estructura de rieles laterales fabricados en acero inoxidable AISI 304, los cuales permiten el desplazamiento del mecanismo mediante rodamientos. Este sistema de apoyo facilita un movimiento más suave y uniforme del rastrillo a lo largo de la superficie de secado, reduciendo el esfuerzo requerido por el operario y permitiendo una distribución homogénea del café durante el proceso de remoción. El diseño general del sistema mecánico integrado a la marquesina se presenta en la Figura 7, donde se ilustra la disposición del rastrillo, los rieles de desplazamiento y la estructura de soporte que conforma el mecanismo propuesto.

#### D. Modelación Computacional en SolidWorks.

Una vez definidas las características físicas, geométricas y mecánicas del sistema, se realiza la modelación tridimensional mediante el software CAD SolidWorks. En esta etapa se toman como referencia los parámetros obtenidos en los análisis previos, particularmente las dimensiones estructurales de la marquesina, las especificaciones geométricas del rastrillo y las propiedades mecánicas de los componentes del sistema.

Partiendo con esta información se desarrolla un modelo digital que integra la estructura principal de la marquesina, la cubierta, las entradas de ventilación y el mecanismo de desplazamiento del rastrillo sobre rieles laterales. En este

contexto, la geometría de la cubierta se define considerando la altura óptima determinada en el análisis térmico, lo cual favorece la retención de calor dentro de la estructura y contribuye a mejorar las condiciones de secado del café.

El mecanismo del rastrillo se incorpora al conjunto teniendo en cuenta las dimensiones y los materiales previamente seleccionados, así como el eje y los rodamientos que permiten su desplazamiento a lo largo de los rieles. En consecuencia, la modelación tridimensional permite integrar todos los componentes en un único ensamblaje, lo que facilita la visualización del funcionamiento del sistema y la verificación de la correcta disposición de los elementos estructurales y mecánicos.

Finalmente, el diseño del sistema se presenta en la Figura 7, donde se observa la configuración general de la marquesina y la ubicación del rastrillo dentro del sistema de secado.

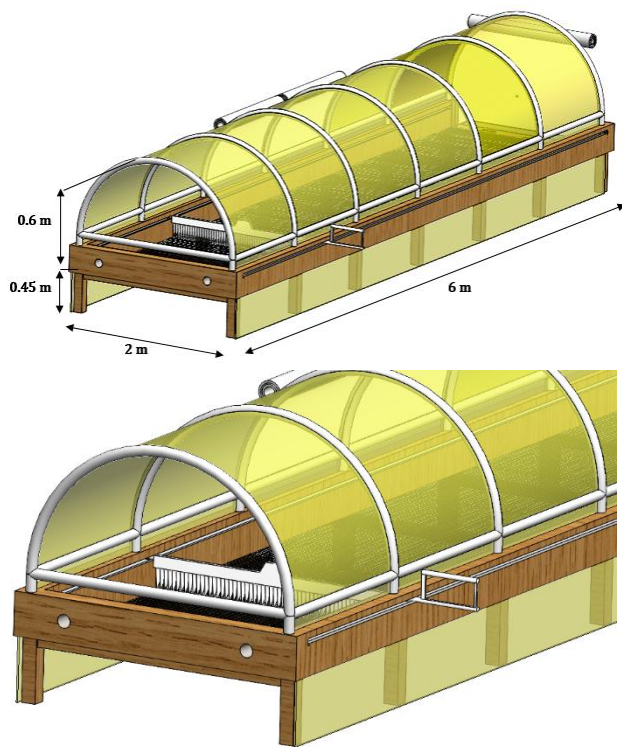


Figura 7. Diseño del prototipo de la marquesina en SolidWorks, Fuente: Elaboración propia, en el software SolidWorks.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En primer lugar, se identifica que la altura de la cubierta influye directamente en la temperatura interna de la estructura, ya que una menor altura favorece una mayor retención de calor y, en consecuencia, puede contribuir a acelerar el proceso de secado. A partir del análisis de las condiciones de operación del sistema, se establece una altura de 0,6 m como una dimensión adecuada para el diseño de la marquesina, debido a que permite

reducir las pérdidas térmicas y mantener condiciones apropiadas para el proceso de secado.

De igual manera, se propone una geometría paraboloidal para la cubierta, con el propósito de mejorar el aprovechamiento de la radiación solar y favorecer una distribución más uniforme de la energía térmica dentro de la estructura. Esta configuración busca optimizar el comportamiento térmico del sistema en comparación con configuraciones convencionales de cubierta plana.

En cuanto al diseño del rastrillo mecánico, el análisis estructural presentado en el documento permite verificar que el sistema soporta las cargas consideradas en el diseño, garantizando condiciones adecuadas de resistencia y durabilidad de los componentes. De esta forma, el mecanismo propuesto facilita el movimiento del grano durante el proceso de secado, lo que contribuye a mantener condiciones apropiadas para la calidad final del café.

### IV. CONCLUSIONES

El estudio permitió profundizar en la comprensión del comportamiento térmico de las marquesinas utilizadas para el secado del café y en la forma en que su configuración geométrica incide en la eficiencia del proceso. El análisis comparativo reflejado en la tabla 3 orientó la identificación de parámetros estructurales que favorecen un mejor aprovechamiento de la radiación solar y una distribución más uniforme del calor en el interior de la cámara de secado.

La propuesta de diseño integra criterios estructurales y funcionales que permiten un desempeño equilibrado entre eficiencia térmica, resistencia y facilidad de operación. Esta articulación entre aspectos técnicos y constructivos aporta una mirada más completa sobre la aplicación de tecnologías solares en procesos agroindustriales, contribuyendo a optimizar los recursos disponibles y a fortalecer la calidad del producto final.

En conjunto, el proyecto reafirma la posibilidad de desarrollar soluciones técnicas sencillas y adaptables que respondan a las condiciones particulares de las comunidades cafeteras, potenciando su capacidad productiva y promoviendo prácticas más sostenibles dentro del sector.

### V. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos y del proceso de diseño desarrollado, se considera pertinente continuar con la validación experimental del modelo propuesto bajo condiciones reales de operación, con el fin de contrastar el comportamiento térmico y estructural observado en la simulación.

Sería valioso explorar la incorporación de materiales con mejor desempeño térmico o propiedades ópticas que favorezcan la captación y conservación de calor, así como evaluar configuraciones que faciliten el mantenimiento y la manipulación del grano durante el secado.

De igual manera, se sugiere analizar la posibilidad de integrar sistemas sencillos de monitoreo y control ambiental que permitan registrar variables de temperatura y humedad, aportando información útil para optimizar la operación de futuras versiones de la marquesina.

Finalmente, conviene ampliar el estudio hacia otras regiones productoras de café, de modo que se puedan identificar adaptaciones constructivas y climáticas que consoliden este tipo de estructuras como una alternativa técnica viable para diferentes contextos rurales.

#### REFERENCIAS

[1] D. Sifontes, "Se mantiene estable la producción de café en Norte de Santander," La Opinión, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.laopinion.com.co/economia/se-mantiene-estable-la-produccion-de-cafe-en-norte-de-santander>.

[2] Blog CAFÉSABORA, "Proceso del café: cómo se procesa el café que llega a tu taza," 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cafesabora.com/es/proceso-del-caf%C3%A9-c%C3%B3mo-se-procesa-el-caf%C3%A9-que-llega-tu-taza>. [Consultado: 8-sep-2025].

[3] N. Castellano, "Guía para el secado de café," Perfect Daily Grind Español, 30-nov-2020. [En línea]. Disponible en: <https://perfectdailygrind.com/es/2020/11/30/guia-para-el-secado-de-cafe/>.

[4] E. Duque-Dussán y J. R. Sanz-Urbe, "Secador mixto: Integración de secado solar y mecánico para producción sostenible de café," Avances Técnicos Cenicafé, no. 572, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Chinchiná, Colombia, 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/publications/AT\\_NUEVO\\_SECADOR\\_MIXTO\\_572.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/AT_NUEVO_SECADOR_MIXTO_572.pdf).

[5] E. Figueroa Hernández, F. Pérez Soto y L. Godínez Montoya, La producción y el consumo del café. Ecatepec de Morelos, México: Ramos Escamilla, María de Jesús, 2015. [En línea]. Disponible en: [https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO\\_CAFE.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf).

[6] Q. Moseley, O. Colindres, C. Caballero, A. Serrano, J. Gallardo, I. Moreno y J. Serracín, "Procesos de secado del café y su impacto en la industria," RIDTEC, vol. 20, no. 2, pp. 65-80, jul.-dic. 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/383573362\\_Procesos\\_de\\_secado\\_del\\_cafe\\_y\\_su\\_impacto\\_en\\_la\\_industria](https://www.researchgate.net/publication/383573362_Procesos_de_secado_del_cafe_y_su_impacto_en_la_industria).

[7] J. P. Cárdenas Díaz y J. D. Pardo Pinzón, "Caracterización de las etapas de fermentación y secado del café La Primavera," tesis de pregrado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/159>.

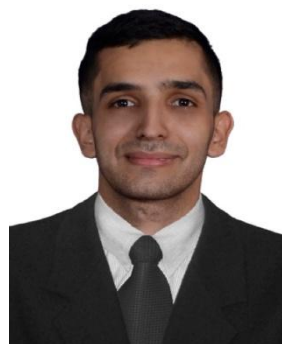
[8] A. E. Peñuela-Martínez, M. V. Restrepo-Rivera y C. A. Tibaduiza, "Secado solar de café usando diferentes tipos de cubiertas plásticas," Revista Cenicafé, vol. 73, no. 2, e73206, 2022, doi: 10.38141/10778/73206.

[9] Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, Secado del café, Cartilla Técnica no. 21. Chinchiná, Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2007. [En línea]. Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla\\_21.\\_Secado\\_d\\_el\\_cafe.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_21._Secado_d_el_cafe.pdf).

[10] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.

[11] R. Salazar-Moreno, I. L. López-Cruz y A. C. Sánchez-Cruz, "Modelo dinámico de balance de energía en un invernadero con cultivo de tomate: simulación, calibración y evaluación," Revista Chapingo Serie Horticultura, vol. 25, no. 1, pp. 45-58, 2019, doi: 10.5154/r.rchsh.2018.07.014.

[12] J. Varghese, S. Rupesh, J. Augustine, A. Nair y Prajith, "Design and analysis of a solar drier with a parabolic shaped dish type collector for drying peanut," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1132, no. 1, art. 012046, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1132/1/012046.



**Sargen Yohan Lozano Arias.** Ingeniero mecánico egresado de la Universidad Francisco de Paula Santander Seccional Ocaña. Es especialista en Docencia y Pedagogía, formación que fortalece su perfil académico y respalda su interés en contribuir a la formación de futuros profesionales en ingeniería. Cuenta con más de un año y medio de experiencia en el sector industrial, con desempeño en áreas de mantenimiento y diseño mecánico. Se desempeñó como líder de mantenimiento en la empresa Soluciones Ambientales 4R, donde participó en la optimización de procesos y en la gestión de equipos industriales. Además, posee certificación CSWA en SolidWorks, lo que le ha permitido desarrollar competencias en modelado tridimensional y simulación de componentes mecánicos.