

Diseño de una Secadora de Cacao por medio de una Chimenea Solar para el municipio de
Bucaramanga

David Esteban Leyton Vanegas

Simón Plata Otero

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Omar Andrés Ardila Sanchez

Magíster en Ingeniería Mecánica

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria.

Dedico este trabajo a Dios, por brindarme la salud, disciplina y constancia necesarias para culminar esta etapa académica; a mis padres y hermanos, por su apoyo, formación y acompañamiento a lo largo de mi proceso educativo; a mis familiares y amigos, quienes contribuyeron de manera directa o indirecta durante el desarrollo de este proyecto; y a mi director de tesis, por su orientación, seguimiento y aportes técnicos, fundamentales para el cumplimiento de los objetivos planteados y la obtención de este título profesional.

Simón Plata Otero

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por facilitar el uso del Laboratorio de Sistemas Térmicos, espacio en el cual se llevaron a cabo el almacenamiento del prototipo y la toma de datos experimentales que hicieron posible la validación del modelo desarrollado en el presente trabajo.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por brindarme la infraestructura, los recursos y los espacios necesarios para el desarrollo de este proyecto de grado, los cuales fueron fundamentales para llevar a cabo el proceso de investigación.

Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a mi director de proyecto por su orientación, acompañamiento y constante apoyo, así como por facilitar los equipos esenciales para la toma de datos, contribuyendo de manera significativa al cumplimiento de los objetivos planteados.

Simón Plata Otero

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| Introducción | 11 |
| | |
| 1. Objetivos | 13 |
| 1.1. Objetivo general..... | 13 |
| 1.2. Objetivos específicos | 13 |
| | |
| 2. Estado del arte..... | 14 |
| 2.1. Secado del cacao | 14 |
| 2.2. Tecnologías de secado solar para cacao..... | 14 |
| 2.3. Modelos de estimación de radiación solar | 15 |
| 2.4. Chimeneas solares aplicadas a ventilación y secado | 18 |
| 2.5. Modelos matemáticos de secado de alimentos | 19 |
| 2.6. Comparación con secadores de convección forzada..... | 20 |
| 2.7. Síntesis del estado del arte | 20 |
| | |
| 3. Metodología | 23 |
| 3.1. Modelado del secado de cacao..... | 24 |
| 3.1.1. Consideraciones y caracterización del cacao | 24 |
| 3.1.2. Ecuaciones gobernantes de transferencia de calor | 25 |
| 3.1.3. Relación de Lewis y coeficiente de transferencia de masa..... | 26 |
| 3.1.4. Concentración de vapor saturado..... | 27 |
| 3.1.5. Modelo simplificado de red eléctrica..... | 28 |
| 3.1.6. Ecuaciones del modelo acoplado calor-masa | 29 |
| 3.1.7. Coeficiente convectivo externo..... | 30 |
| 3.2. Modelado de la chimenea solar..... | 30 |
| 3.2.1. Descripción del sistema | 30 |
| 3.2.2. Modelo de irradiancia solar | 31 |
| 3.2.3. Balance de energía en el acristalamiento | 32 |
| 3.2.4. Balance de energía en el captador..... | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.5. Balance de energía en el aire y flujo másico..... | 33 |
| 3.3. Acoplamiento de los modelos..... | 33 |
| 3.4. Implementación en MATLAB..... | 34 |
| 3.5. Diseño del prototipo experimental..... | 35 |
| 3.5.1. Descripción del sistema físico..... | 35 |
| 3.5.2. Instrumentación y variables medidas..... | 37 |
| 4. Resultados y discusiones..... | 38 |
| 4.1. Montaje experimental..... | 38 |
| 4.1.1. Localización geográfica..... | 38 |
| 4.1.2. Prototipo experimental..... | 39 |
| 4.1.3. Condiciones de operación del experimento..... | 41 |
| 4.2. Validación experimental del modelo..... | 42 |
| 4.3. Comparación entre prototipos..... | 46 |
| 4.3.1. Comparación del desempeño operativo..... | 47 |
| 4.3.2. Comparación de la relación tiempo de secado - costo..... | 48 |
| 4.3.3. Análisis de viabilidad económica..... | 49 |
| 4.3.4. Discusión comparativa..... | 50 |
| 5. Conclusiones..... | 51 |
| Referencias bibliográficas..... | 53 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Síntesis del estado del arte | 22 |
| Tabla 2. Metodología propuesta para el cumplimiento del Objetivo General | 23 |
| Tabla 3. Propiedades termofísicas y cinéticas del grano de cacao..... | 26 |
| Tabla 4. Materiales y propiedades termo físicas y ópticas de la chimenea solar..... | 40 |
| Tabla 5. Datos tomados en el montaje experimental | 43 |
| Tabla 6. Comparación del desempeño entre referencia y el prototipo..... | 47 |
| Tabla 7. Comparación tiempo de secado–costo..... | 48 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Analogía de circuito eléctrico con evaporación en la superficie..... | 29 |
| Figura 2. Esquema de procesos de transferencia de calor en la chimenea solar..... | 31 |
| Figura 3. Diagrama de flujo del modelo de secado | 36 |
| Figura 4. Diseño CAD del prototipo de chimenea solar – cámara de secado..... | 37 |
| Figura 5. Instrumentación utilizada para la toma de datos | 38 |
| Figura 6. Localización geográfica de Bucaramanga: 7°4'44" N y 73°6'28" O..... | 39 |
| Figura 7. Prototipo de secador de cacao con chimenea solar integrada | 41 |
| Figura 8. Pérdida de masa de agua – modelo vs experimentales..... | 43 |
| Figura 9. Pérdida de contenido de humedad-modelos vs experimental | 46 |

Lista de apéndices.

| | |
|--|----|
| Apéndice A: Modelo de cielo claro (Clear-Sky Model) | 57 |
| Apéndice B: Código MATLAB de modelo de secado | 61 |
| Apéndice C: Dimensiones del prototipo de secadora de cacao con chimenea solar | 66 |

Resumen

Título: Diseño de una secadora de cacao por medio de una chimenea solar para la ciudad de Bucaramanga*

Autor: Simón Plata Otero, David Esteban Leyton Vanegas**

Palabras Clave: Chimenea, solar, secadora, cacao

Descripción: El secado del cacao es una operación unitaria crítica en la cadena de poscosecha que determina la calidad organoléptica del producto final. En el departamento de Santander, Colombia, los pequeños productores dependen mayoritariamente del secado artesanal al sol, con los riesgos de contaminación y falta de control de proceso que esto implica. El presente trabajo desarrolló, implementó y validó un modelo matemático acoplado de chimenea solar y secador de cacao como alternativa pasiva de bajo costo operativo. El modelo integra la formulación de Bansal et al. (1993) y Ong y Chow (2003) para el caudal inducido por efecto termosifón con el modelo de secado de Van der Sman (2003), implementados en MATLAB® y alimentados con datos de irradiancia solar teórica para Bucaramanga. La validación experimental mostró concordancia cualitativa satisfactoria, con una subestimación conservadora de la tasa de secado atribuida a corrientes de viento exterior no contempladas en la formulación. La comparación con el secador de convección forzada de Rubio (2022) evidenció que el prototipo solar elimina un costo energético de 648,63 COP/kg de agua evaporada, representando un ahorro de 14.529,32 COP por sesión equivalente. El sistema propuesto constituye una alternativa técnicamente viable y económicamente superior para el secado de cacao a pequeña escala en contextos rurales de Santander.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Andrés Ardila Sanchez. Magíster en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Design of a Cocoa Dryer Using a Solar Chimney for the City of Bucaramanga

Author: Simón Plata Otero, David Esteban Leyton Vanegas

Key Words: Chimney, solar, dryer, cocoa

Description: Cocoa drying is a critical post-harvest unit operation that determines the organoleptic quality of the final product. In the department of Santander, Colombia, small farmers rely mainly on traditional sun drying, with the associated risks of contamination and lack of process control. This work developed, implemented, and validated a coupled mathematical model of a solar chimney and cocoa dryer as a passive, low-operating-cost alternative. The model integrates the formulation of Bansal et al. (1993) and Ong and Chow (2003) for thermosiphon-induced airflow with the drying model of Van der Sman (2003), implemented in MATLAB® and fed with solar irradiance data from the NASA POWER database for Bucaramanga. Experimental validation showed satisfactory qualitative agreement, with a conservative underestimation of the drying rate attributed to external wind currents not accounted for in the natural convection formulation. Comparison with the forced convection dryer of Rubio (2022) showed that the solar prototype eliminates an energy cost of 648.63 COP per kilogram of evaporated water, representing a saving of 14,529.32 COP per equivalent drying session. The proposed system constitutes a technically viable and economically superior alternative for small-scale cocoa drying in rural Santander.

[°] Degree Work

^{III} Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Andrés Ardila Sanchez. Master's degree in Mechanical Engineering.

Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L.) constituye uno de los productos agrícolas de mayor relevancia socioeconómica para Colombia, con una producción récord de más de 73.000 toneladas registradas en 2024 (Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao], 2025). Dentro de la cadena de valor del cacao, el proceso de secado posfermentación representa una etapa crítica: los granos deben reducir su contenido de humedad desde aproximadamente 55% en base húmeda (BH), valor típico tras la fermentación, hasta el rango de 6 a 8% BH exigido por los estándares comerciales internacionales, con el fin de garantizar la estabilidad microbiológica, preservar los compuestos precursores del sabor y aroma, y cumplir los requisitos de exportación (Afoakwa, 2010; Jinap et al., 1994).

La práctica más extendida entre los pequeños y medianos productores de la región de Bucaramanga, Santander, consiste en el secado solar directo mediante exposición al sol sobre superficies planas o en salones de secado rústicos. Aunque este método es de bajo costo, presenta limitaciones técnicas significativas: falta de control sobre las variables de proceso (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire), exposición del grano a contaminantes externos (polvo, insectos, roedores), y dependencia de las condiciones meteorológicas variables de la región. Como alternativa viable, la chimenea solar, el cual es un sistema de ventilación natural pasiva que aprovecha la radiación solar para inducir flujos de aire caliente, ha mostrado potencial para el secado controlado de productos agrícolas a bajo costo y con impacto ambiental mínimo (Bansal, 1993; Bohórquez Peña et al., 2021).

No obstante, la aplicación de chimeneas solares al secado de cacao en condiciones climáticas específicas de Bucaramanga no ha sido estudiada de manera sistemática mediante el acoplamiento de modelos matemáticos rigurosos de transferencia de calor y masa con modelos

termodinámicos de chimenea solar. La ausencia de esta integración constituye una brecha de conocimiento que el presente trabajo busca abordar.

Desde el punto de vista técnico, el modelado matemático del proceso de secado permite predecir la evolución temporal del contenido de humedad del grano y las temperaturas internas y superficiales sin necesidad de ensayos exhaustivos, reduciendo costos y tiempo de desarrollo. En lo económico, una chimenea solar de bajo costo, es decir construida con materiales locales accesibles, puede representar una alternativa competitiva frente a secadores eléctricos o a gas, cuyo costo operativo los hace inaccesibles para la mayoría de los cacaoteros rurales. Ambientalmente, el aprovechamiento de energía solar elimina el consumo de combustibles fósiles y las emisiones asociadas, en consonancia con las políticas de producción agrícola sostenible promovidas por el Estado Colombiano.

La pregunta central que orienta esta investigación es: ¿Es viable el secado de granos de cacao mediante una chimenea solar bajo las condiciones climáticas de Bucaramanga, Santander?

El alcance del presente estudio comprende: (I) la implementación de un modelo matemático acoplado chimenea solar-cámara de secado en MATLAB®, basado en balances de energía y masa; (II) la construcción de un prototipo a escala del sistema; (III) la validación experimental del modelo mediante comparación con datos medidos en el prototipo; y (IV) la comparación de la relación tiempo de secado-energía y tiempo de secado-costo frente al secador rectangular de convección forzada reportado por Rubio (2022).

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología que permita determinar la viabilidad del secado de cacao por medio de una chimenea solar para el municipio de Bucaramanga, Santander, mediante un modelo matemático y validación por prototipo a escala.

1.2. Objetivos específicos

Desarrollar un modelo matemático que permita determinar la tasa de transferencia de calor, el flujo de aire y la temperatura al interior del sistema chimenea solar-cámara de secado, implementando modelos termodinámicos y de transferencia de calor.

Validar el modelo mediante la construcción de un prototipo a escala.

Comparar la relación tiempo de secado-unidad de energía y tiempo de secado-costo entre el modelo desarrollado y el secador rectangular para el secado de cacao por convección forzada (Rubio, 2022).

2. Estado del arte

2.1. Secado del cacao

El secado del cacao es la operación unitaria que sigue a la fermentación y tiene como objetivo reducir el contenido de humedad del grano desde valores típicos de 50 a 60% BH hasta el rango de 6 a 8% BH requerido para el almacenamiento y la comercialización segura (Afoakwa, 2010). Durante este proceso continúan reacciones bioquímicas que determinan el perfil de sabor y aroma del chocolate, por lo que las condiciones de secado (especialmente la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del flujo) inciden directamente en la calidad organoléptica del producto final (Jinap et al., 1994).

En la región de Bucaramanga y el departamento de Santander, la producción cacaotera se concentra en pequeños agricultores con acceso limitado a infraestructura tecnificada de secado. Las prácticas convencionales de secado al sol sobre superficies de madera o cemento, si bien generalizadas, presentan desventajas en términos de control de proceso y riesgo de contaminación (Bohórquez Peña et al., 2021). La cinética de secado del cacao ha sido caracterizada experimentalmente en diversas condiciones: Bohórquez Peña et al. (2021) reportaron valores de difusividad efectiva entre $1,05 \times 10^{-11}$ y $3,17 \times 10^{-11}$ m²/s para temperaturas controladas entre 30 y 60 °C, con una energía de activación de 30,19 kJ/mol.

2.2. Tecnologías de secado solar para cacao

Los secadores solares representan una alternativa ampliamente estudiada para el procesamiento poscosecha del cacao en regiones tropicales. Bonaparte et al. (1998) evaluaron cuatro configuraciones de secadores solares en Santa Lucía: un secador solar indirecto (ISD) acoplado a un colector de placa plana, un secador solar directo (DSD), y dos variantes de secado al sol sobre superficies de acero perforado y madera no perforada. Con capacidades de carga de

13,7 y 40,4 kg/m², los secadores lograron aumentos de temperatura de 15 a 20 °C sobre la temperatura ambiente, siendo más eficientes a menor densidad de carga. Los autores concluyen que los secadores de placa plana constituyen una solución técnica viable, aunque su costo inicial limita su adopción por pequeños productores.

Amin y Sarmidi (2008) diseñaron y evaluaron un secador de túnel solar de 500 kg de capacidad (granos húmedos) en Indonesia, bajo condiciones de estación húmeda con irradiancia media de 340 W/m². La eficiencia térmica del sistema fue del 31%, con una temperatura máxima interior de 58,2 °C y una temperatura media de secado de 38,6 ± 3,4 °C, dentro del rango aceptable para preservar la calidad del grano. La investigación demostró que los secadores de túnel solar pueden operar durante la temporada lluviosa con resultados satisfactorios.

Komolafe et al. (2021) realizaron un análisis termodinámico de un secador solar de convección forzada integrado con material de almacenamiento térmico sensible (ladrillo refractario) para cacao. Los autores reportaron eficiencias exergéticas entre 1,52 y 65,81% durante el primer día de experimentación, con un caudal másico medio de 0,032 kg/s y una irradiancia solar que varió entre 49,6 y 759,6 W/m². Dharma et al. (2024) abordaron la reducción del consumo energético en secadores de bandeja mediante simulación CFD, validada experimentalmente con 8 kg de cacao fermentado, mostrando que la redistribución del flujo de aire interior mejora la homogeneidad del secado.

2.3. Modelos de estimación de radiación solar

La estimación de la radiación solar disponible sobre una superficie constituye un insumo fundamental para el diseño y la simulación de sistemas solares térmicos pasivos, incluyendo chimeneas solares y secadores. Los modelos de estimación pueden clasificarse en tres grandes

categorías: empíricos, estocásticos y de transferencia radiativa, cada uno con distintos requerimientos de datos de entrada y alcances de aplicabilidad.

Los modelos empíricos de base estadística fueron los primeros en desarrollarse ampliamente para estimar la irradiancia global horizontal (GHI) a partir de variables meteorológicas accesibles. El modelo de Ångström-Prescott, en su forma modificada por Glover y McCulloch (1958), expresa la fracción de irradiancia global respecto a la irradiancia extraterrestre como función lineal de la fracción de horas de sol. Este modelo sigue siendo ampliamente utilizado por su simplicidad y su bajo requerimiento de datos, aunque su precisión depende críticamente de la calibración local de los coeficientes de regresión.

Trabajos posteriores como los de Hargreaves y Samani (1982) propusieron correlaciones que sustituyen la insolación por la diferencia entre temperaturas máxima y mínima del aire como variable predictora, lo que amplía su aplicabilidad a zonas con registros pluviométricos pero sin heliógrafo.

Para regiones de alta variabilidad climática como Colombia, donde la cobertura nubosa y la precipitación presentan marcadas diferencias altitudinales e interanuales, los modelos empíricos requieren recalibración local. García Quesada et al. (2014) y estudios del IDEAM han documentado la variabilidad espacial de la irradiancia solar en el territorio colombiano, identificando que el departamento de Santander presenta valores de GHI anuales entre 3,5 y 5,5 kWh/m²·día, con máximos en las zonas de menor altitud y cobertura nubosa de la provincia de García Rovira y valles del río Chicamocha. Esta heterogeneidad espacial justifica el uso de bases de datos satelitales de alta resolución para proyectos de ingeniería localizada.

Los modelos de descomposición permiten estimar las componentes directa (DNI) y difusa (DHI) a partir de la GHI medida o estimada. El modelo de Erbs et al. (1982) introduce una

correlación entre el índice de claridad k_t y la fracción difusa k_d , válida para escalas horaria y diaria. Posteriormente, Perez et al. (1990) desarrollaron modelos de cielo anisotrópico que mejoran significativamente la estimación de la irradiancia difusa sobre superficies inclinadas al distinguir las contribuciones circumsolar, del horizonte brillante y del domo isotrópico. Estos modelos son relevantes para el cálculo de la irradiancia incidente sobre el colector de una chimenea solar con inclinación variable respecto a la horizontal.

En el contexto de la simulación de sistemas solares con resolución horaria, las bases de datos meteorológicas derivadas de satélite han ganado protagonismo frente a las series de estaciones terrestres. El proyecto NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources) proporciona datos horarios de GHI, DNI, DHI y temperatura del aire con resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, accesibles vía API REST para cualquier ubicación del planeta. Su uso está validado para estudios de energía solar en América Latina (White et al., 2017), con errores medios absolutos inferiores al 15% respecto a estaciones de referencia en la mayoría de las regiones tropicales.

De manera complementaria, la base de datos PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) de la Comisión Europea ofrece series típicas meteorológicas (TMY) con resolución horaria a partir de datos del satélite SARAH-2 y ERA5, siendo especialmente precisa en latitudes entre -60° y 60° . Los modelos de red neuronal artificial (ANN) y de aprendizaje automático han emergido recientemente como alternativas de alta precisión para la predicción de irradiancia solar. Voyant et al. (2017) realizaron una revisión exhaustiva de métodos de machine learning aplicados a la predicción de radiación solar, concluyendo que los modelos híbridos que combinan ANN con series de tiempo (ARIMA, LSTM) superan en precisión a los modelos puramente estadísticos para horizontes de predicción de 1 a 24 horas. No obstante, su

implementación requiere grandes volúmenes de datos históricos de alta calidad, lo que restringe su uso en zonas con escasa instrumentación como las áreas rurales cacaoteras de Santander.

Para la integración de la estimación de radiación solar con el modelo de chimenea solar, la aproximación más frecuente en la literatura consiste en usar una función analítica de la irradiancia horaria en función del ángulo horario, la declinación solar y la latitud del lugar, corregida por un factor de nubosidad derivado de datos históricos locales. Este enfoque, basado en el modelo de cielo despejado (*clear-sky model*) de Gueymard y Thevenard (2009), combinado con los datos del NASA POWER para Bucaramanga, es el adoptado en el presente trabajo para alimentar el modelo matemático acoplado chimenea solar–secador de cacao con una curva de irradiancia representativa de un día típico de la región.

2.4. Chimeneas solares aplicadas a ventilación y secado

La chimenea solar es un dispositivo de ventilación natural pasiva cuyo principio de funcionamiento se basa en el efecto termosifón: la radiación solar calienta el aire contenido en un canal inclinado o vertical, reduciendo su densidad y generando un flujo ascendente que induce la renovación de aire del recinto conectado. Bansal et al. (1993) desarrollaron el primer modelo matemático en estado estable de chimeneas solares para ventilación natural, considerando balances de energía en el acristalamiento, el captador y el fluido de trabajo. Su estudio demostró que una chimenea solar con captador de 2,25 m² puede generar caudales de 140 a 330 m³/h bajo irradiancia de 200 a 1000 W/m². Ong y Chow (2003) refinaron el modelo introduciendo el coeficiente de aproximación de temperatura media $\gamma = 0,74$ para el cálculo de la temperatura del aire dentro del canal. Ardila (2022) extendió estos desarrollos a condiciones de ventilación natural en Bucaramanga, validando el modelo con datos experimentales locales.

Bohórquez Peña et al. (2021) incorporaron el principio de chimenea solar al diseño de un secador para cacao, mostrando mediante simulación CFD que la adición de un ducto central de efecto chimenea para la extracción del aire húmedo, junto con una modificación de la inclinación del colector, mejora significativamente la homogeneidad del flujo al interior de la cámara de secado. Este antecedente valida la pertinencia técnica del enfoque adoptado en el presente trabajo.

2.5. Modelos matemáticos de secado de alimentos

El modelado matemático del secado de alimentos sólidos de geometría regular ha evolucionado desde formulaciones analíticas unidimensionales basadas en la ecuación de Fourier hasta métodos numéricos de volúmenes finitos (FVM, por sus siglas en inglés) y elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés). Van der Sman (2003) propuso un modelo simplificado basado en la analogía de circuitos eléctricos, derivado del análisis de resultados del método de volúmenes finitos (CFD) para alimentos cilíndricos y esféricos de alta humedad con evaporación superficial. El modelo representa el grano de alimento mediante una capacidad calorífica total C_{tot} , una resistencia interna R_{int} y una resistencia externa R_{ext} , con una fuente de calor por evaporación P_{evap} insertada entre ambas resistencias. Su validación mostró errores inferiores al 5% respecto al modelo de volúmenes finitos para números de Biot $Bi > 0,1$ y números de Fourier $Fo_1 > 0,3$.

Este modelo ha sido aplicado y extendido por diversos autores en el contexto del secado de granos. Su eficiencia computacional, basado en la reducción del problema a una ODE acoplada con una ecuación algebraica no lineal para la temperatura superficial, lo hace especialmente adecuado para la integración con modelos de chimenea solar en entornos de simulación como MATLAB®, tal como se implementa en el presente trabajo.

2.6. Comparación con secadores de convección forzada

Rubio (2022) modeló un secador rectangular de convección forzada para el secado de cacao en Ecuador, caracterizando las relaciones tiempo de secado–consumo energético y tiempo de secado–costo operativo. Sus resultados constituyen la referencia de comparación del objetivo específico 3 del presente trabajo. Los secadores de convección forzada, que incluyen variantes de bandeja con flujo paralelo, tipo túnel, con bomba de calor y rotativos, ofrecen mayor control de las variables de proceso que los sistemas pasivos, pero incurren en costos energéticos significativos que limitan su viabilidad en contextos rurales.

La comparación económica y energética entre chimeneas solares y secadores de convección forzada es, por tanto, un indicador clave de viabilidad para orientar decisiones de inversión en poscosecha cacaotera de pequeña escala en Colombia.

2.7. Síntesis del estado del arte

La revisión de la literatura permite identificar un conjunto consolidado de desarrollos teóricos, experimentales y computacionales sobre los cuales se fundamenta el presente trabajo. En el ámbito del secado de cacao, existe amplio consenso respecto a los parámetros de calidad que deben preservarse durante el proceso (humedad final de 6 a 8% BH y temperatura del aire inferior a 60 °C) así como sobre la cinética de secado en condiciones controladas para la región de Santander (Bohórquez Peña et al., 2021). En cuanto a las tecnologías solares, los secadores de placa plana y de túnel han sido ampliamente evaluados en campo, aunque su viabilidad económica en pequeña escala continúa siendo limitada (Bonaparte et al., 1998; Amin y Sarmidi, 2008).

El modelado matemático de chimeneas solares cuenta con fundamentos sólidos a partir de los trabajos de Bansal et al. (1993) y Ong y Chow (2003), validados localmente por Ardila et al. (2023) para las condiciones climáticas de Bucaramanga. Complementariamente, el modelo de

secado de Van der Sman (2003) ofrece una formulación computacionalmente eficiente, basada en la analogía de circuitos eléctricos, que permite su integración directa con el modelo de chimenea solar en entornos de simulación como MATLAB®. En lo referente a la estimación de la radiación solar, la base de datos satelital NASA POWER provee los insumos necesarios para caracterizar la irradiancia disponible sobre el colector inclinado de la chimenea en condiciones típicas de la región, mediante el modelo de cielo despejado (*clear-sky model*) de Gueymard y Thevenard (2009), que permite estimar las componentes directa y difusa de la irradiancia horaria a partir de parámetros geométricos y atmosféricos locales.

Desde la perspectiva económica y energética, Rubio (2022) documenta que los secadores de convección forzada, aunque ofrecen mayor control sobre las variables de proceso, presentan costos operativos que limitan su adopción en contextos rurales de pequeña escala. Esta brecha constituye la motivación central del presente trabajo: un sistema pasivo basado en chimenea solar elimina el consumo de energía eléctrica en la inducción del flujo de aire, reduciendo los costos de operación y mantenimiento sin sacrificar el control térmico necesario para preservar la calidad del grano. El análisis termodinámico de Komolafe et al. (2021) aporta, además, el marco metodológico para cuantificar las irreversibilidades del sistema y evaluar su eficiencia exergética como indicador de desempeño complementario al energético.

La Tabla 1 presenta una síntesis de las referencias revisadas, organizada por temática, metodología, condiciones de análisis, resultados principales y su contribución específica a los objetivos del presente trabajo. Esta articulación evidencia que, si bien cada componente del sistema propuesto (chimenea solar, modelo de secado y estimación de radiación) ha sido estudiado de forma independiente, su integración en un modelo acoplado orientado al secado de cacao bajo las

condiciones climáticas de Bucaramanga constituye un aporte original no reportado en la literatura consultada.

Tabla 1.

Síntesis del estado del arte

| Referencia | Temática | Metodología | Resultados principales |
|--|---|---|--|
| Afoakwa (2010); Lutheran World Relief (2013) | Secado de cacao – fundamentos | Revisión bibliográfica | Establecen criterios de humedad objetivo y la importancia del control de temperatura en la calidad organoléptica |
| Jinap et al. (1994) | Secado de cacao – calidad | Experimental | Las condiciones de secado afectan directamente el perfil de sabor y aroma del chocolate |
| Bohórquez Peña et al. (2021) | Cinética de secado en Santander / Chimenea solar en secador | Experimental + CFD | Caracterizaron la cinética de secado local; la chimenea solar mejora la homogeneidad del flujo interior |
| Bonaparte et al. (1998) | Secadores solares para cacao | Experimental comparativo | Secadores de placa plana son técnicamente viables pero con alto costo inicial |
| Amin y Sarmidi (2008) | Secador de túnel solar para cacao | Diseño y evaluación experimental | El secador de túnel opera satisfactoriamente en estación lluviosa con temperatura media de $38,6 \pm 3,4$ °C |
| Komolafe et al. (2021) | Análisis termodinámico de secador solar con almacenamiento térmico (ladrillo refractario) | Termodinámica 1.er y 2.º principio | Cuantifican irreversibilidades y eficiencia exérgica del sistema de secado solar |
| Dharma et al. (2024) | Secador de bandeja para cacao – optimización CFD | Simulación CFD + validación experimental (8 kg) | La redistribución mejora la homogeneidad del secado y reduce el consumo energético |
| Bansal et al. (1993) | Chimenea solar – modelo matemático fundacional | Modelado analítico en estado estable | Caudales de 140–330 m ³ /h; primer modelo matemático de chimenea solar de referencia internacional |
| Ong y Chow (2003) | Chimenea solar – modelo refinado | Modelado analítico | Mayor precisión en la estimación del caudal inducido por efecto termosifón |
| Ardila et al. (2022) | Chimenea solar en Bucaramanga | Modelado + validación experimental local | Validación del modelo de Bansal-Ong con datos experimentales de la región |
| Van der Sman (2003) | Modelo matemático de secado de alimentos (geometría cilíndrica) | Analogía de circuitos eléctricos (reducción de FVM a ODE) | Modelo ODE eficiente computacionalmente para geometrías cilíndricas con evaporación superficial |
| Rubio (2022) | Secador de convección forzada para cacao (Ecuador) | Modelado matemático | Caracteriza el desempeño energético y económico del secado por convección forzada |
| Erbs et al. (1982); Perez et al. (1990) | Modelos de descomposición de irradiancia solar | Empírico / anisotrópico | Permiten estimar la irradiancia directa y difusa sobre superficies inclinadas a partir de GHI |
| NASA POWER; PVGIS (Comisión Europea) | Bases de datos satelitales de irradiancia solar | Datos satelitales + reanálisis (SARAH-2, ERA5) | Datos horarios de GHI, DNI, DHI y temperatura validados para América Latina (White et al., 2017) |

| Referencia | Temática | Metodología | Resultados principales |
|-------------------------|---|---|---|
| Duffie y Beckman (2013) | Estimación analítica de irradiancia horaria | Modelo geométrico-analítico + factor de nubosidad histórico | Curvas de irradiancia horaria representativas para días típicos de diseño |

Nota. CFD = Dinámica de Fluidos Computacional; FVM = Método de Volúmenes Finitos; GHI = Irradiancia Global Horizontal; DNI = Irradiancia Normal Directa; DHI = Irradiancia Difusa Horizontal; BH = Base Húmeda; ANN = Red Neuronal Artificial; TMY = Año Meteorológico Típico.

3. Metodología

La metodología adoptada en el presente trabajo se estructura en cinco fases: (I) caracterización del cacao y recolección de datos climáticos, (II) modelado matemático del sistema chimenea solar–cámara de secado, (III) implementación computacional en MATLAB®, (IV) diseño y construcción del prototipo experimental y (V) validación experimental mediante el prototipo construido, seguida de una comparación energética y económica con un sistema de referencia. El enfoque general es de tipo cuantitativo-experimental y responde directamente al Objetivo General del presente trabajo. La Tabla 2 presenta la metodología propuesta.

Tabla 2.

Metodología propuesta para el cumplimiento del Objetivo General

| Fase | Denominación | Descripción | Herramientas / Fuentes | OE |
|------|--|---|--|----------|
| I | Caracterización del cacao y datos climáticos | Recopilación de propiedades termofísicas y cinéticas del grano. Obtención de series horarias de irradiancia, temperatura y HR para Bucaramanga. | NASA POWER; Bohórquez Peña et al. (2021); Bart-Plange et al. (2012); Duffie y Beckman (2013) | OE1 |
| II | Modelado matemático del sistema acoplado | Formulación del modelo de chimenea solar (efecto termosifón) acoplado al modelo de secado por analogía de circuitos eléctricos. Geometrías esfera y cilindro equivalentes. | Bansal et al. (1993); Ong y Chow (2003); Van der Sman (2003) | OE1 |
| III | Implementación computacional en MATLAB® | Codificación del modelo acoplado ($\Delta t = 30$ s). Integración de la irradiancia horaria como entrada dinámica. Generación de curvas de pérdida de masa y contenido de humedad. | MATLAB® R2024; NASA POWER API | OE1, OE2 |

| Fase | Denominación | Descripción | Herramientas / Fuentes | OE |
|------|--|---|---|----------|
| IV | Diseño y construcción del prototipo | Diseño geométrico del colector y la cámara de secado. Construcción del prototipo a escala en el Laboratorio de Sistemas Térmicos de la UIS. | Bansal et al. (1993); Ong y Chow (2003); Ardila et al. (2022) | OE1 |
| V | Validación experimental y comparación energética y económica | Ensayo del 12 de marzo de 2026 (10:10–14:10 h, 49 puntos cada 5 min). Comparación modelo–experimento y cuantificación del error. Evaluación de indicadores normalizados (kWh/kg agua; COP/kg agua) frente al secador de convección forzada de Rubio (2022). | Piranómetro; balanza de precisión; Laboratorio UIS; Rubio (2022); Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. (2026) | OE2, OE3 |

Nota. OE = Objetivo Específico. OE1: desarrollo del modelo acoplado; OE2: implementación y validación experimental; OE3: comparación energética y económica con sistema de referencia. HR = humedad relativa. UIS = Universidad Industrial de Santander.

3.1. Modelado del secado de cacao

3.1.1. Consideraciones y caracterización del cacao

El sistema bajo estudio consiste en un lote de granos de cacao fermentado expuesto a una corriente de aire convectiva generada por la chimenea solar. Los supuestos fundamentales adoptados, siguiendo la formulación de van der Sman (2003), son los siguientes:

- El transporte de calor al interior del grano es únicamente por conducción (ecuación de Fourier).
- El transporte de masa ocurre solo en la superficie del grano; en alimentos de alta humedad no existen gradientes internos de actividad de agua.
- Las propiedades térmicas del grano son independientes de la temperatura.
- La contribución de la radiación sobre el grano es despreciable; el calentamiento ocurre exclusivamente por convección del aire.
- El grano se aproxima mediante dos geometrías canónicas: esfera de radio $R = 10$ mm y cilindro de radio $R = 8$ mm y longitud $L = 16$ mm, representativos del cacao fermentado (Afoakwa et al., 2008).

El grano de cacao fermentado presenta una composición higroscópica y unas propiedades termofísicas que condicionan directamente el diseño y la modelación del proceso de secado. Tras la fermentación, el grano alcanza contenidos de humedad en base húmeda que deben reducirse hasta el rango de 6–8% BH para garantizar la estabilidad microbiológica y la preservación de los compuestos precursores del sabor y aroma durante el almacenamiento (Afoakwa, 2010; Jinap et al., 1994). La temperatura de secado recomendada no debe exceder los 60 °C, dado que valores superiores pueden degradar dichos precursores y comprometer la calidad organoléptica del producto final (Bohórquez Peña y Garzón, 2021). En cuanto a su geometría, el grano puede aproximarse a formas canónicas regulares como esferas o cilindros lo que permite aplicar directamente las correlaciones de transferencia de calor y masa disponibles en la literatura para sólidos de geometría simple (Afoakwa et al., 2008). Las características termofísicas y geométricas de la semilla de cacao utilizadas en el presente trabajo se muestran en la Tabla 3.

3.1.2. Ecuaciones gobernantes de transferencia de calor

La conducción de calor en el interior del grano está descrita por la ecuación de Fourier:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (1)$$

donde ρ [kg/m³] es la densidad del grano, c_p [J kg⁻¹ K⁻¹] su calor específico, T [K] la temperatura y k [W m⁻¹ K⁻¹] la conductividad térmica. La condición de frontera en la superficie del grano incorpora la convección y la evaporación:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h_{ext} (T_{surf} - T_{\infty}) + r_{evap} k_{tot} [c_{sat}(T_{surf}) - c_{\infty}] \quad (2)$$

donde h_{ext} [W/m² K] es el coeficiente convectivo externo, T_{∞} [K] la temperatura del aire, r_{evap} [J/kg] el calor de vaporización del agua, k_{tot} [m/s] el coeficiente total de transferencia de

masa, $c_{sat}(T_{surf})$ [kg/m³] la concentración de vapor saturado en la superficie y c_{∞} [kg/m³] la concentración de vapor en el seno del aire.

3.1.3. Relación de Lewis y coeficiente de transferencia de masa

En la capa límite de aire, los coeficientes de transferencia de calor y de masa se relacionan mediante la relación de Lewis (van der Sman, 2003):

$$\frac{h_{ext}}{k_{ext}} = \rho_a c_{p,a} Le^{2/3} \quad (3)$$

con el número de Lewis definido como $Le = k_a / (\rho_a c_{p,a} D_w)$, donde D_w [m²/s] es la difusividad del vapor de agua en aire. Para las condiciones ambientales de Bucaramanga, $Le \approx 0,86$, valor suficientemente próximo a la unidad para que la aproximación $Le \sim 1$ implícita en la Ecuación 3 sea válida.

Tabla 3.

Propiedades termofísicas y cinéticas del grano de cacao

| Propiedad | Símbolo | Valor | Unidades | Condición / Observación | Fuente |
|-------------------------------------|----------|-----------------------|-------------------|---|--|
| Humedad inicial (post-fermentación) | X^0 | 55 – 60 | % BH | Condición inicial para el modelo de secado | Afoakwa (2010); Lutheran World Relief (2013) |
| Humedad final (comercialización) | X_f | 6 – 8 | % BH | Requisito mínimo para almacenamiento seguro | Afoakwa (2010) |
| Diámetro equivalente de la semilla | d_p | 1,8 | cm | Geometría cilíndrica equivalente asumida | Bohórquez Peña et al. (2021) |
| Densidad aparente del grano húmedo | ρ | 1100 | kg/m ³ | Grano fermentado | Bart-Plange et al. (2012) |
| Calor específico | c_p | 3500 | J/(kg·K) | Valor medio en rango de secado 30–60 °C | Afoakwa (2010); Bart-Plange et al. (2012) |
| Conductividad térmica | k | 0,30 | W/(m·K) | Grano fermentado; dirección radial | Bart-Plange et al. (2012) |
| Difusividad térmica (calculada) | α | $7,79 \times 10^{-8}$ | m ² /s | $\alpha = k / (\rho \cdot c_p)$; calculada | Elaboración propia |

| Propiedad | Símbolo | Valor | Unidades | Condición / Observación | Fuente |
|---|------------|---|----------|--|--|
| Difusividad efectiva de humedad | D_e | $1,05 \times 10^{-11}$ – $3,17 \times 10^{-11}$ | m^2/s | Rango para $T = 30-60$ °C; modelo de Fick | Bohórquez Peña et al. (2021) |
| Energía de activación (Arrhenius) | E_a | 30,19 | kJ/mol | Estimada por regresión de D_e vs. $1/T$ | Bohórquez Peña et al. (2021) |
| Temperatura de secado (rango operativo) | T_s | 30 – 60 | °C | Límite superior para preservar calidad organoléptica | Jinap et al. (1994); Bohórquez Peña et al. (2021) |
| Porosidad del lecho de granos | ϵ | 0,38 – 0,42 | — | Lecho fijo de granos cilíndricos empacados | Bart-Plange et al. (2012) |
| Calor latente de vaporización del agua | L_v | 2257 | kJ/kg | A 100 °C; término P_{evap} del modelo de secado | Van der Sman (2003) |

Nota. BH = base húmeda. Los valores de calor específico, conductividad térmica y densidad corresponden al grano fermentado en el rango de temperatura de secado. La difusividad térmica se calculó a partir de las propiedades anteriores mediante la relación $\alpha = k / (\rho \cdot cp)$. La porosidad del lecho fue tomada de Bart-Plange, A., Addo, A., & Kumi, F. (2012). Physical properties of Category B cocoa beans. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*, 7(2), 87–94.

3.1.4. Concentración de vapor saturado

La concentración de vapor saturado en la superficie se calcula mediante la ley del gas ideal combinada con la ecuación de Clausius-Clapeyron (van der Sman, 2003):

$$c_{sat}(T) = \frac{p_{sat}(T)M_w}{R_{gas}T} \quad (4)$$

$$p_{sat}(T) = p_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_w}{R_{gas}T}\right) \quad (5)$$

donde $M_w = 0,018015$ kg/mol es la masa molar del agua, $R_{gas} = 8,314$ J mol⁻¹ K⁻¹ la constante universal de los gases, $\Delta H_w = r_{evap}M_w$ [J/mol] el calor de vaporización molar, y p_0 una constante determinada por la condición de referencia $p_{ref} = 101.325$ Pa a $T_{ref} = 373,15$ K.

3.1.5. Modelo simplificado de red eléctrica

A partir del análisis del método de volúmenes finitos, van der Sman (2003) observó que la temperatura volumétrica promedio del alimento T_{avg} coincide, después de un transitorio inicial, con la temperatura en una posición radial fija r_0 . Esta observación permite definir la distancia característica $d_c = R - r_0$, con la cual se establece el coeficiente interno de transferencia de calor:

$$h_{int} = \frac{k}{d_c} \quad (6)$$

Los valores de d_c según la geometría son: $d_c = R/4$ para esfera y $d_c = R/3$ para cilindro.

Las resistencias térmica interna y externa del grano se definen como:

$$R_{int} = \frac{1}{h_{int}A_{ext}} \quad (7)$$

$$R_{ext} = \frac{1}{h_{ext}A_{ext}} \quad (8)$$

donde A_{ext} [m²] es el área superficial externa del grano. La capacidad calorífica total es:

$$C_{tot} = \rho c_p V_{tot} \quad (9)$$

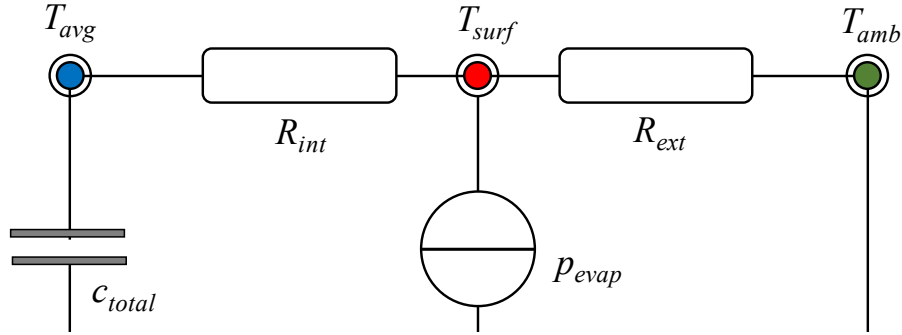
El número de Biot redefinido que verifica la validez del modelo simplificado es:

$$Bi = \frac{R_{ext}}{R_{int}} \quad (10)$$

El modelo es válido para $Bi > 0,1$ y $Fo > 0,3$, en donde $Fo = kt/(\rho c_p R^2)$ es el número de Fourier. Para los granos de cacao bajo las condiciones de Bucaramanga, $Bi \approx 7,4$ (esfera) y $Bi \approx 7,9$ (cilindro), confirmando la aplicabilidad del modelo de una sola capacidad.

Figura 1.

Analogía de circuito eléctrico con evaporación en la superficie



3.1.6. Ecuaciones del modelo acoplado calor-masa

Aplicando las leyes de Kirchoff a la red eléctrica análoga mostrada en la Figura 1 se obtiene la ecuación diferencial ordinaria para la temperatura promedio del grano:

$$C_{\text{tot}} \frac{dT_{\text{avg}}}{dt} = -\frac{T_{\text{avg}} - T_{\text{surf}}}{R_{\text{int}}} \quad (10)$$

La temperatura superficial T_{surf} se determina resolviendo iterativamente la Ecuación 11:

$$\frac{T_{\text{avg}} - T_{\text{surf}}}{R_{\text{int}}} = P_{\text{evap}} + \frac{T_{\text{surf}} - T_{\infty}}{R_{\text{ext}}} \quad (11)$$

donde la potencia calorífica de evaporación es:

$$P_{\text{evap}} = r_{\text{evap}} k_{\text{ext}} A_{\text{ext}} [a_w c_{\text{sat}}(T_{\text{surf}}) - c_{\infty}] \quad (12)$$

En la Ecuación 12, a_w representa la actividad de agua superficial, que modela la transición entre la etapa de tasa constante ($a_w = 1$, $X > X_{eq}$) y la etapa de tasa decreciente ($a_w < 1$, $X \leq X_{eq}$). La humedad de equilibrio X_{eq} se estima mediante un modelo tipo Oswin para cacao:

$$X_{eq} = \frac{0.05 \varphi}{1 - \varphi + 0.05} \quad (13)$$

donde φ es la humedad relativa del aire de secado. El balance de masa del agua en el grano se expresa como:

$$\frac{dX}{dt} = - \frac{J_{evap}}{m_{ss,g}} \quad (14)$$

siendo $J_{evap} = k_{ext} A_{ext} [a_w c_{sat}(T_{surf}) - c_{\infty}]$ [kg/s] el flujo másico de evaporación por grano y $m_{ss,g} = \rho V_{tot} / (1 + X)$ [kg] la masa de sólido seco de un grano individual.

3.1.7. Coeficiente convectivo externo

El coeficiente h_{ext} se obtiene mediante correlaciones de Nusselt específicas para cada geometría. Para la esfera se aplica la correlación de Ranz-Marshall (1952):

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (15)$$

Para el cilindro se utiliza la correlación de Churchill-Bernstein (1977):

$$Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3} \quad (16)$$

En ambos casos,

$$h_{ext} = \frac{Nu k_a}{L_c} \quad (17)$$

donde L_c es el diámetro equivalente del grano (tanto para la esfera como para el cilindro) y $Re = \rho_a v L_c / \mu_a$ a el número de Reynolds basado en la velocidad del aire de secado v .

3.2. Modelado de la chimenea solar

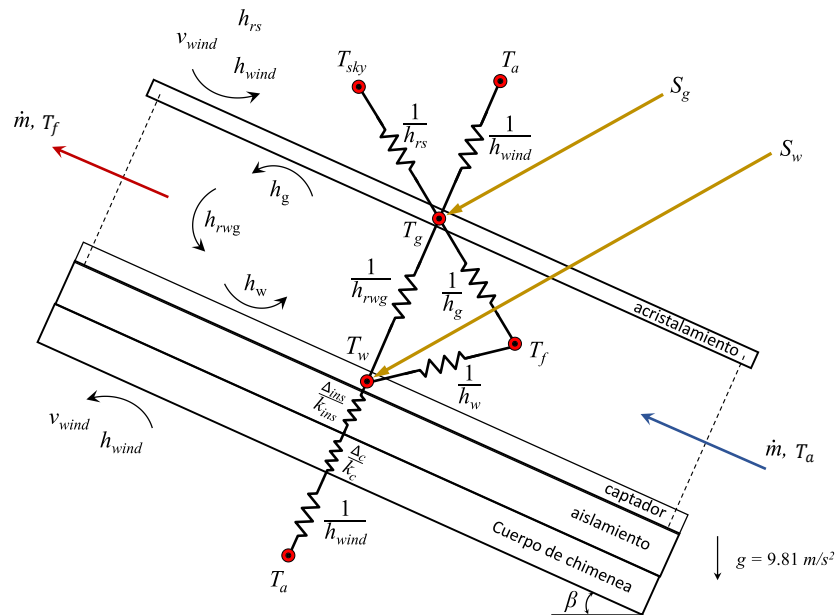
3.2.1. Descripción del sistema

La chimenea solar está constituida por un canal inclinado de geometría rectangular delimitado por tres elementos funcionales: el acristalamiento (vidrio convencional de 4 mm), el captador (placa de aluminio pintada de negro mate) y el aislante térmico posterior (espuma de

poliestireno). La radiación solar incidente atraviesa el acristalamiento, calienta el captador y, por convección, eleva la temperatura del aire en el canal, generando el flujo ascendente que alimenta la cámara de secado. Las dimensiones del prototipo construido son: área del captador $A_w = 0,92 \times 0,50 = 0,46 \text{ m}^2$, altura del canal $H = 1,25 \text{ m}$ e inclinación β respecto a la horizontal determinada por las condiciones de diseño.

Figura 2.

Esquema de procesos de transferencia de calor en la chimenea solar



Fuente: Ardila (2022)

3.2.2. Modelo de irradiancia solar

La irradiancia solar incidente sobre el colector inclinado se calcula mediante el modelo de Gueymard (2009), recomendado por ASHRAE para condiciones de cielo claro. Este modelo

descompone la irradiancia total en sus componentes directa, difusa y reflejada, en función de la latitud geográfica (7,13° N para Bucaramanga), la hora solar verdadera, el ángulo de inclinación del colector y el índice de claridad atmosférica local. Al programar el modelo de Gueymard (2009) en MATLAB®, se puede estimar la irradiancia solar [W/m²] en función de la hora, la fecha y la localización geográfica (latitud y longitud). El modelo completo se muestra en el Apéndice A.

3.2.3. Balance de energía en el acristalamiento

El acristalamiento absorbe una fracción de la radiación incidente y pierde calor hacia el exterior por convección y radiación. El balance de energía en estado cuasi-estacionario, adoptado del modelo de Bansal (1993) y extendido por Ardila et al (2022) para Bucaramanga, se expresa:

$$Q_{abs,g} + Q_{rad,g} - Q_{conv,g} + Q_{loss,g-ext} \quad (18)$$

donde $Q_{abs,g} = S_g A_g = \alpha_g G A_g$ es la energía absorbida por el acristalamiento, $Q_{rad,g-w} = h_{rwg} A_g (T_w - T_g)$ el intercambio radiativo entre captador y acristalamiento, $Q_{conv,g} = h_g A_g (T_g - T_f)$ la convección hacia el aire del canal, y $Q_{loss,g-ext} = U_t A_g (T_g - T_a)$ las pérdidas externas. El procedimiento para calcular el coeficiente global de transferencia de calor U_t se describe en Ardila et al (2022).

3.2.4. Balance de energía en el captador

El captador absorbe la irradiancia transmitida por el acristalamiento y cede calor al aire por convección, intercambia radiación con el acristalamiento y pierde calor por la estructura de soporte:

$$Q_{abs,w} = Q_{conv,w} + Q_{rad,w-g} + Q_{perd,w-ext} \quad (19)$$

En donde, $Q_{abs,w} = S_w A_w = \tau \alpha_w G A_w$ es el calor de irradiancia solar absorbido por el captador, $Q_{rad,w-g} = h_{rwg} A_g (T_w - T_g)$ es el calor radiativo intercambiado con el

acristalamiento, $Q_{conv,w} = h_g A_g (T_w - T_f)$ es el calor de convección intercambiado con el aire, y $Q_{perd,w-ext} = U_b A_w (T_w - T_a)$ es el calor perdido por la estructura. Nuevamente, el procedimiento para calcular U_b se describe en Ardila (2022).

3.2.5. Balance de energía en el aire y flujo másico

El calor ganado por el aire al atravesar el canal de la chimenea es la suma de los calores cedidos por convección desde el acristalamiento y el captador:

$$Q = Q_{conv,g} + Q_{conv,w} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_a) \quad (20)$$

La temperatura media del aire en el canal se calcula según Ong y Chow (2003) con el coeficiente $\gamma = 0,74$:

$$T_f = \gamma T_{out} + (1 - \gamma) T_a \quad (21)$$

Una vez determinadas T_f , T_g y T_w , el flujo másico inducido por efecto chimenea se calcula como (Bansal, 1993):

$$\dot{m} = C_d \rho A_0 \sqrt{\frac{2g L_w \sin(\beta) (T_f - T_a)}{(1 + A_f^2) T_a}} \quad (22)$$

y la velocidad del aire a la salida de la chimenea es

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A_0} \quad (23)$$

Estas variables constituyen los inputs de condición de frontera para el modelo de la cámara de secado.

3.3. Acoplamiento de los modelos

La integración de ambos modelos se realiza de manera unidireccional secuencial en cada paso de tiempo $\Delta t = 30$ s: primero se evalúa el modelo de la chimenea solar para las condiciones atmosféricas del instante t : irradiancia $I(t)$, temperatura ambiente $T_a(t)$ y velocidad del viento

promedio v_{wind} , obteniéndose la temperatura $T_{out}(t)_{chimenea} = T_{in}(t)_{secado}$ y la velocidad $v(t)$ del aire a la salida de la chimenea. Estos valores se emplean directamente como temperatura y velocidad del aire de secado en el modelo de cámara de secado. Se asume que la humedad relativa del aire que ingresa a la cámara de secado es la misma que la humedad relativa del aire ambiente $\varphi(t)$, dado que la chimenea no es un deshumidificador. La acción del acoplamiento implica que un aumento de la irradiancia solar incrementa T_f , elevando v , lo que acelera la tasa de evaporación superficial \dot{P}_{evap} y, en consecuencia, la tasa de reducción de humedad dX/dt . Este comportamiento retroalimentado reproduce adecuadamente la dinámica real del sistema durante el secado.

3.4. Implementación en MATLAB

La implementación numérica del modelo acoplado se realiza en MATLAB® R2026a mediante módulos que incluyen: parámetros de entrada, datos horarios del aire, propiedades termofísicas, geometría del grano, configuración temporal, simulación para dos geometrías (esférica y cilíndrica), generación de gráficas y salidas en consola. El código puede implementar el modelo de secado de van der Sman (2003) para la jornada de 9:00 a 17:00 h (8 horas), con datos horarios de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire interpolados linealmente entre los valores tabulados. La ecuación diferencial ordinaria de temperatura promedio (Ecuación 10) se integra mediante el esquema de Euler explícito de primer orden con paso de tiempo $\Delta t = 30$ s. Este valor fue seleccionado para garantizar la estabilidad numérica del esquema, dado que el número de Fourier del grano satisface $Fo = kt/(\rho c_p R^2) \ll 1$. La temperatura superficial T_{surf} se determina en cada paso mediante sustitución sucesiva, con máximo 100 iteraciones, y un criterio de convergencia $|T_{surf}^{(k+1)} - T_{surf}^{(k)}| < 10^{-8}$, dada la no linealidad de la función $c_{sat}(T_{surf})$ (Ecuación 4). El contenido de humedad en base seca X se actualiza explícitamente según

$$X^{n+1} = X^n - \frac{J_{\text{evap}}}{m_{\text{ss,g}}} \Delta t \quad (24)$$

Los parámetros de entrada del código incluyen: masa inicial del cacao ($m_{\text{total}} = 5\text{kg}$), contenidos de humedad inicial ($X = 55\%$ BH) y objetivo ($X = 7\%$ BH), propiedades termofísicas del cacao y del aire, geometría del grano, y los vectores horarios de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire. Las salidas incluyen perfiles temporales de: temperatura promedio T_{avg} y superficial T_{surf} del grano, contenido de humedad en base húmeda X , masa de agua evaporada del cacao, y gráficas. La implementación del modelo acoplado de chimenea solar y secado se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 3.

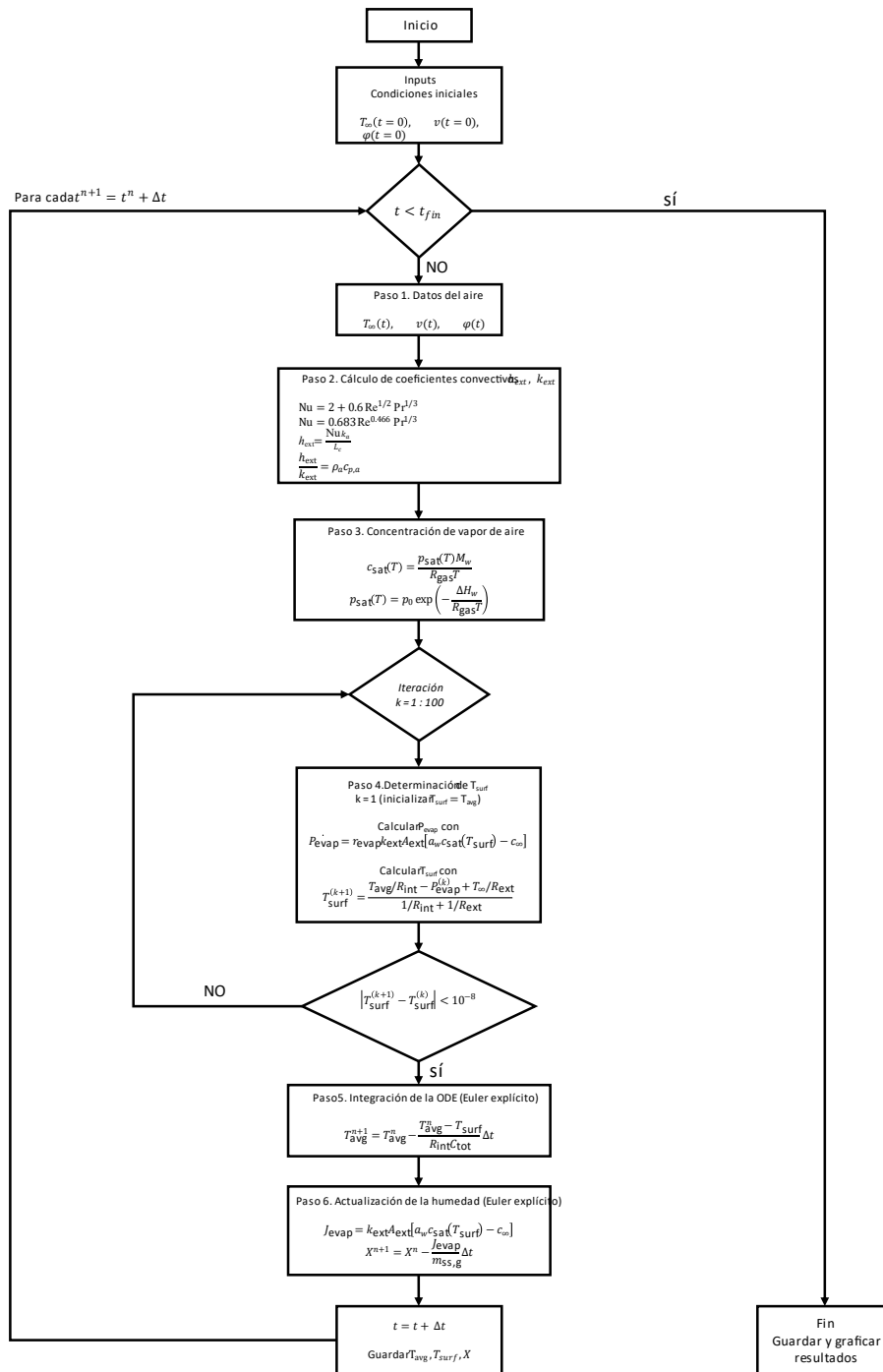
3.5. Diseño del prototipo experimental

3.5.1. Descripción del sistema físico

El prototipo construido consiste en un sistema integrado chimenea solar–cámara de secado con las siguientes dimensiones: altura total 1,25 m; altura de la cámara de secado 0,90 m; sección transversal de la cámara $0,44 \times 0,44$ m; ancho total 0,50 m; largo total 0,92 m; y altura de la entrada de aire 0,20 m. La chimenea solar incorpora un acristalamiento de vidrio convencional de 4 mm ($\alpha = 0,08$; $\tau = 0,88$; $\varepsilon = 0,90$), un captador de placa de aluminio pintada de negro mate ($\alpha = 0,95$; $\varepsilon = 0,90$), y aislante de espuma de poliestireno ($k = 0,035$ W/mK). La cámara de secado está construida en madera de pino ($k = 0,1213$ W/mK). El diseño en CAD del prototipo fue elaborado previamente a la construcción para verificar la geometría y las dimensiones, y se muestra en la Figura 4.

Figura 3.

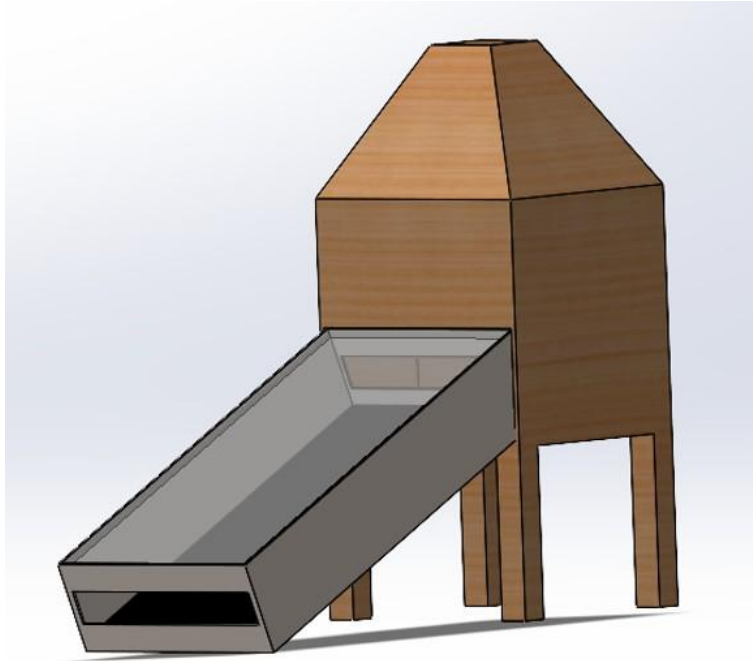
Diagrama de flujo del modelo de secado



Nota: El código MATLAB se muestra en detalle en el Apéndice B

Figura 4.

Diseño CAD del prototipo de chimenea solar – cámara de secado



Nota: Las dimensiones detalladas del prototipo se muestran en el Apéndice C.

3.5.2. Instrumentación y variables medidas

La toma de datos experimentales emplea los siguientes instrumentos: sensores de temperatura digital DS18B20 conectados a tarjeta Arduino UNO (resolución $\pm 0,5$ °C, rango -55 a 125 °C), registrando temperatura en la cámara de secado y en el captador cada 5 minutos; solarímetro TES-1333 Solar Power Meter para la irradiancia solar incidente [W/m^2]; y gramera electrónica de precisión para la masa de los granos de cacao durante el proceso de secado [g]. Las variables medidas durante el experimento son: temperatura del aire en la cámara de secado T_a , temperatura del captador T_w , irradiancia solar I , y masa de la muestra en cada paso de tiempo. Los instrumentos utilizados para la toma de datos se muestran en la Figura 5.

Figura 5.

Instrumentación utilizada para la toma de datos



Nota: a) Sensor de temperatura DS18B20; b) Solarímetro TES-1333; c) Gramera electrónica

4. Resultados y discusiones

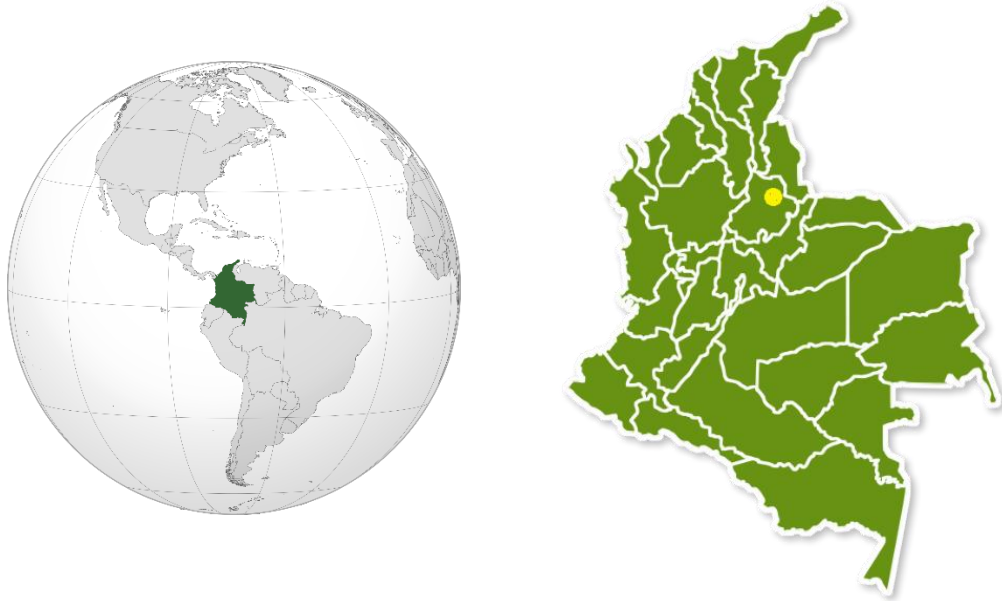
4.1. Montaje experimental

4.1.1. Localización geográfica

El montaje experimental se llevó a cabo en el municipio de Bucaramanga, capital del departamento de Santander (Colombia), localizado sobre la Meseta de Bucaramanga en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, a 959 m s. n. m., con coordenadas $7^{\circ}4'44''$ N y $73^{\circ}6'28''$ O. Su clima se clasifica como monzónico y se caracteriza por temperaturas estables durante el año, con una media anual de $21,6^{\circ}\text{C}$ y una máxima promedio de $25,8^{\circ}\text{C}$ (IDEAM, 2024). El régimen de precipitaciones es bimodal, con períodos lluviosos en marzo–mayo y septiembre–noviembre, y una precipitación anual promedio de 1.180,8 mm.

Figura 6.

Localización geográfica de Bucaramanga: 7°4'44" N y 73°6'28" O



Nota: a la izquierda, ubicación de Colombia en América. A la derecha, ubicación de Bucaramanga en Colombia.

La humedad relativa media es de aproximadamente 76%, con valores mínimos cercanos al 55% durante las horas de mayor irradiancia. La irradiancia horizontal global diaria promedio oscila entre 4,5 y 5,0 kWh/m², con valores instantáneos superiores a 1.000 W/m² en las horas centrales del día (UPME-IDEAM, 2005; NASA POWER, 2024). Estas condiciones climáticas constituyen los parámetros de entrada al modelo de irradiancia y al modelo termodinámico de la chimenea solar descritos en la Sección 3.2.

4.1.2. Prototipo experimental

El prototipo experimental está integrado por una chimenea solar acoplada a una cámara de secado, construido con materiales de disponibilidad comercial local. El acristalamiento, elaborado

en vidrio convencional de 4 mm de espesor, favoreciendo la máxima transmisión de irradiancia solar hacia el interior del canal. El captador consiste en una placa de aluminio pintada con negro mate. El aislamiento posterior del canal se realiza con espuma de poliestireno, minimizando las pérdidas de calor hacia el exterior a través de la estructura de soporte en lámina galvanizada. La cámara de secado fue construida en madera de pino, material que ofrece baja conductividad térmica y facilidad de construcción a bajo costo. Las propiedades termofísicas y ópticas se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Materiales y propiedades termo físicas y ópticas de la chimenea solar

| Componente | Material | Espesor | ρ (kg/m ³) | k (W/mK) | C_p (J/kgK) | ϵ | τ | α |
|------------|--------------|---------|-----------------------------|------------|---------------|------------|--------|----------|
| Cristal | Vidrio | 4 mm | 2500 | 1.05 | 800 | 0.8 | 0.88 | 0.08 |
| Captador | Aluminio | 1 mm | 7850 | 50 | 500 | 0.0 | 0 | 0.07 |
| Aislante | Poliestireno | 10 mm | 27 | 0.035 | 1300 | -- | 0 | 0.70 |
| Estructura | Acero | 1 mm | 8000 | 16 | 500 | 0.2 | 0 | 0.40 |
| Cámara | Madera-Pino | 10mm | 540 | 0.15 | 707 | 0.9 | 0 | 0.70 |

Nota: ρ = densidad, k = conductividad, C_p = calor específico, ϵ = emitancia, τ = transmitancia, α = absortancia

A partir de estas especificaciones de materiales, se definieron las dimensiones del prototipo mediante un proceso de dimensionamiento térmico y su correspondiente modelado en CAD: altura total de 1,25 m, altura de la cámara de secado de 0,90 m, sección transversal de la cámara de 0,44 × 0,44 m, ancho total del secador de 0,50 m, largo total del captador 0,92 m, y ancho de 0,5 m y altura de la entrada de aire de 0,20 m, para un área del captador solar de 0,46 m². Estas dimensiones determinan, en conjunto con las propiedades ópticas de los materiales, los parámetros geométricos de entrada al modelo matemático de la chimenea solar descrito en la Sección 3.2.

Figura 7.

Prototipo de secador de cacao con chimenea solar integrada



Nota: foto tomada en el edificio de laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica - UIS.

4.1.3. Condiciones de operación del experimento

El experimento de validación se realizó el 12 de marzo de 2026 en Bucaramanga, Colombia, con toma de datos en el período 10:10–14:10 h (4 horas de registro continuo). Las condiciones registradas mostraron temperaturas en la cámara de secado en el rango de 28,32 a 34,88 °C, temperaturas del captador de 45,6 a 66,94 °C, e irradiancia solar entre 160 y 1.200 W/m². Se utilizó una muestra de 9 granos de cacao fermentado con masa promedio inicial de 4,4 g, sometidos al proceso de secado durante 4 horas. La masa promedio final registrada fue de 2,8 g, correspondiente a una reducción de 1,6 g (36,36% del peso inicial). Considerando que el 55% del peso inicial corresponde a agua, el contenido de humedad final estimado experimentalmente es de 29,3% BH.

4.2. Validación experimental del modelo

La validación experimental del modelo acoplado chimenea solar–secador de cacao se llevó a cabo mediante una sesión de toma de datos en condiciones reales de operación, cubriendo un período de cuatro horas comprendido entre las 10:10 y las 14:10 horas, con un intervalo de registro de cinco minutos. Durante cada paso de tiempo se registraron la temperatura del aire en la cámara de secado (T_a), la temperatura superficial del captador (T_w), la irradiancia solar incidente (I) y la masa total de la muestra. Los datos recopilados se presentan en la Tabla 5 y constituyen la base de comparación con las predicciones del modelo para las geometrías de esfera y cilindro equivalentes. La Figura 8 presenta la pérdida de masa acumulada de agua obtenida experimentalmente y la predicha por los modelos teóricos (geometría esfera y geometría cilindro) en función del tiempo. En términos generales, las tres curvas exhiben la tendencia decreciente esperada para un proceso de secado bajo condiciones solares, lo que confirma la coherencia cualitativa del modelo. No obstante, se observa una discrepancia sistemática entre los datos experimentales y los resultados teóricos, que se acentúa progresivamente hacia el final del período de medición, en torno a las 14:10 horas. En este intervalo, la pérdida de agua registrada experimentalmente supera a la predicha por ambas geometrías del modelo, indicando que el sistema real presenta un desempeño de secado superior al estimado teóricamente.

Figura 8.

Pérdida de masa de agua – modelo vs experimentales

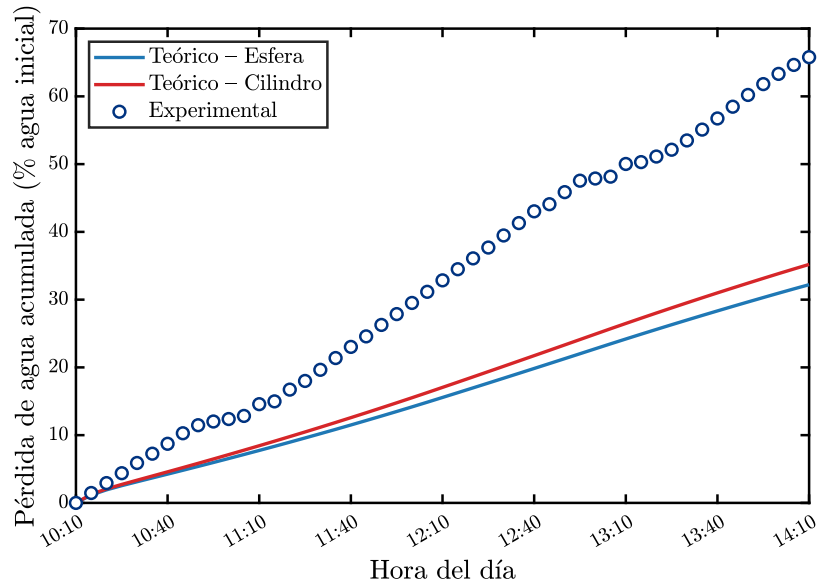


Tabla 5.

Datos tomados en el montaje experimental

| Hora | T_a [°C] | T_w [°C] | I [W/m ²] | m [g] |
|-------|------------|------------|-------------------------|---------|
| 10:10 | 30,50 | 45,60 | 928,50 | 39,80 |
| 10:15 | 30,80 | 50,30 | 923,60 | 39,49 |
| 10:20 | 31,80 | 56,20 | 937,80 | 39,17 |
| 10:25 | 31,60 | 60,30 | 968,00 | 38,86 |
| 10:30 | 31,02 | 64,06 | 880,00 | 38,53 |
| 10:35 | 30,26 | 61,75 | 942,00 | 38,23 |
| 10:40 | 32,50 | 65,44 | 971,00 | 37,92 |
| 10:45 | 32,75 | 63,25 | 761,30 | 37,59 |
| 10:50 | 32,25 | 54,31 | 350,7 | 37,33 |
| 10:55 | 29,00 | 43,00 | 240 | 37,21 |
| 11:00 | 29,13 | 45,63 | 303 | 37,13 |
| 11:05 | 30,81 | 59,94 | 1100 | 37,03 |
| 11:10 | 32,19 | 61,63 | 265,32 | 36,66 |
| 11:15 | 30,94 | 57,63 | 1093 | 36,57 |
| 11:20 | 31,56 | 59,44 | 840 | 36,20 |
| 11:25 | 30,81 | 56,81 | 1025 | 35,92 |
| 11:30 | 32,50 | 64,12 | 1124 | 35,57 |
| 11:35 | 33,25 | 67,00 | 1059 | 35,19 |
| 11:40 | 33,44 | 67,00 | 970 | 34,83 |
| 11:45 | 32,19 | 55,56 | 1078 | 34,50 |
| 11:50 | 32,44 | 63,13 | 1026 | 34,14 |

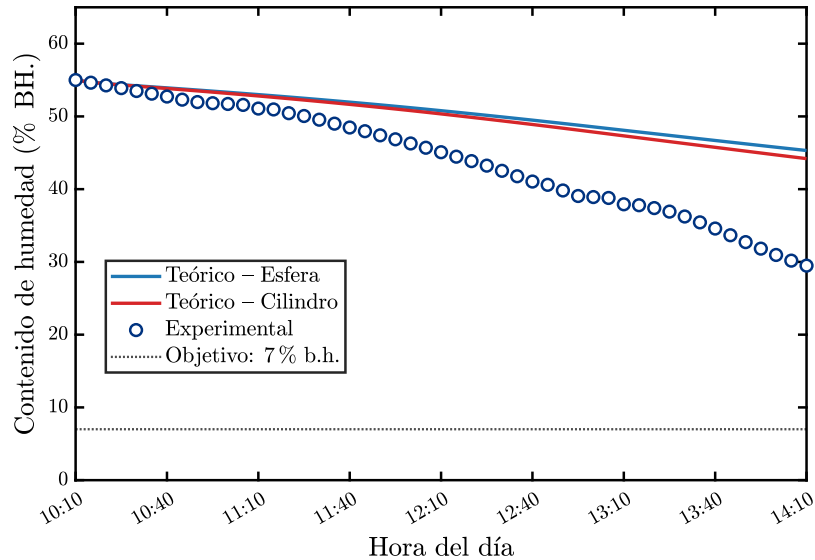
| | | | | |
|-------|-------|-------|------|-------|
| 11:55 | 34,38 | 66,94 | 1064 | 33,79 |
| 12:00 | 33,31 | 64,50 | 1038 | 33,44 |
| 12:05 | 33,90 | 65,60 | 1080 | 33,08 |
| 12:10 | 33,56 | 64,36 | 1060 | 32,72 |
| 12:15 | 34,23 | 65,30 | 1025 | 32,36 |
| 12:20 | 32,89 | 62,56 | 1020 | 32,02 |
| 12:25 | 34,13 | 63,94 | 1140 | 31,67 |
| 12:30 | 33,56 | 65,23 | 1165 | 31,29 |
| 12:35 | 32,65 | 63,26 | 1103 | 30,89 |
| 12:40 | 34,06 | 62,94 | 652 | 30,52 |
| 12:45 | 33,88 | 61,23 | 1155 | 30,30 |
| 12:50 | 34,88 | 63,20 | 1080 | 29,91 |
| 12:55 | 34,31 | 62,36 | 210 | 29,55 |
| 13:00 | 32,25 | 60,32 | 160 | 29,48 |
| 13:05 | 31,45 | 58,36 | 1200 | 29,42 |
| 13:10 | 31,12 | 57,43 | 190 | 29,02 |
| 13:15 | 30,00 | 56,32 | 500 | 28,95 |
| 13:20 | 29,50 | 50,32 | 640 | 28,78 |
| 13:25 | 31,62 | 53,23 | 890 | 28,57 |
| 13:30 | 32,19 | 60,00 | 1020 | 28,27 |
| 13:35 | 32,50 | 62,36 | 1060 | 27,92 |
| 13:40 | 33,02 | 65,23 | 1103 | 27,56 |
| 13:45 | 33,20 | 66,32 | 1115 | 27,19 |
| 13:50 | 31,56 | 64,21 | 1003 | 26,82 |
| 13:55 | 30,53 | 61,32 | 956 | 26,48 |
| 14:00 | 29,63 | 57,23 | 850 | 26,15 |
| 14:05 | 29,12 | 56,32 | 730 | 25,87 |
| 14:10 | 28,32 | 55,21 | 653 | 25,40 |

Nota: T_a = temperatura en cámara de secado; T_w = temperatura captadora; I = irradiancia; m = masa de la muestra

Esta discrepancia puede atribuirse, en primera instancia, a una limitación inherente al modelo: el flujo de aire que ingresa a la cámara de secado se calcula exclusivamente a partir de la convección natural inducida por el efecto termosifón de la chimenea solar, sin considerar contribuciones externas al caudal. Sin embargo, durante la toma de datos experimentales se registraron corrientes de viento exterior de intensidad considerable, particularmente en las horas de mayor irradiancia solar. Estas corrientes incrementan el flujo de aire neto que atraviesa la cámara de secado más allá de lo que el modelo pasivo predice, acelerando la transferencia convectiva de masa en la superficie de los granos y, en consecuencia, aumentando la tasa de

remoción de humedad. Este fenómeno, conocido en la literatura como efecto de viento de asistencia (wind-assisted natural ventilation), no está contemplado en la formulación de Bansal et al. (1993) ni en el refinamiento de Ong y Chow (2003) adoptados en este trabajo, lo que explica de manera consistente el comportamiento observado.

La Figura 9 muestra la evolución del contenido de humedad en base húmeda (%BH) a lo largo del período experimental para las tres curvas comparadas. El valor inicial de humedad es aproximadamente 56,5 %BH en los tres casos, consistente con el rango de 55 a 60 %BH reportado para granos de cacao recién fermentados (Afoakwa, 2010). Al finalizar el período de medición, los modelos teóricos predicen un contenido de humedad de aproximadamente 45 %BH, mientras que los datos experimentales alcanzan cerca de 30 %BH, una diferencia de aproximadamente 15 puntos porcentuales que es coherente con la mayor pérdida de agua observada en la Figura 8. Ambas curvas del modelo —esfera y cilindro— presentan valores muy cercanos entre sí a lo largo de todo el período, lo que sugiere que la geometría equivalente asumida tiene una influencia limitada sobre el resultado global en las condiciones evaluadas, y que la principal fuente de discrepancia con el experimento es el caudal de aire subestimado, no la geometría del grano.

Figura 9.*Pérdida de contenido de humedad-modelos vs experimental*

4.3. Comparación entre prototipos

El tercer objetivo específico del presente trabajo consiste en comparar la relación tiempo de secado–unidad de energía y la relación tiempo de secado–costo entre el modelo desarrollado y el secador rectangular para el secado de cacao por convección forzada reportado por Rubio (2022). El secador de referencia opera mediante un quemador de gas licuado de petróleo (GLP) como fuente de calor y un blower eléctrico para la circulación forzada del aire, con una potencia instalada total de 2,036 kW distribuida entre el blower (1,491 kW), el variador de frecuencia (0,275 kW), la fuente de alimentación (0,120 kW) y el equipo de adquisición de datos (0,150 kW). En sus pruebas experimentales, Rubio (2022) secó 57 kg de cacao desde una humedad inicial de aproximadamente 60 % BH hasta una humedad final del 7 % BH en un tiempo de 3 h 25 min (3,41 h), a una temperatura de operación de 60 °C y una velocidad de aire de 3 m/s, evaporando 22,4 kg de agua con un consumo eléctrico de 6,94 kWh y un consumo de GLP de 3,4 kg.

El prototipo solar evaluado en el presente trabajo opera exclusivamente mediante convección natural inducida por efecto termosifón en la chimenea solar, sin consumo de energía eléctrica ni de combustible fósil. Durante la sesión experimental, se evaporaron 0,0144 kg de agua en un período de 4 h, bajo condiciones de irradiancia solar variable características de un día típico de Bucaramanga. La diferencia de escala entre ambos sistemas —determinada por las dimensiones del prototipo construido— requiere que la comparación se realice en términos de indicadores normalizados por unidad de agua evaporada, a fin de garantizar una base de análisis equitativa e independiente de la capacidad de carga.

4.3.1. Comparación del desempeño operativo

La Tabla 6 presenta los indicadores operativos de ambos sistemas expresados en términos absolutos y normalizados. El indicador utilizado para la comparación energética es la relación potencia suministrada por kilogramo de agua evaporada (kWh/kg agua), que cuantifica la intensidad energética del proceso con independencia de la escala de operación.

Tabla 6.

Comparación del desempeño entre referencia y el prototipo

| Modelo | Agua evaporada (kg) | Tiempo de secado (h) | Potencia suministrada (kWh) | Potencia / Peso (kWh/kg) | Consumo GLP (kg) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Rubio (2022) | 22,400 | 3,41 | 6,940 | 0,310 | 3,40 |
| Prototipo solar | 0,0144 | 4,00 | 0,009 | 0,627 | — |

Nota. Los valores del secador de referencia corresponden al modelo de Rubio (2022) para secado de cacao por convección forzada con GLP. El prototipo solar opera mediante convección natural inducida por efecto chimenea, sin consumo de energía eléctrica ni GLP (—). Potencia / Peso expresa la energía consumida por kilogramo de agua evaporada. GLP = gas licuado de petróleo.

Del análisis de la Tabla 6 se observa que el secador de convección forzada consume 0,310 kWh por kilogramo de agua evaporada, mientras que el prototipo solar presenta un valor de 0,625 kWh/kg. Esta diferencia aparente en la intensidad energética se explica por el hecho de que la energía del prototipo proviene íntegramente de la radiación solar, cuyo costo económico y cuya huella de carbono son nulos. En consecuencia, el indicador de intensidad energética del prototipo refleja únicamente la energía solar captada y no implica un mayor gasto energético de origen fósil o eléctrico. Desde la perspectiva del tiempo de secado, el secador de Rubio (2022) logra el proceso en 3,41 h frente a las 4,00 h del prototipo solar, lo que representa una reducción del 14,8 % en el tiempo de proceso a favor del sistema convencional.

4.3.2. Comparación de la relación tiempo de secado - costo

Para la comparación económica, los costos del secador de Rubio (2022) fueron recalculados utilizando los precios de energía vigentes en Colombia. Considerando una tarifa eléctrica de 1.015,76 COP/kWh (Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., 2026) y un precio del GLP de 2.200,00 COP/kg, se determinaron los componentes del costo energético por kilogramo de agua evaporada que se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Comparación tiempo de secado–costo

| Modelo | Costo energía eléctrica (COP/kWh) | Costo energía eléctrica (COP/kg agua) | Costo unitario GLP (COP/kg) | Costo GLP (COP/kg agua) | Costo total (COP/kg agua) |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Rubio (2022) | \$ 1.015,76 | \$ 314,70 | \$ 2.200,00 | \$ 333,93 | \$ 648,63 |
| Prototipo solar | — | \$ 0 | — | \$ 0 | \$ 0 |

Nota. Los costos del prototipo solar son iguales a cero dado que el sistema opera exclusivamente mediante energía solar pasiva, sin insumos energéticos de costo variable. El costo total por kilogramo de agua evaporada para el secador de referencia (\$ 648,63 COP/kg) incluye el costo de energía eléctrica

y el costo de GLP. Precios de referencia: energía eléctrica = \$ 1.015,76 COP/kWh; GLP = \$ 2.200,00 COP/kg. COP = peso colombiano. (—) = no aplica.

4.3.3. Análisis de viabilidad económica

La Tabla 7 evidencia que el costo total del proceso de secado por convección forzada asciende a 648,63 COP por kilogramo de agua evaporada, compuesto por 314,70 COP/kg correspondientes al consumo eléctrico y 333,93 COP/kg al consumo de GLP. Este doble componente de costo (eléctrico y de combustible) es una característica estructural de los secadores de convección forzada con quemador, que los hace especialmente sensibles a las fluctuaciones en los precios de la energía y del gas, factores de alta variabilidad en el contexto rural colombiano.

El prototipo solar, al operar exclusivamente mediante energía solar pasiva, presenta un costo energético variable igual a cero COP/kg de agua evaporada. Esto implica que, bajo condiciones de operación equivalentes en escala, el sistema propuesto permitiría un ahorro de 648,63 COP por cada kilogramo de agua evaporada respecto al proceso convencional de referencia, eliminando simultáneamente el costo eléctrico y el costo de GLP. Para un lote típico de secado de 57 kg de cacao, equivalente a los 22,4 kg de agua evaporada del experimento de Rubio (2022), el ahorro energético total ascendería a 14.529,32 COP por sesión de secado.

Es importante señalar que la comparación anterior se limita a los costos de energía variable y no incluye los costos de inversión inicial ni de mantenimiento de cada sistema. En términos de inversión, el secador rectangular de Rubio (2022) reporta un costo de construcción de aproximadamente 1.365,40 USD en materiales y mano de obra, más el costo del sistema eléctrico y de control. El prototipo solar, al prescindir de quemador, blower, variador de frecuencia y sistema de adquisición de datos, presenta una estructura de costos de cerca de 600 USD (Ardila, 2022). En conjunto, los resultados sugieren que, desde la perspectiva del costo operativo energético, el

sistema pasivo basado en chimenea solar representa una alternativa económicamente viable para el secado de cacao a pequeña escala en el departamento de Santander, donde el acceso a GLP y a energía eléctrica confiable puede ser limitado y costoso para el productor rural.

4.3.4. Discusión comparativa

El secador de convección forzada ofrece un tiempo de secado menor (3,41 h frente a 4,00 h) y una mayor capacidad de control sobre las variables del proceso como temperatura, velocidad del aire y humedad relativa, gracias a su sistema de control PID con variador de frecuencia. Esta ventaja operativa resulta relevante para productores con alta demanda de procesamiento y acceso a infraestructura energética estable.

El prototipo solar, por su parte, sacrifica velocidad de proceso y precisión de control a cambio de un costo energético nulo y una dependencia operativa exclusiva de la radiación solar disponible, recurso abundante en la región de Bucaramanga, donde la irradiancia diaria promedio se ubica entre 3,5 y 5,5 kWh/m²·día (IDEAM). Esta característica lo hace especialmente adecuado para pequeños productores cacaoteros que operan en zonas rurales con conectividad eléctrica limitada o intermitente, y para quienes el costo energético por kilogramo procesado constituye una barrera significativa de acceso a tecnologías de poscosecha. En este contexto, el sistema propuesto no compite directamente con el secador de convección forzada, sino que ocupa un nicho tecnológico distinto: el del procesamiento pasivo, de bajo costo operativo y alta resiliencia energética, orientado a mejorar las condiciones actuales del secado artesanal al sol sin incurrir en costos de operación continuos.

5. Conclusiones

El presente trabajo desarrolló, implementó y validó un modelo matemático acoplado de chimenea solar y secador de cacao para caracterizar el desempeño de un sistema pasivo de secado poscosecha orientado a pequeños productores del departamento de Santander.

En relación con el primer objetivo específico, se integró el modelo analítico de chimenea solar de Bansal et al. (1993) y Ong y Chow (2003) con el modelo de secado de Van der Sman (2003) en MATLAB®, alimentado con irradiancia solar horaria del modelo *Clear Sky* y parámetros cinéticos locales del cacao reportados por Bohórquez Peña et al. (2021), lo que confiere al modelo una base empírica representativa de las condiciones de Bucaramanga.

En relación con el segundo objetivo específico, la validación experimental mostró concordancia cualitativa satisfactoria entre el modelo y los datos medidos, con ambas curvas siguiendo la tendencia decreciente esperada en pérdida de masa y contenido de humedad. La discrepancia cuantitativa observada de datos experimentales con mayor tasa de secado que el modelo se atribuye a corrientes de viento exterior no contempladas en la formulación de convección natural pura. El modelo subestima conservadoramente la tasa de secado real, comportamiento favorable para el diseño. El contenido de humedad decreció desde 56,5 % BH hasta aproximadamente 45 % BH según el modelo y 30 % BH según el experimento al cabo de cuatro horas.

En relación con el tercer objetivo específico, el secador de convección forzada de Rubio (2022) presenta un tiempo de secado menor (3,41 h frente a 4,00 h) y mayor control del proceso, pero incurre en un costo energético de 648,63 COP/kg de agua evaporada (electricidad y GLP). El prototipo solar, al operar con energía solar pasiva, presenta costo energético variable igual a cero,

representando un ahorro de 648,63 COP por kilogramo de agua evaporada y de 14.529,32 COP por sesión de secado equivalente, eliminando la dependencia del suministro eléctrico y del GLP.

Como conclusión general, el sistema propuesto constituye una alternativa técnicamente viable y económicamente aceptable en costo operativo para el secado de cacao a pequeña escala en Santander. El modelo desarrollado es una herramienta de diseño de bajo costo computacional, extensible en trabajos futuros mediante la incorporación del efecto del viento, mayor número de experimentos de validación y el escalado del prototipo hacia capacidades representativas de la producción regional.

Referencias bibliográficas

- Afoakwa, E. O. (2010). *Chocolate science and technology*. Wiley-Blackwell.
- Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., y Ryan, A. (2008). Flavor formation and character in cocoa and chocolate: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(9), 840–857. <https://doi.org/10.1080/10408390701719272>
- Amin, M., y Sarmidi, M. R. (2008). Investigation on the performance of solar tunnel dryer during rainy season for cocoa beans drying. En *Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering*. International Commission of Agricultural Engineering.
- Ardila, O., Quiroga, J., & Amaris, C. (2023). Assessment of solar chimney potential for passive ventilation and thermal comfort in the northeast of Colombia. *Results in Engineering*, 20, 101641. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101641>
- Bansal, N. K., Mathur, J., y Bhandari, M. S. (1993). Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Building and Environment*, 28(3), 373–377. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(93\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(93)90042-2)
- Bohórquez Peña, J. D., y Garzón, A. F. (2021). Evaluación de un secador solar para granos de cacao. *Revista Ingeniería e Innovación*, 9(2), 1–15.
- Bonaparte, A., Gnakri, D., y Lozano, J. M. (1998). Solar drying of cocoa beans in Saint Lucia. En *Proceedings of the 1st Latin American and Caribbean Symposium on Drying* (pp. 22–31). AIDIC.

- Churchill, S. W., y Bernstein, M. (1977). A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow. *Journal of Heat Transfer*, 99(2), 300–306.
- Dharma, A., Supranto, S., y Murti, R. (2024). Heat transfer simulation for redesign of tray dryer to reduce the energy consumption in the cocoa bean drying process. *Thermal Science and Engineering Progress*, 49, 102–115.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Erbs, D. G., Klein, S. A., & Duffie, J. A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28(4), 293–302. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90302-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90302-4)
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2025). Producción nacional de cacao 2024. <https://www.fedecacao.com.co>
- Gueymard, C. A. (2009). Monthly average clear-sky broadband irradiance solar energy statistics for 5700+ worldwide sites. En *Proceedings of ASES National Solar Conference*. ASES.
- Glover, J., & McCulloch, J. S. G. (1958). The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(360), 172–175. <https://doi.org/10.1002/qj.49708436018>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225–230. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390>

- Jinap, S., Thien, J., y Yap, T. N. (1994). Effect of drying on acidity and volatile fatty acids content of cocoa beans. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 65(1), 67–75.
- Komolafe, C. A., Ogunleye, I. O., y Olorunfemi, B. J. (2021). Thermodynamic analysis of a forced-convection solar dryer integrated with sensitive thermal storage material for cocoa drying. *Heliyon*, 7(5), e07047.
- Lutheran World Relief. (2013). *Manual de buenas prácticas en poscosecha de cacao*. Lutheran World Relief.
- Mathur, J., Mathur, S., y Anupma. (2006). Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 38(10), 1156–1163.
- Ong, K. S., y Chow, C. C. (2003). Performance of a solar chimney. *Solar Energy*, 74(1), 1–17.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271–289. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- Rubio, D. F. (2022). *Modelación de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada [Trabajo de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]*. Repositorio UTC.
- Ranz, W. E., y Marshall, W. R. (1952). Evaporation from drops. *Chemical Engineering Progress*, 48(3), 141–146.
- Sanchez, O. A. (2022). *Chimeneas solares como alternativa de ventilación natural en Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander.

- Stackhouse, P. W., Jr., Westberg, D., Hoell, J. M., Chandler, W. S., & Zhang, T. (2018). Prediction of worldwide energy resource (POWER): Agroclimatology methodology (Versión 3.1.1). NASA Langley Research Center. <https://power.larc.nasa.gov>
- Šúri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D., & Ossenbrink, H. A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81(10), 1295–1305. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.007>
- UPME-IDEAM. (2024). Atlas de radiación solar de Colombia. Ministerio de Minas y Energía.
- Van der Sman, R. G. M. (2003). Simple model for estimating heat and mass transfer in regular-shaped foods. *Journal of Food Engineering*, 60(4), 383–390. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00061-X).
- Voyant, C., Notton, G., Kalogirou, S., Nivet, M.-L., Paoli, C., Motte, F., & Foulloy, A. (2017). Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renewable Energy*, 105, 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095>
- WeatherSpark. (2025). El clima promedio en Bucaramanga. <https://es.weatherspark.com/y/22128/Clima-promedio-en-Bucaramanga>

Apéndice A: Modelo de cielo claro (Clear-Sky Model)

Para calcular la irradiancia solar incidente tanto en el captador de la chimenea solar como en las paredes del recinto, fue seleccionado el modelo de cielo claro (*clear-sky model*) desarrollado por Gueymard y Thevenard (2009). Con las consideraciones pertinentes, este modelo calcula el máximo teórico de irradiancia solar para cualquier posición geográfica sobre la Tierra entre -60° y 60° de latitud, según la fecha y la hora. La posición de rotación de la Tierra con respecto al Sol se puede caracterizar con la hora solar aparente AST (*Apparent Solar Time*), la cual es diferente de la hora local estándar LST (*Local Standard Time*) por las siguientes razones:

- (1) En los países con horario de verano, la LST se retrasa al menos una hora en el cambio de estación.
- (2) La LST se determina para el meridiano estándar en cada zona horaria.
- (3) La velocidad orbital de la Tierra varía ligeramente a lo largo del año, y la diferencia resultante en la posición de rotación viene dada por la Ecuación del Tiempo (ET). La ET, en minutos, se puede calcular para el día del año n como sigue:

$$ET = 2.2918[0.0075 + 0.1868 \cos(\Gamma) - 3.2077 \sin(\Gamma) - 1.4615 \cos(2\Gamma)] \quad (A.1)$$

donde

$$\Gamma = 360^\circ \times (n - 1) / 365 \quad (A.2)$$

La AST (en horas) se puede relacionar con la ET (en minutos), el meridiano estándar local LSM (en grados) y la longitud local LON (en grados) como sigue:

$$AST = LST + ET/60 + (LSM - LON)/15 \quad (A.3)$$

Conociendo la AST, se puede calcular el ángulo horario solar como sigue:

$$\omega = 15(\text{AST} - 12) \quad (\text{A.4})$$

Por otra parte, el eje del polo terrestre no es ortogonal al plano que describe la órbita de la Tierra alrededor del Sol y además varía a lo largo del año. La variación en el ángulo de declinación se puede calcular para el día n como sigue:

$$\delta = 23.45 \sin[360^\circ \times (n + 284) / 365] \quad (\text{A.5})$$

El ángulo de altura solar (h) está relacionado con la latitud del sitio de estudio (L), la declinación (δ) para el día n y el ángulo horario solar (ω) como sigue:

$$\sin(h) = \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(L) \sin(\delta) \quad (\text{A.6})$$

El ángulo de azimut solar (γ_s), medido desde el sur, está dado por:

$$\cos(\gamma_s) = [\sin(\delta) \cos(L) - \cos(\delta) \sin(L) \cos(\omega)] / \cos(h) \quad (\text{A.7})$$

El ángulo de azimut de pared (ψ) se define como el ángulo entre la línea norte-sur y la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie. ψ es positivo para superficies orientadas al oeste del sur y negativo para superficies orientadas al este del sur. Para superficies orientadas hacia el sur, como es el caso del captador de la chimenea solar y de la pared sur del recinto, $\psi = 0^\circ$. La diferencia entre el azimut solar y el azimut de pared se denomina γ y viene dada por:

$$\gamma = \gamma_s - \psi \quad (\text{A.8})$$

Finalmente, el ángulo de incidencia solar (θ), que es el ángulo que forman los rayos del Sol y la normal a la superficie de estudio, está dado por:

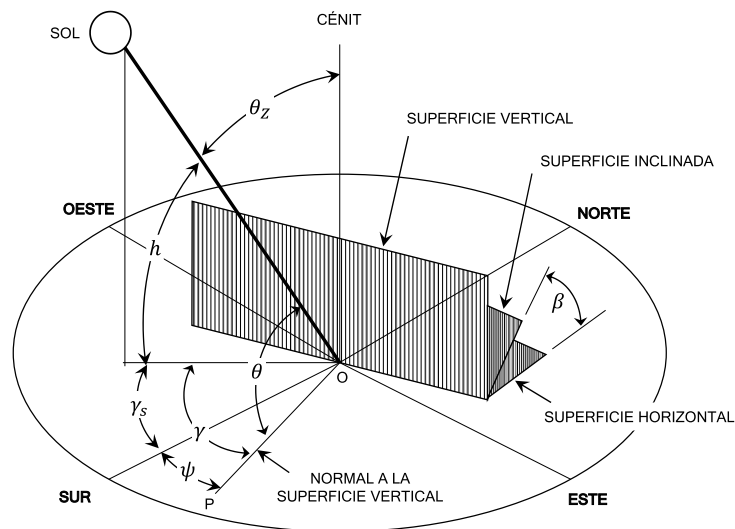
$$\cos(\theta) = \cos(h) \cos(\gamma) \sin(\beta) + \sin(h) \cos(\beta) \quad (A.9)$$

donde β es el ángulo de inclinación de la superficie con respecto al plano horizontal. La

Figura A.1 muestra los ángulos que intervienen en el cálculo del ángulo de incidencia θ .

Figura A.1:

Ángulos de geometría solar



Una vez calculada la geometría solar, el siguiente paso es calcular la irradiancia solar extraterrestre (G_0) para el día del año n como sigue:

$$G_0 = I_0 \{1 + 0.033 \cos[360^\circ \times (n - 3) / 365]\} \quad (A.10)$$

La atmósfera terrestre atenúa la irradiancia solar extraterrestre; por tanto, se define el parámetro masa de aire relativa m_r , el cual depende del ángulo de altitud solar (h):

$$m_r = 1 / [\sin(h) + 0.50572 (6.07995 + h)^{-1.6364}] \quad (A.11)$$

La profundidad óptica de haz (τ^b) y la profundidad óptica difusa (τ^d) se determinan para un lugar específico y un mes de interés según los datos de diseño climático de ASHRAE (2009). Con estos valores, se calculan los exponentes de masa de aire ab y ad :

$$ab = 1.454 - 0.406\tau^b - 0.268\tau^d + 0.021\tau^b\tau^d \quad (\text{A.12})$$

$$ad = 0.507 + 0.205\tau^b - 0.080\tau^d - 0.190\tau^b\tau^d \quad (\text{A.13})$$

Una vez calculados los exponentes de profundidad óptica y la masa relativa de aire, es posible calcular la irradiancia directa normal incidente (G_{b0}) y la irradiancia difusa horizontal (G_{d0}) como sigue:

$$G_{b0} = G_0 e^{-\tau^b} m^{ab} \quad (\text{A.14})$$

$$G_{d0} = G_0 e^{-\tau^d} m^{ad} \quad (\text{A.15})$$

Para la superficie inclinada, la irradiancia solar directa se calcula como sigue:

$$G_b = G_{b0} \cos(\theta) \quad (\text{A.16})$$

Para superficies inclinadas, la irradiancia solar difusa (G_d) se calcula de dos maneras según la inclinación. Para superficies verticales:

$$G_d = Y \cdot G_{d0} \quad (\text{A.17})$$

donde $Y = 0.45$ para $\cos(\theta) \leq -0.2$, e $Y = 0.55 + 0.437 \cos(\theta) + 0.313 \cos^2(\theta)$

Para superficies no verticales ($\beta \leq 90^\circ$):

$$G_d = G_{d0} [Y \sin(\beta) + \cos(\beta)] \quad (\text{A.18})$$

La irradiancia solar reflejada está dada por:

$$Gr = [Gb0 \sin(\beta) + Gd0] \cdot \rho_g \cdot [(1 - \cos(\beta)) / 2] \quad (A.19)$$

Finalmente, la irradiancia solar total incidente en la superficie inclinada está dada por:

$$G = Gb + Gd + Gr \quad (A.20)$$

$$I = G \quad \text{Irradiancia solar [W/m}^2\text{]}$$

Apéndice B: Código MATLAB de modelo de secado

```
%% =====
% VALIDACION.M
% Comparacion modelo teorico (van der Sman, 2003) vs. datos experimentales
% Experimento: 12 de marzo de 2026 | Bucaramanga, Santander, Colombia
% Ventana temporal: 10:10 - 14:10 h (240 min, 49 puntos cada 5 min)
% =====

clear; clc; close all;

%% =====
% 1. VECTORES EXPERIMENTALES
% =====

% Masa inicial y final del lote experimental [g]
masa_ini_exp = 39.80; % medida a las 10:10 h
masa_fin_exp = 25.40; % medida a las 14:10 h

% Tiempo desde inicio del ensayo [min]
t_min_exp = [0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, ...
            50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, ...
            100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, ...
            150, 155, 160, 165, 170, 175, 180, 185, 190, 195, ...
            200, 205, 210, 215, 220, 225, 230, 235, 240];

% Hora del dia correspondiente [h decimales desde medianoche]
t_hora_exp = 10 + 10/60 + t_min_exp / 60; % [h]

% Irradiancia solar medida [W/m^2]
G_exp = [928.5, 923.6, 937.8, 968.0, 880.0, 942.0, 971.0, 761.3, 350.7, 240.0, ...
        303.0, 1100.0, 265.3, 1093.0, 840.0, 1025.0, 1124.0, 1059.0, 970.0, 1078.0, ...
        1026.0, 1064.0, 1038.0, 1080.0, 1060.0, 1025.0, 1020.0, 1140.0, 1165.0, 1103.0, ...
        652.0, 1155.0, 1080.0, 210.0, 160.0, 1200.0, 190.0, 500.0, 640.0, 890.0, ...
        1020.0, 1060.0, 1103.0, 1115.0, 1003.0, 956.0, 850.0, 730.0, 653.0];

% Masa del lote experimental [g]
% Primer y ultimo valor: mediciones directas
% Valores intermedios: interpolados proporcionalmente a la irradiancia acumulada
masa_exp = [masa_ini_exp, ...
            39.48, 39.16, 38.84, 38.51, 38.21, 37.89, 37.55, 37.29, 37.17, ...
            37.09, 36.99, 36.61, 36.52, 36.14, 35.86, 35.50, 35.12, 34.76, 34.42, ...
            34.05, 33.70, 33.34, 32.98, 32.61, 32.25, 31.90, 31.55, 31.16, 30.76, ...
            30.38, 30.15, 29.76, 29.39, 29.32, 29.26, 28.85, 28.79, 28.61, 28.39, ...
            28.09, 27.74, 27.38, 27.00, 26.62, 26.27, 25.94, 25.65, masa_fin_exp];

N_exp = length(t_min_exp); % = 49 puntos

%% =====
% 2. HUMEDAD EXPERIMENTAL (base húmeda)
% Supuesto: humedad inicial = 55% b.h. (igual que el modelo)
% =====
```

```

X_bh_ini_exp = 0.55;
masa_seca_exp = masa_ini_exp * (1 - X_bh_ini_exp); % [g] solido seco

% Contenido de humedad en base humeda experimental [%]
X_bh_exp = (masa_exp - masa_seca_exp) ./ masa_exp * 100;

% Perdida de agua acumulada normalizada [% respecto al agua inicial]
masa_agua_exp = masa_exp - masa_seca_exp;
perdida_norm_exp = (masa_agua_exp(1) - masa_agua_exp) / masa_agua_exp(1) * 100;

%% =====
% 3. PROPIEDADES TERMOFISICAS
% =====

k_cacao = 0.30;
rho_cacao = 1100;
cp_cacao = 3500;

rho_aire = 1.165;
cp_aire = 1005;
mu_aire = 1.86e-5;
k_aire = 0.0263;
Pr_aire = 0.713;
Dw_aire = 2.6e-5;

Le = k_aire / (rho_aire * cp_aire * Dw_aire);
r_evap = 2.45e6;
Mw = 0.018015;
Rgas = 8.314;
DHw = r_evap * Mw;
Tref = 373.15;
pref = 101325;
p0 = pref * exp(DHw / (Rgas * Tref));

csat_func = @(T_K) p0 .* exp(-DHw ./ (Rgas .* T_K)) .* Mw ./ (Rgas .* T_K);

%% =====
% 4. GEOMETRIA DEL GRANO -- Tabla 1, van der Sman (2003)
% =====

% Esfera
R_esfera = 0.010;
V_esfera = (4/3) * pi * R_esfera^3;
A_esfera = 4 * pi * R_esfera^2;
dc_esfera = R_esfera / 4;

% Cilindro
R_cil = 0.008; L_cil = 0.016;
V_cil = pi * R_cil^2 * L_cil;
A_cil = 2*pi*R_cil*L_cil + 2*pi*R_cil^2;
dc_cil = R_cil / 3;

%% =====
% 5. CONDICIONES DEL AIRE
% Vectores a resolucio horaria (9am-5pm)
% =====

horas_dia_orig = [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 ];
T_aire_orig = [28.0,29.5,31.0,33.0,33.3,32.5,31.0,29.5,28.5]; % [C]
v_aire_orig = [0.30,0.32,0.34,0.35,0.36,0.35,0.33,0.31,0.30]; % [m/s]
HR_aire_orig = [0.70,0.67,0.63,0.58,0.55,0.57,0.62,0.66,0.70]; % [-]

%% =====
% 6. SIMULACION TEORICA -- ventana 10:10 a 14:10 h
% dt = 30 s => N_sim = 481 pasos internos
% Resultados extraidos cada 10 pasos (cada 5 min)
% =====

dt = 30;

```

```

t_fin = 240 * 60;
t_sim = 0 : dt : t_fin;
N_sim = length(t_sim); % = 481

T_init = interp1(horas_dia_orig, T_aire_orig, t_hora_exp(1), 'linear') + 273.15;
X_bs_ini = X_bh_ini_exp / (1 - X_bh_ini_exp);

geometrias = {'Esfera', 'Cilindro'};
V_g = [V_esfera, V_cil];
A_g = [A_esfera, A_cil];
dc_v = [dc_esfera, dc_cil];
Lc_v = [2*R_esfera, 2*R_cil];

X_bh_sim_full = zeros(N_sim, 2);
perdida_norm_full = zeros(N_sim, 2);

for ig = 1:2

    Vg = V_g(ig); Ag = A_g(ig); dc = dc_v(ig); Lc = Lc_v(ig);

    hint = k_cacao / dc;
    Rint = 1 / (hint * Ag);
    Ctot = rho_cacao * cp_cacao * Vg;

    T_avg = T_init;
    X_bs = X_bs_ini;

    X_bh_sim_full(1, ig) = X_bs / (1 + X_bs) * 100;
    perdida_norm_full(1, ig) = 0;

    for it = 2 : N_sim

        hora_actual = 10 + 10/60 + t_sim(it) / 3600;

        T_amb = interp1(horas_dia_orig, T_aire_orig, hora_actual, 'linear', 'extrap') + 273.15;
        v_air = interp1(horas_dia_orig, v_aire_orig, hora_actual, 'linear', 'extrap');
        HR = interp1(horas_dia_orig, HR_aire_orig, hora_actual, 'linear', 'extrap');

        c_amb = HR * csat_func(T_amb);

        Re = rho_aire * v_air * Lc / mu_aire;
        if ig == 1
            Nu = 2 + 0.6 * Re^0.5 * Pr_aire^(1/3);
        else
            Nu = 0.683 * Re^0.466 * Pr_aire^(1/3);
        end

        hext = Nu * k_aire / Lc;
        kext = hext / (rho_aire * cp_aire * Le^(2/3));
        Rext = 1 / (hext * Ag);

        X_eq = 0.05 * HR / (1 - HR + 0.05);
        if X_bs > X_eq
            aw = 1.0;
        else
            aw = min(1.0, X_bs / X_eq);
        end

        Ts = T_avg;
        for k = 1:100
            Pev = r_evap * kext * Ag * max(0, aw * csat_func(Ts) - c_amb);
            Tsnew = (T_avg/Rint - Pev + T_amb/Rext) / (1/Rint + 1/Rext);
            if abs(Tsnew - Ts) < 1e-8, break; end
            Ts = Tsnew;
        end
        T_surf = Ts;
        c_sat_s = aw * csat_func(T_surf);
    end
end

```

```

    T_avg = T_avg - (T_avg - T_surf) / (Rint * Ctot) * dt;

    J_evap = kext * Ag * max(0, c_sat_s - c_amb);
    m_ss_g = rho_cacao * Vg / (1 + X_bs);
    X_bs = max(0, X_bs - J_evap / m_ss_g * dt);

    X_bh_sim_full(it, ig) = X_bs / (1 + X_bs) * 100;
    perdida_norm_full(it, ig) = (X_bs_ini - X_bs) / X_bs_ini * 100;
end
end

idx_5min = 1 : 10 : N_sim;
X_bh_teo = X_bh_sim_full(idx_5min, :);
perdida_norm_teo = perdida_norm_full(idx_5min, :);

%% =====
% 7. GRAFICAS
% =====

set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex')
set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex')
set(groot, 'defaultLegendInterpreter', 'latex')
set(groot, 'defaultAxesFontSize', 12)

col_esfera = [0.12, 0.47, 0.71];
col_cilindro = [0.84, 0.15, 0.16];
col_exp = [0.12, 0.47, 0.71];
lw = 1.8;

xtick_vals = 0 : 30 : 240;
xtick_labels = {'10:10', '10:40', '11:10', '11:40', '12:10', '12:40', ...
               '13:10', '13:40', '14:10'};

% -- Figura 1: Contenido de humedad en base humeda -----
figure('Name', 'Humedad base humeda', 'Position', [100 100 750 480])

plot(t_min_exp, X_bh_teo(:,1), '-', 'Color', col_esfera, 'LineWidth', lw, ...
     'DisplayName', "Teorico -- Esfera")
hold on
plot(t_min_exp, X_bh_teo(:,2), '--', 'Color', col_cilindro, 'LineWidth', lw, ...
     'DisplayName', "Teorico -- Cilindro")
plot(t_min_exp, X_bh_exp, 'o', ...
     'Color', col_exp, ...
     'MarkerFaceColor', 'white', ...
     'MarkerSize', 5, ...
     'LineWidth', 1.2, ...
     'DisplayName', 'Experimental')
yline(7, 'k:', 'LineWidth', 1.4, 'DisplayName', "Objetivo: 7% b.h.")

xlabel("Hora del dia", 'FontSize', 14)
ylabel("Contenido de humedad (% b.h.)", 'FontSize', 14)
title("Contenido de humedad -- Modelo vs. Experimento", 'FontSize', 14)

set(gca, 'XTick', xtick_vals, 'XTickLabel', xtick_labels, ...
     'XTickLabelRotation', 30)
xlim([0 240]); ylim([0 65])
legend('Location', 'southwest', 'FontSize', 11)
grid on; box on

% -- Figura 2: Perdida de agua acumulada normalizada -----
figure('Name', 'Perdida de agua', 'Position', [160 80 750 480])

plot(t_min_exp, perdida_norm_teo(:,1), '-', 'Color', col_esfera, 'LineWidth', lw, ...
     'DisplayName', "Teorico -- Esfera")
hold on
plot(t_min_exp, perdida_norm_teo(:,2), '--', 'Color', col_cilindro, 'LineWidth', lw, ...
     'DisplayName', "Teorico -- Cilindro")
plot(t_min_exp, perdida_norm_exp, 'o', ...
     'Color', col_exp, ...
     'MarkerFaceColor', 'white', ...
     'MarkerSize', 5, ...
     'LineWidth', 1.2, ...
     'DisplayName', 'Experimental')

```

```

    'MarkerSize',      5,          ...
    'LineWidth',      1.2,        ...
    'DisplayName',    'Experimental')

xlabel("Hora del dia",          'FontSize', 14)
ylabel("Perdida de agua acumulada (% agua inicial)", 'FontSize', 14)
title("Perdida de agua -- Modelo vs. Experimento", 'FontSize', 14)

set(gca, 'XTick', xtick_vals, 'XTickLabel', xtick_labels, ...
         'XTickLabelRotation', 30)
xlim([0 240]); ylim([0 70])
legend('Location', 'northwest', 'FontSize', 11)
grid on; box on

%% =====
% 8. RESUMEN EN CONSOLA
% =====

fprintf('\n=== RESUMEN DE VALIDACION (t = 240 min) ===\n')
fprintf('%-35s %8s %8s %8s\n', 'Variable', 'Esfera', 'Cilindro', 'Exp.')
fprintf('%-35s %8.2f %8.2f %8.2f\n', 'X_bh final [%]', ...
        X_bh_teo(end,1), X_bh_teo(end,2), X_bh_exp(end))
fprintf('%-35s %8.2f %8.2f %8.2f\n', 'Perdida agua acum. [%]', ...
        perdida_norm_teo(end,1), perdida_norm_teo(end,2), perdida_norm_exp(end))
fprintf('%-35s %8.2f %8.2f\n', 'Error X_bh vs. exp. [%]', ...
        abs(X_bh_teo(end,1) - X_bh_exp(end)) / X_bh_exp(end) * 100, ...
        abs(X_bh_teo(end,2) - X_bh_exp(end)) / X_bh_exp(end) * 100)
fprintf('%-35s %8.2f %8.2f\n', 'Error perdida vs. exp. [%]', ...
        abs(perdida_norm_teo(end,1) - perdida_norm_exp(end)) / perdida_norm_exp(end) * 100, ...
        abs(perdida_norm_teo(end,2) - perdida_norm_exp(end)) / perdida_norm_exp(end) * 100)

```

Apéndice C: Dimensiones del prototipo de secadora de cacao con chimenea solar

Figura 10. Dimensiones del prototipo de chimenea solar – cámara de secado; cotas en milímetros [mm]

