# EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA GRANOS DE CACAO (Theobroma Cacao L)

# MARYLI JESSENIA BOHORQUEZ PEÑA KEVIN ESTEBAN GARZÓN ALONSO

# Trabajo de grado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Agroindustrial

Director MELANIE TERESA RAMÍREZ JARAMILLO MSc. Ingeniería Agroindustrial

Codirector JAIME DANIEL BUSTOS VANEGAS PhD. Ingeniería Agroindustrial

UNIVERSIDAD DEL TOLIMA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRONÓMICA PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL IBAGUÉ – TOLIMA

2021

.



#### FACULTAD DE INGENIERÍA AGRONÓMICA COMITÉ DE INVESTIGACIONES ACTA DE SUSTENTACIÓN

Acta No.	2	02	1-	07	,
		ż			F
10	1	Ż	23	88	17

#### Estudiante: MARYLI JESSENIA BOHORQUEZ PEÑA y KEVIN ESTEBAN GARZÓN ALONSO

Eastaras Evaluadas	Ponderación Jurado 1 Jurado 2 Definitiv	5
Fecha Sustentación:	19/11/2021	and and a
JURADO No.2:	ISABEL CRISTINA PAZ ASTUDILLO	2.00
JURADO No.1:	HENRY ALEXANDER VAQUIRO HERRERA	
PROGRAMA:	INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL	33
CODIRECTOR:	JAIME DANIEL BUSTOS VANEGAS	writed to
DIRECTOR:	MELANI TERESA RAMÍREZ JARAMILLO	
TITULO DEL TRABAJO:	EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA GRANOS DE CACAO (Theobro Cacao L)	oma
		and the second se

Factores Evaluados	Ponderación	Jurado 1	Jurado 2	Definitiva
Relevancia Científica	30%	5.0	5.0	1.50
Complejidad y Profundidad	20%	5.0	5.0	1.00
Calidad Estructural	10%	5.0	5.0	0.50
Estilo y Presentación	10%	4.5	4.8	0.47
Sustentación - Preparación 🦯	10%	5.0	5.0	0.50
Sustentación - Claridad	10%	5.0	5.0	0.50
Sustentación - Respuestas 🔛	- A10% A	-A5.0	AD 5.0	0.50
NOTA DEFINITIVA			-	5.0

Calificación cualitativa:

LAUREADA

MELANI TERESA RAMÍREZ J. Director de Trabajo

HENRY ALEXANDER VÁQUIRO H. Representante de los jurados

ISABEL CRISTINA PAZ A. Coordinador - Comité de Investigaciones

Universidad del Tolima – Acreditada de Alta Calidad - NIT: 890.700.640-7 Barrio Santa Helena Parte Alta | Código Postal N° 730006299 – Teléfonos: +57 (8) 2 771212 – 018000181313 Ibagué - Tolima - Colombia

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por habernos acompañado en todo el proceso académico.

A nuestros familiares que siempre confiaron en nosotros brindándonos apoyo incondicional, en especial a nuestros amados padres, cuyas palabras de aliento nos llenan de fortaleza, a nuestros hermanos por llenarnos de alegría en cada momento.

A los Ing. Melanie Ramírez y Daniel Bustos por su tiempo, dedicación y conocimientos brindados en la elaboración de este trabajo de grado.

A todos los docentes que nos acompañaron en el proceso de formación, como a los compañeros con quienes construimos vínculos de gran valor para nuestra vida profesional.

A nuestros amigos que, aunque ya no están con nosotros siempre recordaremos su compañía en los desvelos, en los buenos y malos momentos.

# CONTENIDO

ΙΝΤ		15
1.	JUSTIFICACIÓN	16
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
3.	OBJETIVOS	19
3.1	OBJETIVO GENERAL	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4.	MARCO DE REFERENCIA	20
4.1	MARCO TEÓRICO	20
4.1	<b>.1</b> . Producción de cacao	20
4.1	.2 Condiciones climáticas del Tolima	20
4.1	<b>.2.1</b> Precipitación	21
4.1	<b>.2.2</b> Temperatura	21
4.1	<b>.2.3</b> Humedad Relativa	21
4.1	.2.4 Radiación solar	21
4.1	<b>.2.5</b> Viento	21
4.1	.3 Postcosecha del Cacao	21
4.1	.3.1 Fermentación del cacao	22
4.1	.3.2 Secado del cacao	22
4.1	.4 Métodos de secado	23
4.1	.4.1 Secado tipo gabinete y colector solar	24
4.1	.5 Análisis térmico de los colectores solares	25
4.1	<b>.5.1</b> Calor Útil	26
4.1	.5.2 Transferencia de calor por conducción.	27
4.1	.5.3 Transferencia de calor por convección	27

4.1.5.4 Transferencia de calor y materia en secado	
4.1.6 Almacenamiento de Energía Térmica	
4.1.7 Sistemas de almacenamiento de energía térmica:	
4.1.8 Curvas de secado.	
4.1.9 Modelos matemáticos de cinética de secado	
4.1.10 Difusión y Ley de Fick.	
4.1.11 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).	
4.1.12 Ecuaciones de gobierno en la dinámica de fluidos computacional	
4.1.13 Modelos de Turbulencia.	
4.1.13.1 Direct Numerical Simulation (DNS).	
4.1.13.2 Large-Eddy Simulation (LES)	
4.1.13.3 Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)	
4.1.14 Procedimiento general de un modelo CFD.	39
4.1.15 Geometría.	40
4.1.16 Mallado	40
4.1.17 Propiedades del fluido y condiciones de frontera del modelo numérico	41
4.1.18 Pre-procesamiento.	41
4.1.19 Post-procesamiento.	41
4.1.20 Aplicación de CFD en sistemas de secado por convección	42
5. METODOLOGÍA	
5.1 ÁREA DE ESTUDIO	44
5.2 CINÉTICA DE SECADO	44
5.2.1 Material vegetal y adecuación de la muestra.	
5.2.2 Equipos y procedimiento.	44
5.2.3 Determinación del contenido de humedad inicial.	45
5.2.4 Construcción de las curvas de secado y Modelado Matemático	45
5.2.5 Coeficiente difusivo (Df) y energía de activación (Ea)	47
5.3 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO Y DESCRIPCIÓN DEL S	ISTEMA
DE SECADO.	47
5.3.1 Evaluación y análisis de los sistemas de almacenamiento térmico	

5.3.2 Equipo de medición para temperatura y humedad relativa	.49
5.3.3 Condiciones climáticas de la zona de estudio	. 50
5.4 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR	. 51
5.4.1 Simulación computacional del flujo de aire a través de las bandejas	. 51
5.4.2 Dinámica de flujo de aire al interior del prototipo de secador solar	. 52
5.4.4.1 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor	.54
5.4.5. Modelado de turbulencias	. 55
5.4.6 Validación del Modelo	.55
5.4.7 Post procesamiento	. 55
5.4.8 Modificación al diseño de prototipo de secador solar propuesto	. 56
6. RESULTADOS	. 57
6.1 CINÉTICA DE SECADO EN CAPA DELGADA EN EL LABORATORIO	. 57
6.1.1 Curvas de secado y velocidad de secado:	57
6.1.2 Ajuste de las curvas de secado - modelación matemática	. 58
6.1.3 Determinación del coeficiente de difusividad efectiva (Deff) y Energía de Activac	ión
(Ea)	. 61
6.2 COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO DE SECADO Y EVALUACIÓN	DE
SISTEMAS AUXILIARES	.63
6.2.1 Características generales del proceso de secado sin sistema auxiliar	. 63
6.2.2 Evaluación y análisis de los sistemas de almacenamiento térmico	. 65
6.3 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL FLUIDO EN EL SOFTWARE ANSYS C	FX
	. 69
6.3.1 Validación de los resultados	. 69
6.3.2 Simulación computacional del flujo de aire a través de las bandejas	. 70
6.3.3 Post procesamiento - análisis del contorno de temperatura	.72
6.3.4 Análisis de contorno de velocidad y vectores de velocidad 2D.	.76
6.3.5 Modificaciones al diseño de prototipo de secador solar propuesto	. 77

7. CONCLUSIONES
7. CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES	. 84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. 85
ANEXOS	. 97

# LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de secadores según su clasificación    23
Tabla 2. Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de secado. 46
Tabla 3. Propiedades de los distintos medios de almacenamiento de energía.         49
Tabla 4. Condiciones de frontera usadas en la simulación
Tabla 5. Conductividad térmica de los materiales y fluido del modelo
Tabla 6. Condiciones de contorno y características de la chimenea.         56
Tabla 7. Resultados del análisis de regresión de los modelos de cinética de secado58
Tabla 8. Valores de las constantes Deff y valores de los parámetros de Arrhenius
(Ecuación 29) para los diferentes tratamientos de temperatura estudiados61

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Secador solar de gabinete indirecto.    25
Figura 2. Curva de secado típica
Figura 3. Etapas de procesamiento en software de CFD40
Figura 4. Horno THERMOLAB convección forzada
Figura 5. Esquema con medidas del prototipo de deshidratador solar de cacao elaborado
en SpaceClaim
Figura 6. Datalogger CEM DT-17150
Figura 7. A) Dominio computacional y B) Planos utilizados para calcular la caída de
presión a través de granos de cacao52
Figura 8. Curvas de secado para granos de cacao en función de la razón de humedad
contra tiempo para cada tratamiento57
Figura 9. Curvas de secado experimentales y ajustadas al modelo de Page para las
diferentes temperaturas de trabajo (30, 40, 50 y 60 °C)60
Figura 10. Correlación logarítmica para las curvas de secado a cada temperatura (°C)
versus tiempo de secado (s)61
Figura 11. Correlación exponencial de la difusividad (Deff) a 30, 40, 50 y 60 °C de granos
de granos fermentados
Figura 12. Temperatura en las diferentes zonas de la cámara sin sistema auxiliar y
ambiente vs tiempo
Figura 13. Humedad relativa en las diferentes zonas de la cámara sin sistema auxiliar y
ambiente vs tiempo
Figura 14. Temperatura parte media de la cámara con los sistemas auxiliares vs tiempo.
Figura 15. Humedad relativa parte media de la cámara con los sistemas auxiliares vs
tiempo
Figura 16. Temperatura de los sistemas auxiliares junto a la operación de resistencia
eléctrica parte media vs tiempo

Figura 17. Humedad de los sistemas auxiliares junto a la operación de resistencia Figura 18. Gráfico de temperatura frente a la radiación solar para las temperaturas promedio registradas experimentalmente por cada datalogger y simuladas de los puntos de medición en cada intensidad horaria.....70 Figura 19. Contorno de presión para una velocidad de entrada de aire de 2,0 m/s. Granos remplazados por geometría elipsoide (a); bandejas como medio poroso (b)......71 Figura 20. Caída de presión en función de la velocidad de entrada del aire. Datos calculados por la Ec. (30) (línea). Simulación CFD (puntos)......71 Figura 21. Contorno de temperatura (sección transversal central). Condición de radiación Figura 22. Representación del volumen del fluido y temperatura correspondiente (sección transversal central). Condición de radiación 300 W/m^2 (a); 600 W/m^2 (b); 1000 W/m^2 Figura 23. Contorno de la densidad del fluido (sección transversal central). Condición de radiación 300 W/m^2 (a); 600 W/m^2 (b); 1000 W/m^2 (c).....73 Figura 24. Variación de la temperatura en la altura del secador (sección transversal central) para cada condición de flujo de calor 300 W/m<sup>2</sup> (a); 600 W/m<sup>2</sup> (b); 1000 W/m<sup>2</sup> (c)......75 Figura 25. Contorno de velocidad del flujo de aire (sección transversal central). Figura 26. Vectores de velocidad 2D (sección transversal central). Condición de radiación 300 W/m<sup>2</sup> (a); 600 W/m<sup>2</sup> (b); 1000 W/m<sup>2</sup> (c)......77 Figura 27. Contorno de velocidad. Prototipo con adición de ducto - efecto chimenea (1,5 Figura 28. Contorno de velocidad del flujo de aire modificando la longitud del ducto efecto chimenea. Radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>. Longitudes 1,5 m (a), 2,0 m (b), 2,5 m (c) 3,0 Figura 29. Contorno de velocidad. Prototipo sin modificación (a); prototipo con modificaciones de ducto de 3 m en el centro superior de la cámara con variación de 5° a 

Figura	30.	Distribución	del	flujo	de	aire	en	el	prototipo	sin	modificaciones	(a);	con
modifica	acior	nes											81

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Dimensiones promedio del grano de cacao (Theobroma L) seco estudiado en
laboratorio
ANEXO B. Muestras de granos de cacao seco obtenidos en laboratorio para las
diferentes condiciones de temperatura estudiadas (30, 40, 50 y 60 °C)
ANEXO C. Gráficas obtenidas en Matlab R2011b versión estudiantil para cinética de
secado ajustadas a los diferentes modelos matemáticos y sus parámetros
ANEXO D. Prototipo de secador solar para cacao (Theobroma L)
ANEXO E. Sistemas de almacenamiento térmico auxiliar probados en el prototipo de
secado99
ANEXO F. Dataloggers para registro de temperatura y humedad relativa empleados. 99
ANEXO G. Modelo 3D de la cámara de secado (a) sin geometrías de malla (b) con
geometrías de malla99

## RESUMEN

La operación de secado de granos de cacao es una etapa crítica en la postcosecha con el fin de obtener chocolate de alta calidad. Durante ésta, se debe garantizar que los compuestos precursores del sabor y aroma se conserven hasta la etapa de tueste, asegurando la inocuidad del producto. A través de un abordaje teórico y experimental, esta investigación evaluó el desempeño térmico y fluidodinámico de un secador solar para granos de cacao (Theobroma cacao L) acoplado a diferentes sistemas de almacenamiento térmico: depósito de agua en garrafas PET, depósito de parafina, piedras volcánicas y resistencia eléctrica. El sistema sin acoples fue simulado mediante un análisis en CFD evaluando parámetros de flujo y distribución de temperatura. La cinética de secado de los granos de cacao fue evaluada en condiciones de laboratorio a temperaturas controladas de 30, 40, 50 y 60 °C. La velocidad de secado aumentó con el incremento de temperatura; obteniendo valores de difusividad efectiva entre 1,0504 x10<sup>-</sup> <sup>11</sup> m²/s v 3.1749 x10<sup>-11</sup> m²/s, energía de activación de 30,187 KJ/mol y factor de Arrhenius de 1,578 x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s. El sistema auxiliar con parafina y la resistencia eléctrica contribuyeron a mantener la inercia térmica del secador durante las noches, registrando temperaturas entre 5 y 11 °C por encima de la temperatura ambiente exterior. Los resultados del análisis en CFD muestran que regiones de flujo con bajas fuerzas de empuje y flujo estancado dan condiciones adversas para el progreso del secado. Para promover un mejor flujo de aire al interior del equipo, se simula la incorporación de un ducto central de efecto chimenea para la salida del aire húmedo, junto con una modificación en la inclinación del colector. Estas modificaciones logran mejorar la homogeneidad del flujo de aire al interior del secador.

#### PALABRAS CLAVE:

Prototipo; cinética de secado; almacenamiento térmico; dinámica de fluido computacional.

#### ABSTRACT

To obtain high quality chocolate, the cocoa bean drying operation is a critical stage in the post-harvest process. During this, it must be guaranteed that the flavor and aroma precursor compounds are preserved until the roasting stage, assuring the safety of the product. Through a theoretical and experimental approach, this research evaluated the thermal and fluid dynamic behavior of a solar dryer for cocoa beans (Theobroma cacao L) using different thermal storage systems: plastic bottles (PET) filled with water, a paraffin deposit, volcanic stones, and an electrical resistance. The system without a thermal storage was simulated by a Computational Fluid Dynamics (CFD) that evaluate the flow parameters and temperature distribution. The drying kinetics of the cocoa beans were evaluated under laboratory conditions at controlled temperatures of 30, 40, 50 and 60 ° C. As a result, the drying speed increases with the increase of temperature, getting values of effective diffusivity between 1.0504 x10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s and 3.1749 x10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s, Activation Energy of 30.187 KJ/ mol and Arrhenius factor of 1.578 x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s. The thermal storage systems that contributed most to maintain the thermal inertia of the dryer during the nights were the paraffin deposit and the electrical resistance, registering temperatures between 5 and 11 °C above the external temperature. Results of the CFD analysis show that flow regions with low thrust forces and stagnant flow give adverse conditions for drying progress. To promote better air flow inside the solar dryer a central chimney-effect duct for the exit of humid was added, along with a modification in the inclination of the collector. The proposed modifications can improve the homogeneity of the air flow inside the dryer.

### **KEYWORDS**

Prototype; drying kinetics; thermal storage; computational fluid dynamics (CFD)

### INTRODUCCIÓN

La producción de cacao presenta gran importancia socioeconómica en Colombia, siendo uno de los productos con mayor enfoque en el desarrollo de nuevas prácticas de procesamiento, incluyendo mejoras en los métodos de producción, cosecha y post cosecha (Fedecacao, 2017).

Una de las técnicas más habituales que influyen sobre los métodos de producción y calidad organoléptica del cacao, es el proceso de secado, siendo el proceso directo al sol la técnica más utilizada habitualmente. Este método ha reportado desventajas importantes asociadas a la calidad del proceso, como mayor tiempo de secado, contaminación cruzada, dificultad para controlar el proceso, infestación por insectos y aves, variabilidad de condiciones climáticas, requisitos de área de secado grande y costos laborales elevados (Agrawal & Sarviya, 2016).

Todas estas limitaciones en el secado abierto al sol han llevado al desarrollo de otros dispositivos de secado, siendo el sistema en mixto de gabinete y colector solar una alternativa para optimizar la energía térmica solar y proteger el producto durante la operación. Para entender y controlar el fenómeno de secado es necesario conocer las propiedades del grano que controlan el movimiento de humedad durante el proceso. En el presente proyecto se analizó la cinética de secado de granos de cacao bajo condiciones controladas de laboratorio, analizando la cinética del fenómeno. A su vez, se evaluaron diferentes sistemas auxiliares de almacenamiento térmico en un secador solar tipo gabinete y colector solar, con el fin de brindar condiciones de estabilidad en las variables estudiadas en el proceso. Por último, empleando herramientas de modelación y simulación en mecánica de fluidos computacional, se analizaron configuraciones del secado.

### 1. JUSTIFICACIÓN

El mercado mundial de productos procesados a base de cacao viene presentando una creciente demanda a nivel mundial pues cada día más personas de diferentes países se deleitan adquiriendo este tipo de alimentos, siendo los mayores productores Ghana y Costa de Marfil con el 77% de la producción estimada en 5.024 millones de t para el los años 2020/2021 (Hernández, 2021). El Caribe y América Latina se destacan como los principales productores de las variedades de cacao fino y aroma, con cerca del 90% de la producción mundial. En Colombia, la producción de cacao para los años 2019 y 2020 fue de 59.740 y 63.416 t respectivamente destacando Santander, Antioquia, Arauca, Huila y Tolima como los mayores productores; dicha labor es desarrollada por cerca de 25.000 familias campesinas, donde el 90% de la producción es responsabilidad de pequeños agricultores (SAC, 2019; FINAGRO, 2020).

El sector cacaotero ha realizado diferentes esfuerzos por mejorar los diferentes procesos de transformación del grano, sin embargo, es la ausencia de nuevas investigaciones trae consigo dificultades para alcanzar nuevos mercados y favorecer a los agricultores que realizan un beneficio tradicional y artesanal del cacao, donde la calidad juega un papel importante sobre el valor del mismo (Varón, 2019). Según expertos, la calidad final del grano depende de factores como genética, suelo, estación y proceso post cosecha; en este último, la fermentación y el secado son los procesos que más influyen en la calidad final del cacao, siendo el secado el proceso donde se completan los cambios bioquímicos que suceden en la fermentación disminuyendo la humedad y desarrollando características únicas del chocolate (Gutiérrez, 2013). Donde, actualmente los sistemas tradicionales de secado empleados son al sol directo, pero es la intermitencia de esta fuente de energía y la exposición a diferentes factores ambientales lo que afecta la homogeneidad del secado, disminuyendo la eficiencia del proceso y calidad del producto. En el presente estudio, a través de un abordaje experimental y teórico, se evaluó un prototipo de secador térmico solar como alternativa frente a los sistemas tradicionales de secado de cacao.

### 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cacao es una especie útil cultivada en el departamento del Tolima desde el siglo XVII y desde entonces muchas han sido las acciones aplicadas para el mejoramiento productivo (Gobernación del Tolima, 2019). Sin embargo, las cifras de participación en la producción nacional en el 2020 disminuyeron cerca del 4% comparado con el año del 2019 con una producción de 4.312 t (MINAGRICULTURA, 2019; MINAGRICULTURA. 2021; Parra H., 2021). El departamento del Tolima se muestra con considerables desventajas competitivas frente a otros sectores mostrando un bajo rendimiento en producción, procesamiento, calidad y valor del producto (Gobernación del Tolima, 2019). Este escenario evidencia la necesidad de aplicar estrategias que permitan una mejora productiva a través de la investigación científica e implementación de nuevas tecnologías.

Un factor muy importante que influye sobre la calidad organoléptica del cacao es el buen manejo postcosecha empleado; entre los procesos más relevantes se encuentran la fermentación y secado del cacao (Pérez, 2017). Este último es crítico, puesto que allí ocurre frecuentemente el deterioro composicional de los granos. En el proceso de secado se detiene la actividad enzimática, produciendo reacciones químicas que disminuyen características de amargor y astringencia en los granos de cacao, pasando del 45-60% de humedad al finalizar la fermentación, a un 7-8% de humedad necesario para su manipulación, almacenamiento y procesamiento. En adición a lo anterior, si el proceso de secado no es controlado, se producirán daños microbiológicos y físicos en los granos que afectarán negativamente sus características sensoriales y desfavorecerán su comercialización.

Los diferentes métodos de secado empleados, actualmente no garantizan la calidad final del producto. Entre estos, los tradicionales, directos al sol y los no tradicionales o mecánicos. En los no tradicionales se encuentra el secado en horno, que genera características inapropiadas para el grano tales como, sabor y aromas desagradables debido a los gases de combustión en contacto directo con el producto (Tinoco & Ospina, 2010).

En el Tolima existe un alto desconocimiento de alternativas tecnológicas poscosecha, así como de sus beneficios. Por lo anterior, mediante este proyecto de investigación, se evaluó un prototipo de tecnología limpia, accionada por energía solar y convección natural, que pueda ser usado para el secado de granos de cacao. Se estudió el comportamiento de secado de granos de cacao bajo condiciones controladas de laboratorio para identificar la temperatura y tiempo de procesamiento en el producto. Además, se evaluaron diferentes mecanismos de almacenamiento térmico auxiliar, identificando aquellos que brindan mayores condiciones homogéneas de temperatura y humedad al interior del prototipo deshidratador, favoreciendo la eficiencia del proceso de secado de los granos de cacao. Se usaron métodos experimentales y herramientas de modelización y simulación aplicadas en CFD; que permitieron estimar la dinámica de flujo de aire al interior del prototipo de secador solar evaluado, variando la configuración geométrica del prototipo.

### 3. OBJETIVOS

## **3.1** OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento térmico y fluidodinámico de un secador solar para granos de cacao (*Theobroma cacao L*).

### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar la cinética del proceso de secado de granos de cacao.
- Medir y comparar diferentes sistemas auxiliares de almacenamiento térmico para un prototipo de secador solar tipo gabinete.
- Implementar un modelo matemático haciendo uso de una herramienta de simulación en CFD para estimar la dinámica de flujo de aire al interior del prototipo de secador solar evaluado.

### 4. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1 MARCO TEÓRICO

**4.1.1**. Producción de cacao: En Colombia, la producción de cacao para los años 2019 y 2020 fue de 32 mil y 63 mil t respectivamente destacando los departamentos Santander, Antioquia, Arauca, Huila y Tolima como los mayores productores. El incremento de la producción se debe en su mayoría al manejo contra las plagas y enfermedades, programas de fertilización, renovación y buen manejo de postcosecha (Fedecacao, 2019; FINAGRO, 2020).

El Tolima es actualmente el cuarto productor de cacao a nivel nacional con una producción de 5.312 toneladas distribuido en 10 municipios del departamento, destacando en el sur a Chaparral como el mayor productor, a él se suman Rioblanco, Ataco, Planadas y Prado; al norte del departamento, en municipios como Lérida, Fresno, Falan y Rovira. En los últimos años se ha incrementado el interés en el departamento por el procesamiento pos cosecha de diferentes productos del agro, un ejemplo de esto, es el proyecto denominado "Cacao Norte del Tolima" en el año 2019; el cual, fue financiado por la embajada Suiza en INNPULSA y ejecutado por la Cámara de Comercio de Ibagué, en donde se puso en marcha una planta de transformación de cacao en el municipio de Mariquita. Buscando impactar positivamente en las diferentes familias productoras y la economía del departamento, el proyecto logró la unión de cinco asociaciones cacaoteras que conforron la Cooperativa Riqueza Ancestral para dar paso a la comercialización a nivel nacional e internacional de los subproductos de este fruto (Caracol, 2021).

**4.1.2** Condiciones climáticas del Tolima. El departamento del Tolima se encuentra ubicado entre los 400 m de altitud en la zona plana y 5.400 m en los nevados del Tolima y Ruiz en la cordillera Central. Su ubicación determina una serie de factores climáticos entre los cuales, se encuentran los diferentes niveles de precipitación, humedad relativa, temperatura, brillo solar y vientos que determinan la variedad de climas y biodiversidad; los cuales, se ven influenciados por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCTI), los

vientos alisios y la altitud sobre el nivel del mar (Asociación Hortofrutícola de Colombia (ASOHOFRUCOL, 2013). Esta situación le permite producir frutas de diferentes especies durante todo el año, entre estas la especie *Theobroma cacao L*. Las principales condiciones climáticas del departamento son:

**4.1.2.1** Precipitación. La mayor cantidad de lluvias, con oscilaciones entre 2.500 y 3.000 mm anuales se presentan al norte del departamento y las menores entre 1.000 y 1.500 mm al oriente de este. Este régimen de lluvias se presenta en épocas de marzo-abrilmayo y septiembre-octubre-noviembre (IDEAM, Introducción al Atlas Interactivo, 2015)

**4.1.2.2** Temperatura. Las temperaturas máximas en el departamento según el IDEAM, (2015) se registran a lo largo de las riberas del río Magdalena, con valores superiores a los 30 °C. Las temperaturas medias se encuentran en el sur del valle del río Magdalena con temperaturas entre los 23 - 25 °C, y sobre las estribaciones, especialmente las correspondientes a la cordillera central, la temperatura disminuye hasta alcanzar los 15 - 18 °C sobre los picos nevados (IDEAM, 2020).

**4.1.2.3** Humedad Relativa. En Ibagué, capital del departamento, la humedad relativa del aire oscila durante el año entre 65 y 83 %, presentando los puntos máximos durante las épocas lluviosas del segundo y cuarto trimestre (IDEAM, Introducción al Atlas Interactivo, 2015).

**4.1.2.4** Radiación solar. Según el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia (IDEAM & UPME, 2017) el promedio mensual de irradiación global media recibida en la superficie del departamento oscila entre los 4,0 y 5,5  $\frac{KW}{m^2}$  con mayor incidencia en el tercer trimestre del año y mayor frecuencia sobre las zonas del sur del Tolima. Durante las épocas de lluvia la insolación es de 4 horas/día mientras que, en temporadas secas puede llegar hasta 6 horas/día (IDEAM, Introducción al Atlas Interactivo, 2015).

**4.1.2.5** Viento. Según IDEAM y UPME (2017) las velocidades del viento en el valle del Magdalena en el departamento del Tolima se encuentran generalmente alrededor de los 2 y 7  $\frac{m}{s}$  que se identifican sobre el área marítima y litoral Caribe.

**4.1.3** Postcosecha del Cacao. Un factor importante que influye directamente sobre la calidad organoléptica del cacao es el buen manejo post cosecha empleado; entre los

procesos más relevantes se encuentran la fermentación y secado del cacao (Swisscontact, 2017).

**4.1.3.1** Fermentación del cacao. En este proceso, ocurren una serie de transformaciones fisicoquímicas en los granos de cacao, bajo condiciones adecuadas de humedad relativa y temperatura. Allí, ocurre una primera fase de reacciones alcohólicas, donde las almendras están recubiertas por los azúcares del mucílago, estos azúcares son fermentados en alcohol y anhídrido carbónico por levaduras para luego ser convertidos en ácido acético; a su vez, ocurre la muerte del embrión aumentando la permeabilidad de las paredes celulares, destruyendo las células pigmentadas del cotiledón donde, bajo una serie de reacciones hidrolíticas se genera un color púrpura de textura arriñonada y con ello el inicio del desarrollo característico de sabor a chocolate. Este proceso se complementa con la fase de oxidación en la cual, la mayor penetración de oxígeno en la almendra produce una transformación del sabor astringente de los cotiledones y con ello la condensación química de los compuestos polifenólicos en productos complejos volátiles solubles e insolubles que tienen poco o ningún sabor. Proceso que finaliza en el secado, donde se alcanza la humedad que impide que las reacciones enzimáticas continúen (Enriquez, 1985).

**4.1.3.2** Secado del cacao. Los granos que han finalizado el proceso de fermentación, contienen una humedad aproximada del 60%. Estos, son luego llevados el proceso de secado con el fin de completar los cambios físico - químicos, disminuir el contenido de humedad, la acidez y la astringencia que además de ser los precursores del sabor característico a chocolate, permiten el adecuado almacenamiento y conservación de los granos; lo que es posible cuando se alcanza un contenido de agua que oscila entre 6 - 7% en un proceso de secado a temperaturas menores a 60 °C, si por el contrario, se tienen humedades inferiores se producen granos quebradizos; humedades superiores generan proliferación de hongos y ataque de insectos (Alean, 2012). En cuanto a la disminución de la humedad del grano, esta debe realizarse de manera lenta y gradual con el fin de garantizar la continuación del proceso de oxidación iniciado en la fermentación, donde se producen una serie de reacciones térmicas responsables del sabor; evaporación del ácido acético debido a su carácter volátil; síntesis de aldehídos por reacciones de Strecker; reacciones de pardeamiento no enzimático vía Maillard y

formación de pigmentos marrones por las reacciones de condensación de la quinona que se producen luego de la oxidación enzimática de polifenoles (pardeamiento enzimático) (Swisscontact, 2017; Puziah, Jinap, & Asbi., 1999; Ortiz, Graziani, & Rovedas, 2009). El secado tiene una serie de principios técnicos, el principal es retirar por evaporación la cantidad de agua contenida en la superficie de un producto, siendo su velocidad dependiente de la temperatura y del caudal de aire que circula este alrededor de la superficie. Este aire además de contener agua tiene la capacidad de absorber vapor de agua, la cual, se conoce como humedad relativa y es dependiente en gran medida de su temperatura; a mayor temperatura menor será la cantidad de energía necesaria para su cambio de estado, por tanto, ocurre una deshidratación o secado del producto acelerada. **4.1.4** Métodos de secado. La clasificación de los secadores está determinada por varios criterios, entre estos, la clasificación de numerosos esquemas según el método propuesto por Chavan y otros (2020), definiendo los métodos de operación, suministros de energía y requerimientos térmicos. Algunos de los criterios de clasificación se observan en la Tabla 1.

Clasificación	Tipos		
Modo de operación	• Lote		
	• Continuo		
Tipo de entrada de calor	Convección, conducción, radiación, campos		
	electromagnéticos, combinación de modos de		
	transferencia de calor		
	Intermitente o contínuo		
	<ul> <li>Adiabático o no adiabático</li> </ul>		
Estado del material en	Estacionario		
secadora	• En movimiento, agitado, disperso		
Presión operacional	• Aspiradora		
	Atmosférico		
Medio de secado por	• Aire		
convección	<ul> <li>Vapor sobrecalentado</li> </ul>		
	Gases de combustión		

					,		1
l abla	1	LIDOS	de	secadores	seaun	SU	clasificación
I UNIU	••	11000	ao	000000000	oogun	υu	oluoinouoloit

Temperatura de secado	Inferior a la temperatura de ebullición		
	<ul> <li>Superior a la temperatura de ebullición</li> </ul>		
	<ul> <li>Inferior al punto de congelación</li> </ul>		
Número de etapas	• Único		
	• Multietapa		

### Fuente: Chavan y otros (2020).

Cada tipo de secado tiene características específicas, que lo hacen adecuado según su aplicación. Por ello, es necesario conocer la gran variedad de secadores disponibles, así como sus ventajas y limitaciones especiales. Cabe señalar que la clasificación antes mencionada no incluye la mayoría de las nuevas tecnologías de secado, que son aplicables en áreas específicas.

**4.1.4.1** Secado tipo gabinete y colector solar. Estos sistemas indirectos, constan de un colector solar donde el aire se calienta y asciende hasta la cámara de secado donde se sitúan los elementos a secar sobre bandejas removibles. Cuenta una pequeña apertura en la parte inferior donde ingresa el aire fresco, mientras que, por la parte superior se elimina el aire que contiene parte de la humedad removida del producto (UNIDO, 1985). Generalmente se utiliza con la adición de un colector solar de placa plana para mayor transferencia de calor al fluido de secado (aire caliente) prototipo propuesto en esta investigación (Figura 1). El colector de placa plana y cubierta transparente permite mayor área para la transferencia de calor al aire de secado aprovechando la energía solar.

El sistema de secado tipo gabinete protege el producto a secar de cualquier factor externo, presenta bajos costes para su fabricación y aprovecha la radiación, disminuyendo el tiempo de secado y daños en el producto por exposición directa; además su estructura, facilita el manejo y la distribucion del mismo.

Figura 1. Secador solar de gabinete indirecto.



Fuente: (García, Mejía, & Mejía, 2012)

**4.1.5** Análisis térmico de los colectores solares. El análisis de los colectores solares implica problemas particulares de flujo de energía, bajos y variables, así como una gran relevancia de los problemas relacionados con los fenómenos de radiación. En los colectores de placa plana, la superficie absorbente es aproximadamente tan grande como el área total del colector que intercepta los rayos del sol, donde generalmente se diseñan colectores de placa plana para trabajar con temperaturas de placa absorbente comprendidas entre 40°C y 130°C; estos colectores utilizan tanto la radiación solar directa como la difusa, no requieren de sistemas de seguimiento solar y prácticamente no precisan de mantenimiento, siendo en su mayoría empleados para el calentamiento de fluidos (gas y aire) (López, 2011).

En cuanto a la energía que se transfiere a los alrededores del colector o paredes del sistema se considera que existen pérdidas pues no es aprovechada para realizar un trabajo; donde, actúan los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. Estos mecanismos se pueden representar a través del coeficiente conocido como Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U), inmerso en la relación que determina la tasa de calor transferida de un fluido a otro o de un sólido a otra ecuación (1):

### $Q = U_c A_c (T_p - T_a)$ Ecuación (1)

donde Ac es el área superficial de la placa absorbente, Tp es la temperatura de la placa absorbente, Ta es la temperatura ambiente. En una suposición donde la transferencia de calor a través de una pared se da de forma unidireccional y en estado estacionario, se

puede resolver la ecuación a partir del concepto de resistencias térmicas representado a partir de la ecuación (1.1) y (1.2).

$$U_T A_T = \frac{1}{R_T}$$

$$Ecuación (1.1)$$

$$R_T = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{x}{K.A} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$Ecuación (1.2)$$

Donde  $\frac{1}{h_i A_i}$  es la resistencia térmica asociada a la convección desde el fluido caliente hacia la pared que separa ambos fluidos.

 $\frac{x}{KA}$  es la resistencia térmica asociada a la conducción a través de la pared que separa ambos fluidos.

 $\frac{1}{h_o A_o}$  es la resistencia térmica asociada a la convección desde la pared que separa ambos fluidos hacia el fluido frío.

**4.1.5.1** Calor Útil. Este calor útil (Qu) del colector, es aquel ganado por el fluido de trabajo. Según lo indicado por Duffie y Beckman (1980), para el cálculo del calor útil del aire se pueden emplear las siguientes ecuaciones (2), (3) y (4):

$$Q_{U} = \begin{bmatrix} S & U(T_{pm} - T_{a}) \end{bmatrix} = A_{c} \begin{bmatrix} \tau_{g} \alpha_{p} I_{T} & U_{I}(T_{pm} - T_{a}) \end{bmatrix} \quad Ecuación (2)$$

$$Q_{U} = \dot{m} C_{P} (T_{O} - T_{i}) \qquad Ecuación (3)$$

$$Q_{U} = A_{C} F_{R} \begin{bmatrix} S - U_{I} (T_{i} - T_{a}) \end{bmatrix} \qquad Ecuación (4)$$

Donde  $A_c$ , es el área efectiva del colector, S es la radiación solar absorbida por unidad de área, U es el coeficiente global de transferencia de calor,  $T_{pm}$  es la temperatura media de la placa,  $T_a$  es la temperatura ambiente,  $\tau_g$  es la transmitancia del vidrio,  $\alpha_p$  es la absorbancia de la placa,  $U_I$  es el coeficiente global de pérdidas del colector,  $\dot{m}$  es el flujo másico,  $C_P$  es el capacidad calorífica,  $T_o$  es la temperatura de salida y  $T_i$  es la temperatura de entrada.

 $F_R$  es el factor de remoción de calor y es dado por:

$$Fr = \frac{m_{fluido} \cdot CP_{fluido} (T_f - T_a)}{A_C \cdot (S - U_L \cdot (T_{f1} - T_a))}$$
 Ecuación (5)

Donde, UL es el coeficiente global de pérdidas de calor,  $m_{fluido}$  caudal másico del fluido,  $T_f y T_{f1}$  son las temperaturas de entrada y salida del fluido respectivamente y  $T_a$  la temperatura ambiente. **4.1.5.2** Transferencia de calor por conducción. La conducción ocurre cuando dos objetos de diferentes temperaturas entran en contacto, creando un gradiente térmico que estimula la vibración molecular del sólido; permitiendo que la energía se transfiera al sólido de mayor temperatura al sólido de menor temperatura. Este intercambio de calor está determinado por el tipo de material a evaluar y la estimulación del gradiente térmico existente.

**4.1.5.3** Transferencia de calor por convección. Este mecanismo de transferencia de calor se rige por la ley de enfriamiento de Newton y ocurre en superficies sólidas en contacto con fluidos en movimiento. Esto, se debe fundamentalmente al hecho de que las partículas del fluido donde se presenta el flujo de calor se encuentran en movimiento, siendo proporcional a la diferencia de temperaturas pues entre mayor sea el movimiento mayor es la tasa de transferencia de calor; este comportamiento se encuentra implícito en el coeficiente de transferencia de calor (Bergman et al, 2011) y se puede expresar a través de la ecuación (6).

$$Q = h_{S}A(T_{g} - T_{sup})$$
 Ecuación (6)

Donde Q es la velocidad de transmisión de calor,  $h_s$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A es el área a través de la cual tiene lugar el flujo de calor,  $T_g$  es la temperatura del aire y  $T_{sup}$  es la temperatura de la superficie que se está secando (Mora, 2018).

En la aplicación de cálculos para el presente estudio de transferencia de calor por convección se utilizan una serie de números adimensionales necesarios para el análisis del sistema. Estos son:

- Número de Nusselt (Nu). Nombrado así en honor a Wilhelm Nusselt, representa la transferencia de calor a través de un fluido causado por la convección y relacionado con la conducción a través de la misma capa de fluido. En otras palabras, entre mayor sea el número de Nusselt, más eficaz es la convección y si este número es bajo, significa que el fenómeno de conducción domina la transferencia de calor y es expresado por la ecuación (7):

$$Nu = \frac{h_c L_c}{k} \qquad Ecuación (7)$$

Donde,  $h_c$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección en el fluido (W/m<sup>2</sup>.K), k es el coeficiente de conductividad térmica del fluido (W/m.K),  $L_c$  es la longitud característica de la configuración geométrica (m).

 Número de Prandtl (Pr): Relaciona la difusividad efectiva y la cantidad de movimiento en función a la viscosidad, ecuación (8). Dicho de otra forma, representa qué tan rápido se disipa la cantidad de movimiento respecto al calor en un fluido determinado:

$$Pr = \frac{\mu Cp}{k} \qquad Ecuación (8)$$

Donde,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido (kg/m.s), Cp es el calor específico del fluido (kJ/kg.K), k es el coeficiente de conductividad térmica del fluido (W/m.K).

 Número de Reynolds (Re): este número predice el comportamiento de un fluido de acuerdo a la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Cuando las fuerzas viscosas son dominantes el flujo se denomina laminar y por el contrario cuando dominan las fuerzas de inercia el fluido se el flujo es turbulento, expresado en la ecuación (9).

$$Re = \frac{Fuerzas inerciales}{Fuerzas viscosas} = \frac{\rho. D. V}{\mu} = \frac{V. L_c}{v} \qquad Ecuación (9)$$

Donde, V es la velocidad del fluido (m/s),  $L_c$  es la longitud característica (m) (diámetro en el caso de tuberías), v es la viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s),  $\rho$  es la densidad (kg/m<sup>3</sup>), D diámetro de la tubería (m), y el  $\mu$  es la viscosidad dinámica (kg/m.s).

**4.1.5.4** Transferencia de calor y materia en secado. Durante el proceso de secado tienen lugar dos fenómenos de transporte, denominados transporte de calor y de masa. El transporte de calor actúa por mecanismos de convección, conducción o radiación; el transporte de materia, se da a través de propiedades como capilaridad y/o difusión a través del sólido desde la estructura interna hacia la superficie y removido por el aire que le rodea. Entre los factores más importantes que determinan la velocidad de secado, se encuentra la velocidad de suministro de calor al agua hasta el punto de llevarlo a su calor latente (Maupoey, Grau, Barat, & Albors, 2016). En los secadores por convección de aire caliente, la velocidad de transmisión de calor es expresada por la ecuación (6). Uno de los criterios de clasificación de tipos de secadores se basa en mecanismo de transmisión

de calor los cuales, repercuten notablemente en la cinética del proceso, por tanto, en los costos totales; asegurando el buen funcionamiento del uso de las fuentes de energía utilizadas en los equipos de secado.

**4.1.6** Almacenamiento de Energía Térmica. La energía almacenada temporalmente para luego ser utilizada en diferentes mecanismos brinda soluciones frente a las necesidades de disponibilidad e intermitencia de la misma. Por lo tanto, la funcionalidad del almacenamiento de energía térmica radica en guardar o acopiar cantidades de energía en forma de calor tomada en ámbitos como la producción eléctrica, radiación solar o del calor residual en procesos industriales a un considerado bajo costo para luego ser empleadas como suministro de calefacción, refrigeración e incluso energía para la red eléctrica; bajo diversas condiciones ambientales, como temperatura, ubicación o potencia (Ortega & Gutiérrez, 2021).

**4.1.7** Sistemas de almacenamiento de energía térmica: La energía que se almacena realiza un ciclo basado en la carga, el almacenamiento y la descarga energética según el sistema. Para que exista una eficiente cantidad de energía almacenada, los sistemas deben tener determinadas características entre estas, un material de almacenamiento con alta densidad de energía, buena conductividad térmica, estabilidad química y mecánica, reversibilidad completa de los ciclos y bajas pérdidas térmicas durante el periodo de almacenamiento (Mohana, y otros, 2020; Ortega & Gutiérrez, 2021).

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica se clasifican en tres tipos según Shuangmao & Liu, (2011) mediante el aprovechamiento del calor sensible de los cuerpos, a través del calor latente al cambiar de una fase a otra, o por medio de la energía involucrada en una reacción química.

 En los sistemas de calor sensible, la energía se almacena mediante el cambio de la energía interna de un material sólido o líquido mediante el aumento de su temperatura hasta ser la máxima de funcionamiento para luego entrar en la fase de descarga. Entre los fluidos más utilizados se encuentra el agua almacenada en tanques, pues cumple con las propiedades necesarias para seleccionarla como sistema de almacenamiento térmico, cumpliendo con propiedades como la densidad del material, el calor específico, la conductividad, entre otros (Ortega & Gutiérrez, 2021).

- En los sistemas de almacenamiento de calor latente, la temperatura se emplea para inducir un cambio de fase en el material de almacenamiento ya sea de solidificación, evaporación, condensación o sublimación. Los materiales en este tipo de sistemas son los denominados materiales de cambio de fase o PCM por sus siglas en inglés phase change material. Dichos materiales presentan algunas ventajas entre estas, su alta densidad de calor de almacenamiento, un reducido tamaño de sistema y un mínimo cambio de temperatura durante la carga y descarga de los procesos. Sin embargo, tiene algunas desventajas en cuanto a la separación de fases de algunos materiales, poca estabilidad a largo plazo, baja conductividad térmica o el coste elevado de los PCM (Reyes, Vásquez, & Sepúlveda, 2015).
- Los sistemas de almacenamiento térmico por reacción química consisten en la producción de calor bajo una reacción exotérmica del calor absorbido y producido por una reacción química reversible, es decir, se genera una reacción endotérmica cuando absorbe energía térmica y exotérmica con la descarga (Reyes, Vásquez, & Sepúlveda, 2015).
- Entre los sistemas PCM se encuentran los quemadores de biomasa y la parafina. En un estudio realizado por Gallo, Lugo, & Padilla, (2017) se diseñó, construyó y validó de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando material de cambio de fase (PCM) como fuente de almacenamiento térmico, para el secado de yuca. Este sistema híbrido consta de un ventilador centrífugo, dos colectores solares, un quemador de combustible sólido y una cámara de secado de bandejas. El quemador de biomasa permitió incrementar la temperatura del aire precalentado en los colectores 6°C en promedio, lográndose una eficiencia térmica en el quemador del 36,72%, manteniendo la temperatura del aire al interior del secador en los dos colectores solares a 46 ± 4, 29 °C y 51 ± 4,08 °C durante 45 min adicionales a una velocidad de secado de 2 m/s. Sin embargo, estos sistemas no son recomendables como combustible para procesos de secado de alimentos. Debido a que, el gas obtenido tras la combustión de la biomasa contiene humo, cenizas, trazas de N, CO2 y otros gases nocivos que no son adecuados para secar productos alimenticios.

Por otro lado, la cera de parafina como sistema PCM permite acumular energía aprovechando que su temperatura de fusión se encuentra entre 40 y 65 °C, variando según su composición. Este material no tóxico presenta un gran calor latente, bajo costo, es estable y no corrosivo lo que lo incluye dentro de los sistemas de almacenamiento más representativos, sin embargo, las ceras de parafina tienen baja conductividad térmica (0,24 Wm À1 K À1 ) y se presenta fuga de líquido cuando se someten al cambio de fase sólido-líquido; lo que reduce la tasa de almacenamiento y extracción de calor durante los ciclos de fusión y solidificación limitando así sus amplias aplicaciones (Bo He, 2000).

Entre los sistemas de almacenamiento de calor sensible se encuentran las piedras o rocas, el agua y las resistencias eléctricas. La conductividad térmica de un material se define por su capacidad para transferir calor, este coeficiente en las rocas suele estar en el rango de 0,40 a 7,00 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>. Los valores bajos son característicos de rocas sedimentarias, no consolidadas como gravas y arenas. Los valores más altos de conductividad térmica son para la mayoría de las rocas sedimentarias y metamórficas, de las cuales son utilizadas como lechos de rocas en invernaderos en los diferentes sistemas de secado, por su capacidad para retener el calor (Bistoni y otros, 2000).

El sistema de uso de agua en botellas PET al estar basado en el cambio de la capacidad de almacenamiento térmico de un material aislado debido a la variación de temperatura y sin cambio de fase, depende de las propiedades térmicas (calor específico, volumen, delta de temperaturas) (Bravo, 2018). Sus ventajas son el elevado calor específico, la no toxicidad, la gran disponibilidad y su rango de temperatura de funcionamiento que oscila entre los 8 y 90 °C (Martinez, 2020).

Las resistencias de alta densidad son capaces de brindar hasta 5 veces mayores densidades de potencia eléctrica con temperaturas de hasta 820°C (1500 °F). Presenta varias terminaciones para proteger los cables contra la flexión, humedad, abrasión, contaminación y para aplicaciones especiales. Se le denomina resistencia eléctrica a la igualdad de oposición que tienen los electrones al moverse a través de un conductor (Farrera, 2015).

**4.1.8** Curvas de secado. La variación de la humedad con respecto al tiempo es la denominada cinética del secado y depende del material que se desee trabajar, así como

también del tipo de mecanismo de secado que se utilice. Diferentes investigaciones la implementan frecuentemente para describir los mecanismos microscópicos y macroscópicos de transferencia de calor y masa durante el secado; afectada por las condiciones de secado, tipos de secador y características de los materiales a ser secados (Sánchez & Falla, 2019).

Las curvas de secado representan a través de un esquema la cantidad de humedad contenida en un sólido frente al tiempo de secado, donde según Barbosa & Vega, (2000) la velocidad de secado R, es proporcional al cambio en el contenido de humedad en función del tiempo. Dicha cantidad de humedad tiene dos formas de expresarse, una a través del contenido de humedad en base húmeda (XWB) y otra es en base seca (XDB), a continuación, se muestran sus respectivas ecuaciones:

$$X_{WB} = rac{m_{H2O}}{m_{H2O} + m_S}$$
 Ecuación (10). Contenido de humedad en base húmeda $X_{DB} = rac{m_{H2O}}{m_S}$  Ecuación (11). Contenido de humedad en base seca

Donde  $m_{H20}$  es la masa de agua contenida en el producto y ms el producto "totalmente seco" (Porras J. S., 2013).

El proceso de secado comprende tres fases fundamentales. La primera fase, es el periodo de inducción según el periodo de velocidad de secado creciente Figura 2. Allí, la superficie externa del producto presenta una capa delgada de líquido pues al iniciar el calentamiento, este no es suficiente para alcanzar el punto de evaporación. Por esta razón la velocidad de secado aumenta hasta que alcanza la velocidad crítica de secado (Vr) cuando la humedad es removida a una tasa de secado de introducción dando paso a la segunda fase, que es el periodo de velocidad de secado constante. Donde, la humedad superficial del sólido es removida casi que independientemente de la naturaleza del producto; presentándose la transferencia de materia de vapor de agua hacia el medio ambiente desde la superficie del producto a través de una película de aire que rodea el material y la transferencia de calor a través del sólido (Barbosa & Vega, 2000).

#### Figura 2. Curva de secado típica



Fuente: (Chapalbay & Reinoso, 2011)

Finalmente la tercera fase comprende un proceso de velocidad de secado decreciente, alcanzando el contenido de humedad crítico del sólido el cual, al encontrarse en la estructura del mismo y no solo en la superficie, depende de factores como la velocidad y temperatura del aire, el tamaño y forma de la partícula y de la difusión de humedad del interior del producto hacia la superficie definida por la naturaleza del mismo hasta llegar al contenido mínimo de humedad en el producto que se denomina como humedad en equilibrio,  $X_{ea}$  (Porras J. S., 2013)

**4.1.9** Modelos matemáticos de cinética de secado. Los modelos matemáticos son herramientas que permiten el análisis del comportamiento de sistemas en la realidad física a partir de ecuaciones, relaciones algebraicas y/o diferenciales, que relacionan las distintas variables del proceso, y los cuales se pueden llevar a cabo a través de una solución analítica o mediante simulación. Entre estos, se encuentran los modelos matemáticos para cinética de secado los cuales, tienen como objetivo predecir y seleccionar las mejores condiciones de operación, los requerimientos del proceso, comprender su funcionamiento, proponer mejoras de diseño, disminuir tiempos de procesamiento y mejorar la calidad del producto (Parra-Rosero, 2017; Collazo et al, 2018; Sánchez & Falla, 2019).

Se han realizado diferentes investigaciones con el fin de determinar ecuaciones para simular el proceso de secado de los alimentos agrícolas. Entre estas ecuaciones destacan las propuestas por Newton, Henderson-Pabis, Page, Page modificado,

Logarítmico, Midili, entre otros; de las cuales, su mayoría derivan del modelo difusional de la segunda ley de Fick para diferentes geometrías. Donde, el uso de las ecuaciones de capa delgada es necesario para comprender el mecanismo de transporte fundamental y requisito previo para simular o escalar el proceso de las condiciones de operación de secado de varios productos agrícolas en capas finas hasta que alcanzan el contenido de humedad de constante de una forma unificada, independientemente del mecanismo que controla al secado (Inyang et al, 2018).

Según Chinenye y Ogunlowo (2010), en su investigación, se simularon los procesos de secado natural y artificial (horno ventilado) de los granos de cacao. Donde se implementaron nueve modelos de secado empíricos y semiempíricos de capa fina publicados y se introdujo un nuevo modelo combinado (Page-Two term model). Allí, mediante análisis de regresión y comparando la determinación de coeficiente ( $R^2$ ), chicuadrado reducido ( $X^2$ ) y error cuadrático medio (RMSE), se identificó que el modelo de capa fina que mejor describe la cinética de secado a las condiciones probadas tanto de forma artificial como natural de granos de cacao, fue el modelo propuesto en el estudio el cual, a su vez presentó resultados similares al Modelo Midili - Kucuk.

La investigación sobre cinética de secado para cacao a diferentes condiciones reportadas en la literatura, han implementado modelos matemáticos de secado de capa fina entre estos, los de tipo semi teóricos o semi empíricos, empíricos y algunas propuestas de combinación, modificación y mayor ajuste de acuerdo a las diferentes propiedades de transporte en los mismos (Vásquez-Tantas, 2017; Hii et al, 2009; Parra-Rosero, 2017; HII et al, 2008).

**4.1.10** Difusión y Ley de Fick. El principal mecanismo de secado de los alimentos sólidos es la difusividad efectiva, involucrando una serie de reacciones catalizadas por sólidos o reacciones fluido-sólido, prevaleciendo las fuerzas moleculares sobre la transferencia de materia dependientes en su mayoría de factores como la humedad y temperatura del proceso (Torregroza et al, 2014). En la literatura es frecuente la aplicación de soluciones analíticas de las ecuaciones de difusión basadas en la Ley particular de Fick, la cual, se puede clasificar en dos tipos de difusión, la difusión en estado estacionario y no estacionario. Esta ley predice los cambios que origina la difusión en la concentración con respecto al tiempo, siendo posible obtener modelos semi - empíricos para determinar el

coeficiente de difusión efectivo, como Ríos et al. (2011), quienes utilizaron modelos matemáticos, tales como, Newton-Lewis, Henderson y Pabis, Page, Page modificado, Midili-Kucuk y Logarítmico; para determinar las cinéticas de secado en los productos alimenticios (Besnier, 2019).

Del mismo modo, el coeficiente de difusividad efectiva se expresa según la solución de la segunda ley de Fick, siendo adecuada para fenómenos difusivos durante el secado y la transferencia de masa, hasta alcanzar el equilibrio. Asumiendo que la transferencia de masa es unidimensional y los tiempos de secado de los granos son largos, la expresión matemática se describe como:

$$ln MR = ln \left(\frac{8}{\pi} * \frac{\pi^2 D_{eff}{}^t}{4 L_0^2}\right) \qquad Ecuación (12)$$

Donde:  $D_{eff}$  es el coeficiente de difusividad efectiva  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$  y  $L_0$  es el semiespesor de la capa a secar (m).  $D_{eff}$  es determinado a través de la gráfica de los datos experimentales de ln (MR) versus tiempo (Puente et al, 2013).

Analizando la determinación de un material en el proceso de secado, se estudia la investigación de Lema, y otros (2007) donde el objetivo del trabajo fue estudiar la cinética de secado en capa delgada para hojas y tallos de perejil bajo diferentes condiciones de temperatura del aire de secado ( $35^{\circ}$ C,  $45^{\circ}$ C,  $55^{\circ}$ C y  $65^{\circ}$ C) y a una velocidad fija de 1.0  $\frac{m}{s} \pm 0.1$ . Se testearon doce modelos matemáticos teóricos empíricos para ajustar los datos experimentales y se usó un análisis de regresión no lineal para determinar las constantes de los modelos evaluados. Si bien a cada temperatura existe un modelo diferente que optimiza el ajuste, el modelo de Midilli – Kucuk describió más adecuadamente la cinética de secado en el rango de temperaturas estudiado. Sobre la base de estas, se evaluaron modelos de solución para la ley de Fick, determinando una relación para la difusividad efectiva, permitiendo de este modo obtener un valor aceptable para la energía de activación.

**4.1.11** Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) es un método o análisis de aproximación numérica utilizado para calcular y optimizar la respuesta de problemas

de transferencia de calor y masa, simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, aero acústica, etc. Este método se originó a partir de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico, regido a partir de las ecuaciones gubernamentales de flujo que tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos (Equipe ESSS, 2016).

El CFD, emplea la resolución de ecuaciones para la conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, etc., utilizando volúmenes finitos. Lo cual, proporciona información detallada sobre diversas variables como distribución de velocidad, presión, temperatura; fuerzas de suspensión y arrastre, distribución de fases, entre otros factores. Además, esta área de conocimiento busca complementar las pruebas experimentales como también, reducir el costo y el tiempo del desarrollo de productos optimizando procesos de estos. Según estudios realizados por Amanlou & Zomorodian, (2010) con el paso del tiempo, la facilidad de acceso y herramientas adicionales que complementan los paquetes de software ingenieril como Ansys Fluent y CFX, han incrementado el uso del método CFD en la industria alimentaria a través de la predicción de procesos; incluyendo la predicción de la velocidad y la temperatura del aire en cámaras de secado.

**4.1.12** Ecuaciones de gobierno en la dinámica de fluidos computacional. En un espacio de control, el dominio o región se discretiza en un número finito de volúmenes de control o pequeñas subregiones. Las ecuaciones de conservación (transporte) se resuelven en cada uno de estos volúmenes. Allí, las ecuaciones diferenciales se discretizan en ecuaciones algebraicas que se resuelven numéricamente. La principal ecuación resuelta vía Fluidodinámica Computacional es la ecuación de transporte de la variable de interés, representada por el símbolo  $\Phi$ , presentada en la ecuación (13), (Equipe ESSS, 2016).

$$\frac{\partial y}{\partial x} \int_{V} \rho \phi \, dV + \oint_{A} \rho \phi V. \, dA = \oint_{A} \Gamma_{\phi} \nabla \phi \, dA + \int_{V} S_{\phi} dV \qquad Ecuación (13)$$
  
Tiempo Advección Difusión Fuente

De acuerdo con Equipe ESSS, 2016, todas las ecuaciones de conservación resueltas en Dinámica de Fluidos Computacional tienen la estructura de la ecuación (13) con cuatro términos: el término de tiempo, el término advectivo, el término difusivo y el término fuente. Donde la representación para aplicar diversos fenómenos de ecuaciones de
conservación, se modifican sólo tres términos de la ecuación: la variable  $\Phi$ , el coeficiente de difusión  $\Gamma$ , y la fuente S.

Dentro del comportamiento dinámico de fluidos, existen ecuaciones de conservación que gobiernan y cuyas formas particulares empleadas en ANSYS FLUENT vienen establecidas por defecto. ANSYS CFD resuelve las ecuaciones de Navier Stokes, que son formulaciones de las leyes de conservación de la masa o continuidad (Ec.14) y la cantidad de movimiento o momento (Ec. 15). La ecuación de transporte de energía térmica (Ec. 16) o el transporte de cualquier otro escalar también pueden ser resueltas con esta técnica.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u}) = 0 \qquad Ecuación (14)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla P + \nabla(\bar{\tau}_{eff}) + \rho g \beta(\bar{T}_0 - \bar{T}) \qquad Ecuación (15)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\bar{u}(\rho E + P)) = \nabla \left(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_j H_j J_j + (\bar{\tau}_{eff} \bar{u})\right) \qquad Ecuación (16)$$

Donde  $\bar{u}$  es el vector componente de velocidad media  $(\frac{m}{s})$ , *E* es el energía específica del fluido (J/kg),  $\lambda_{eff}$  es la conductividad térmica efectiva (W/mK),  $H_j$  es la entalpía de la especie j  $(\frac{J}{kg})$ ,  $J_j$  es el flujo de difusión de la especie j  $(\frac{kg}{m^2s})$ , t es el tiempo (s),  $\rho$  es la densidad  $(\frac{kg}{m^3})$ , P es la presión  $(\frac{N}{m^2})$ , g es el vector de aceleración gravitacional  $(\frac{m}{s^2})$ ,  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica,  $\overline{T_0}$  en el sistema temperatura circundante en el trabajo (temperatura de referencia, K),  $\overline{T}$  es la temperatura media y  $\overline{\tau}_{eff}$  es el tensor de tensión efectivo como Eq (Sonthikun et al, 2016).

**4.1.13** Modelos de Turbulencia. Los 3 elementos claves que describen el CFD son, el modelado de la turbulencia, la generación de la malla y el desarrollo de algoritmos (Arrieta & Monge, 2018). En cuanto al modelado de la turbulencia, este se define como el proceso de calcular el tensor de esfuerzos Reynolds. Los flujos turbulentos se pueden definir como flujos de naturaleza tridimensional y no estacionaria, cuyas moléculas se desplazan de forma caótica. Estos flujos turbulentos se caracterizan por poseer números de Reynolds, mayores o iguales a 4000.

**4.1.13.1** Direct Numerical Simulation (DNS). Modelo de resolución numérica directa de las ecuaciones de Navier - Stokes, a la vez considerando las condiciones de frontera, en donde todas las escalas espaciales y temporales del movimiento son resueltas numéricamente de manera más precisa. Las ecuaciones inestables de Navier-Stokes se resuelven en cuadrículas espaciales que son los suficientemente finas como para resolver las escalas de longitud de Kolmogorov en las que tiene lugar la disipación de energía y con pasos de tiempo lo suficientemente pequeños para resolver el periodo de las fluctuaciones, más rápidas. Estos cálculos son muy costosos en términos de recursos informáticos, por lo que el método no se usa para cálculos de flujos industriales (Arrieta & Monge, 2018).

**4.1.13.2** Large-Eddy Simulation (LES) o modelo de simulación de grandes remolinos equivalente a *large eddies* en inglés, como también los de pequeña escala o malla, pero estos son modelados o calculados de forma aproximada y no resueltos directamente, lo que genera una reducción de costo computacional respecto a una DNS y las cuales, se estima que son sencillas y no requieren grandes ajustes debido a su poca información y condiciones o características más universales (Arrieta & Monge, 2018).

**4.1.13.3** Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS). Este tipo de modelos son los más usados y consiste en descomponer las variables de interés como velocidad, presión, etc. en un valor medio y otro fluctuante que se presenta en la ecuación (17).

$$u_i = \underline{u}_i + u'_i$$
 Ecuación (17)

Donde:

u = Velocidad del fluido (m/s).

 $\underline{u}_i$  = Velocidad promedio del fluido (m/s)

 $u'_i$ = Velocidad promedio del fluido (m/s)

Por lo tanto, las ecuaciones de Navier-Stokes se reformulan en función de las variables o propiedades del flujo con condiciones de frontera dependientes del tiempo, obteniendo un nuevo grupo de ecuaciones con términos adicionales. Lo cual, indica que se requiere

un nuevo modelo adicional que permita finalizar el modelo RANS (Arrieta & Monge, 2018). Los modelos RANS son los que se describen a continuación:

- Spallart-Allmaras:
- STANDARD k-ε:
- RNG k- ε:
- Realizable k-ε:
- STANDARD k-ω:
- SST:
- k –kl- ω:
- RSM:

de los cuales, k- $\varepsilon$ , k- $\omega$  y k-kl- $\omega$  emplean ecuaciones dentro de un régimen superior a la capa límite, donde el fluido se torna turbulento evitando consumir altos recursos como los modelos más avanzados. Además, el modelo k- $\omega$  facilita la resolución de simulaciones en al ser más simplificado que el k- $\varepsilon$  en términos de la ecuación de k, pues incluye la variable  $\omega$  la cual representa la tasa específica de disipación de la turbulencia (ANSYS Inc., 2013; Bayona et al, 2015) modificaciones para análisis en por lo cual, para la simulación del comportamiento que se presenta en secado se plantean estos modelos como la mejor opción posible para simular.

**4.1.14** Procedimiento general de un modelo CFD. Los códigos de simulación de CFD se desarrollan con algoritmos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales parciales, donde gobiernan todo el flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados. Para poder desarrollar las simulaciones en CFD existen diversos programas, uno de los más utilizados es el paquete de Ansys Fluent; cuyo software está estructurado alrededor de algoritmos numéricos que pueden abordar problemas de flujo de fluidos. Para que el software pueda comenzar a resolver numéricamente las ecuaciones del modelo junto a las condiciones de contorno e iniciales, se deben seguir las etapas enunciadas en la Figura 3.





Fuente. Autor

**4.1.15** Geometría. El sistema de geometría tiene varias características de creación, incluida la definición de matemática convencional y algebraica, donde las principales características de creación son los puntos clave, líneas, áreas y volúmenes; estos parámetros geométricos, se definen, cuando sea necesario y según la situación se requiera, como al mismo tiempo sus características de dimensiones y secciones transversales de los elementos estructurales.

**4.1.16** Mallado. La tecnología del mallado ha mejorado considerablemente en los últimos años, implementado el uso de nuevas formas geométricas en las cuadrículas siendo las mallas tetraédricas, hexaédricas y poliédricas, la superación de las limitaciones de las mallas simples (Norton et al, 2013). La generación del mallado es una parte esencial en el proceso de simulación, su representación en el software de simulación ANSYS mediante el programa de diseño (CAD) genera una cuadrícula que divide el dominio computacional en subdominios, resolviendo numéricamente en los nodos de las intersecciones de la cuadrícula. En general, un gran número de celdas ofrece una mejor precisión de la solución, por lo tanto, se pueden importar estructuras de cuadrícula de

malla más avanzadas a los códigos CFD. Una buena malla puede ahorrar mucho tiempo de cálculo y garantizar mejores resultados de simulación.

**4.1.17** Propiedades del fluido y condiciones de frontera del modelo numérico. Las condiciones de frontera como entradas, salidas, paredes y orificios, son establecidas según el dominio a simular y sus características geométricas las cuales, pueden tener varias combinaciones siempre y cuando exista coherencia en el modelo geométrico. Dentro de estas etapas de selección se comprenden los parámetros físicos, numéricos y las propiedades del fluido a simular, ya sea, el tipo de material, la densidad, temperatura y viscosidad de este mientras que el software de Ansys Student considera por defecto la densidad de los fluidos como constante (Naidiuk & Torres, 2018). Estas condiciones iniciales son independientes según la situación a simular, como la metodología que se utilice para resolver las ecuaciones que gobiernan del problema, en CFD generalmente requiere de estas condiciones, a partir de una lista de valores y parámetros que sean consistentes con la estrategia deseada.

**4.1.18** Pre-procesamiento. Al realizar una simulación, se debe seleccionar las variables objetivo, estas variables son, la forma aproximada de las ecuaciones de gobierno, el nivel de detalle en la representación geométrica, el tipo y resolución de la cuadrícula computacional, el modelo de turbulencia, el tamaño del dominio computacional, las condiciones de contorno, los esquemas de discretización y los criterios de convergencia. Dado que los resultados de las simulaciones CFD pueden ser muy sensibles a la amplia gama de parámetros computacionales, estos parámetros deben ser considerados puesto que pueden diferir según la situación y la información que se requiera obtener en un problema especial. Con base en esta idea, existen dos enfoques de modelado distintos denominados modelos conjugados y no conjugados, el modelo no conjugado es el que estudia la transferencia de calor y masa en la superficie de un alimento en estado líquido o sólido con propiedades termo físicas variables o constantes; pero, si el objetivo de estudio es el material alimenticio sólido o líquido se modela junto con el medio circundante (gas o líquido), se denomina modelado conjugado (Lemus et al, 2011).

**4.1.19** Post-procesamiento. Luego de la etapa anterior, se configura el tipo de análisis a realizar, permanente o transitorio; el número de iteraciones, y de acuerdo al caso, el tiempo total de la simulación. Seguido, se define el número de núcleos físicos a del

41

computador a implementar en la solución lo cual, varía de acuerdo al Hardware (computadora) y la licencia del software con que se cuenta.

**4.1.20** Aplicación de CFD en sistemas de secado por convección. Los secadores convectivos son el equipo más frecuente y popular utilizado en distintas aplicaciones donde a través del aire o los gases de combustión suelen usarse como medio de transferencia de calor en este tipo de secadores y su eficiencia depende de factores como la velocidad del aire en el secado, temperatura, humedad relativa y uniformidad de flujo (Moses et al, 2014).

Romero et al, (2014), realizaron el estudio de un secador solar indirecto para el secado de vainilla, sus variación de temperatura del sistema de secado se predijo usando el paquete CFD de ANSYS-Fluent, donde sus resultados demuestran un buen acuerdo entre los datos experimentales y los previstos en la salida del colector, mientras que dentro de la cámara de secado, se encontraron algunas desviaciones; debido a las variaciones aproximadas del coeficiente de transferencia de calor, según sus autores; sugiriendo el uso de un coeficiente de transferencia de calor variable como una función del tiempo durante el día para los secadores solares indirectos.

Un estudio de las limitantes en el modelado CFD de los secadores solares realizado por Prakash & Kumar (2017), incluye las limitaciones de la naturaleza transitoria de la convección del flujo de aire dentro del secador, como convección natural y mezcla transitoria del flujo, variaciones y complejidad de las condiciones de contorno según el clima local, la contracción del material de secado que requiere en la aplicación de mallas móviles, radiación solar existente según la localidad y las cinéticas de secado más sofisticadas que las de convección forzada y natural debido a la rehidratación parcial del sólido.

Para lograr mejores resultados de eficiencia energética y calidad del producto, se crean nuevos diseños de secadores que surgen de los resultados de numerosas investigaciones, de las cuales, el uso comercial y generalizado de estos sistemas son muy limitados debido a los altos costos en las aplicaciones a gran escala. Por lo tanto, los modelos CFD proporcionan nuevos conocimientos sobre el desarrollo y el diseño de estos sistemas a escala industrial (Moses et al, 2014). Con el uso de estas aplicaciones la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha logrado estudiar el comportamiento de

42

nuevos sistemas de secado térmico solar, con resultados numéricos comparables a los datos experimentales; recientemente Vélez y otros (2019) realizaron la optimización de estructuras de secado con modificaciones geométricas, donde los modelos de elementos finitos se pueden usar para simular el secado de café pergamino y para un diseño óptimo de los secadores de café, proporcionando nuevas propuestas de sistemas de secado, en pos de garantizar la calidad y aprovechamiento de la energía solar, cuya tecnología presenta un uso incipiente en el sector agroalimentario de Colombia.

# 5. METODOLOGÍA

# 5.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área seleccionada para el presente estudio de investigación se desarrolló en el departamento del Tolima en la zona sur de la ciudad de Ibagué, junto con el laboratorio de postcosecha y control de calidad de la facultad de Ingeniería Agronómica.

# 5.2 CINÉTICA DE SECADO

**5.2.1** Material vegetal y adecuación de la muestra. Las muestras de cacao (*Theobroma Cacao L*) fermentado fueron suministradas por la asociación de cacaoteros, Héroes del Cultivo del corregimiento de San Bernardo del municipio de Ibagué - Tolima, localizado geográficamente en el nororiente del mismo, limitando por el norte con el corregimiento de San Juan de la China; por el oriente con el municipio Alvarado; por el Suroccidente con el corregimiento el Salado y el por el nororiente con la cuenca del Río la China y la subcuenta del Río Alvarado (Alcaldía Municipal de Ibagué, 2010). Los clones de cacao contenidos en las muestras y cultivadas por la asociación actualmente son, ICS 95, CCN-51, criollo y acriollado. Las muestras seleccionadas fueron llevadas a las instalaciones del laboratorio de postcosecha donde se enfriaron a 4 ºC para su posterior análisis.

**5.2.2** Equipos y procedimiento. Se utilizó un secador de bandejas con convección forzada de aire (Horno THERMOLAB convección forzada DIES modelo TH53) que consta de un sensor de temperatura PT100, controlador digital de temperatura y una cámara de secado, la cual, dispone de dos bandejas de 40 x 40 x 34,5 cm en acero inoxidable tipo 304, Figura 4. El equipo se encendió 30 min antes de iniciar las sesiones con el fin de alcanzar las condiciones estables de temperatura de trabajo para posteriormente ser cargado con el material. Se utilizaron también una balanza de precisión KERN EW 4200 - 2NM y una balanza de precisión KERN EW 630- 3NM.

#### Figura 4. Horno THERMOLAB convección forzada.



Fuente. Autor

**5.2.3** Determinación del contenido de humedad inicial. Previo a los ensayos de secado, se determinó el peso seco de la muestra mediante el método de estufa a 103 °C durante 24 horas, con el dato obtenido se calculó la humedad inicial utilizando la ecuación (18) según (ICONTEC, 2003).

$$H = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} * 100$$
 Ecuación (18)

H = Contenido de humedad, expresado en porcentaje,  $M_0$  = Masa de la cápsula vacía y su tapa en gramos,  $M_1$  = Masa de la cápsula con la muestra de humedad y la tapa en gramos,  $M_2$  = Masa de la cápsula con la muestra seca y la tapa en gramos.

**5.2.4** Construcción de las curvas de secado y Modelado Matemático. Las curvas de secado fueron realizadas registrando la pérdida de peso de las muestras de cacao cada 2 horas, hasta alcanzar peso constante. El proceso se evaluó mediante un análisis por triplicado a temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C, analizando muestras de 5 gramos de cacao respectivamente; estas muestras depositadas en crisoles previamente tarados y pesados fueron colocadas en las bandejas del horno hasta que las mismas alcanzaran la temperatura de estudio para cada caso. Durante el proceso de secado las muestras en la prueba de 60 °C fueron pesadas a intervalos de 30 minutos durante las primeras dos horas y luego, cada 2 horas hasta obtener un peso constante; en los demás tratamientos este procedimiento se realizó hasta obtener un peso constante, con una variación mínima <1%. Antes de pesar las muestras, estas fueron llevadas a un desecador con silica gel, con un contenido de humedad de equilibrio de 0% y activada a 105 °C con el fin de evitar la transferencia de humedad del material vegetal y el ambiente mientras se atemperaban (Tétreault & Bégin, 2018).

Los datos experimentales obtenidos en el proceso de secado fueron convertidos a humedad en base seca. Seguido, se determinó la razón de humedad (MR) empleado la ecuación 19, para luego ajustar los modelos matemáticos (Tabla 2), reportados en diversos estudios del modelamiento de secado de productos agrícolas (Priyadarshini et al, 2013) y así determinar el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales.

$$MR = \frac{W_t - W_e}{W_i - W_e} * 100 \qquad Ecuación (19)$$

Donde, MR = razón de humedad adimensional,  $W_t$  = contenido de agua en el producto en base seca (d.b.) en un tiempo t,  $W_e$ = contenido de humedad en equilibrio del producto en base seca y  $W_i$ = contenido inicial de agua en el producto (d.b.). La humedad en equilibrio de los granos se estableció según lo determinado por Koua et al. 2016, donde, utilizando el modelo Guggenheim-Anderson-de-Boer (GAB) se encontró que era 0,061, 0,056, 0,053 y 0,051 kg de agua/kg en base seca del producto para 30, 40, 50 y 60 °C. **Tabla 2.** Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de secado.

Nombre	Modelo	Ec.
Newton -Lewis	$MR = \exp\left(-\mathrm{kt}\right)$	(20)
Thompson	$MR = 1 + at + bt^2 t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]$	(21)
Page	$MR = \exp(-ktn)$	(22)
Page	MR = exp[(-kt)n]	(23)
modificado		
Midili - Kucuk	$MR = a \exp(-kt^c) + b$	(24)
Logarítmico	MR = a[exp(-kt)] + C	(25)

#### Fuente: Autor

En la Tabla 2, MR es la razón de humedad, t es el tiempo de secado, k es una constante de secado y las variables *a, b y n* son los coeficientes de ajuste de cada modelo según corresponda. Los parámetros de cada modelo fueron estimados usando un método de regresión no lineal de la herramienta estadística Matlab R2011b (The MathWorks Inc., Natick, MA, USA) a través de la función "curve fitting" y los valores de ajuste de la función "goodnessOfFit". Los criterios usados para escoger el modelo de mejor ajuste fueron el coeficiente de determinación ajustado (R2adj), error medio estimado SSE y raíz del error cuadrático medio RMSE.

**5.2.5** Coeficiente difusivo (Df) y energía de activación (Ea). La difusión de humedad desde el interior del grano de cacao hasta la capa superficial se puede definir por la segunda ley de difusión de Fick en estado estacionario, asumiendo el grano de cacao igual que lo planteado por (Chinenye & Ogunlowo, 2010), considerando un proceso isotérmico y un sólido homogéneo, isótropo de geometría esférica, despreciando el efecto de encogimiento y resistencia externa en el proceso de transferencia de materia, permitiendo aplicar la ecuación (26).

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_e}{r^2}\right]$$
 Ecuación (26)

Donde MR es la razón de humedad, *n* es el número de término,  $D_e$  es la difusividad efectiva ( $m^2$ /s) y r es el radio equivalente de la esfera (m). Si se toma n = 1, para un período prolongado de secado, la ecuación (27) se representa de forma lineal (Riva & Peri, 1986) de la siguiente manera:

$$Ln MR = Ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_e t}{r^2}\right)$$
 Ecuación (27)

El coeficiente difusional ( $D_e$ ) para cada temperatura se calculó a partir de la pendiente de la línea recta obtenida al graficar el Ln MR en función del tiempo de secado en horas. Para el cálculo de la energía de activación se consideró la difusividad efectiva dependiente de la temperatura (Váquiro, 2009) por medio de la ecuación (28) de tipo Arrhenius. Al representar Ln ( $D_e$ ) en función de 1/T se obtiene  $E_a$  de la pendiente, y de la ordenada en el origen, el factor de Arrhenius ( $D_0$ ).

$$D_{eff} = D_0 exp\left[\frac{E_a}{R(T+273,15)}\right]$$
 Ecuación (28)

donde D es el coeficiente de difusividad para un infinito temperatura,  $E_a$  es la energía de activación de la humedad difusión (kJ/mol), R es la constante universal de los gases (8,314 J/mol·K),  $D_0$  es el factor de Arrhenius ( $m^2$ /s) y T es la temperatura de secado (°C). **5.3** SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO.

El prototipo del secador solar tipo gabinete (Figura 5), se diseñó con base en lo propuesto por diferentes autores en investigaciones previas (Espinoza, 2016; Cruz, 2017; Maureira, 2006), este sistema se propuso debido a su facil distribución y manejo del producto,

mayor tranferencia de calor indirecta, economia de espacio y bajo costola de fabricación. El sistema está compuesto por un colector solar y una cámara de secado con 5 bandejas internas. El colector solar, ubicado en la parte inferior e inclinado 5° en la horizontal, permite la entrada del flujo radiante a través de una lámina de policarbonato cristalino de 4 mm de espesor. Al interior, una placa de zinc de 1.5 mm de espesor pintada de negro absorbe la radiación incrementando su energía interna. Esta energía es transferida al aire que entra por la parte baja del colector, logrando un incremento de su temperatura. Los gradientes de temperatura generados al interior del colector propician un flujo por convección natural, con el aire menos denso y más caliente circulando hacia la cámara de secado a través de las bandejas. Las paredes de la cámara de secado están hechas de madera MDF de 9 mm de espesor, logrando un aislamiento térmico y evitando la radiación directa sobre el producto (esto podría generar temperaturas de proceso excesiva y pérdida de calidad); las 5 bandejas dispuestas en la cámara cuentan con capacidad para soportar 1 kg de grano de cacao fermentado cada una sobre su malla de 4x4" en fibra de vidrio. La salida de aire húmedo se encuentra ubicada en la parte superior sobre un costado y está protegida con malla en fibra de vidrio.

**Figura 5.** Esquema con medidas del prototipo de deshidratador solar de cacao elaborado en SpaceClaim.



Fuente: Autor

Con el fin de lograr estabilidad térmica dentro del sistema y evitar la condensación de humedad durante los periodos de intermitencia de la radiación (noches o días nublados), se testaron tres métodos de almacenamiento energético: depósito de agua en garrafas pet, depósito de parafina en contenedor metálico, y piedras volcánicas. Estos fueron seleccionados al igual que lo reportado en otros estudios de sistemas de almacenamiento de energía térmica (Mohana et al, 2020; Ortega & Gutiérrez, 2021) por la densidad energética del material, calor específico, conductividad térmica, calor latente (Tabla 3), reversibilidad completa de los ciclos y bajas pérdidas térmicas durante el periodo de almacenamiento, como a su vez, su bajo costo y fácil adquisición en el mercado. Estos sistemas fueron ubicados en la parte baja de la cámara. Una resistencia de calor por convección y conducción con los demás sistemas auxiliares (Bahari et al 2020).

Propiedad	Piedras	Agua	Parafina (PCM)
Densidad (kg/ m3)	2240	1000	1600
Calor especifico (kJ/ kg)	1,0	4,2	2,0
Calor latente (kJ/m3)			368
Conductividad térmica (w/ m°C)	3,5	0,58	0,21
Cantidad empleada	1,825 kg	91-9 kg	1,668 kg

**Tabla 3.** Propiedades de los distintos medios de almacenamiento de energía.

Fuente: (Alonso, 2016; Mosquera, 2013).

**5.3.1** Evaluación y análisis de los sistemas de almacenamiento térmico. Para llevar a cabo la evaluación de los sistemas auxiliares, se realizaron siete tratamientos correspondientes a los tres sistemas de almacenamiento cada uno con un acople a una resistencia eléctrica de 1200W ubicada en el colector, la cual, operó en intervalos de 5 minutos cada hora durante tres noches (7:00 pm a 6:00 am). El séptimo tratamiento corresponde al secador operando sin ningún sistema auxiliar. Cada tratamiento se realizó en 3 ciclos de funcionamiento continuos de 24 horas cada uno, por cada sistema. La temperatura y la humedad relativa se registraron cada 10 minutos.

**5.3.2** Equipo de medición para temperatura y humedad relativa. Para medir la temperatura y humedad relativa se utilizaron cuatro Datalogger CEM DT-171 con un

49

rango de presión temperatura ±1°C y de humedad ±2%RH, Figura 6 (CEM, 2015), tres de ellos ubicados en diferentes zonas de la cámara de secado en las bandejas superior, medio e inferior respectivamente; el otro sensor fue colocado a una altura de 2 m del suelo, a 4 m de distancia del secador para lectura de las condiciones ambientales externas.

Figura 6. Datalogger CEM DT-171



Fuente: Autor.

**5.3.3** Condiciones climáticas de la zona de estudio. El proyecto se realizó en la zona sur de la ciudad de Ibagué, coordenadas 4.43485 de latitud y -75.24086 de longitud, la latitud Norte con 4° 26' 5.46" y longitud Oeste con 75°14' 26.847" del meridiano de Greenwich, en el departamento del Tolima, en la parte central de la región andina de Colombia, con una elevación de 1.168 metros sobre el nivel del mar y una temperatura media de 24°C (oscilando entre los 30°C al mediodía y 18°C en las noches). La topografía en el sur de Ibagué facilita las condiciones ambientales relacionadas con su entorno natural, favoreciendo las corrientes de aire provenientes del sur y sur oriente; oscilando velocidades de aire según los datos meteorológicos de la NASA, (2021). entre 2 y 5 m/s, con una radiación promedio mensual entre los 4,0 y 5,5 KWh/m<sup>2</sup> y humedades relativas entre un 82%, con menor incidencia en el tercer trimestre del año entre 60% de humedad relativa (IDEAM, 2015).

## **5.4** SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR.

Las simulaciones numéricas descritas en este estudio se realizaron y analizaron utilizando el software ANSYS CFX integrado en el entorno ANSYS Workbench versión estudiantil (Ansys, 2020). Inicialmente se llevó a cabo una simulación para determinar la caída de presión a través de las bandejas conteniendo los granos, definiendo parámetros que permitieron modelar estas bandejas como medios porosos. Seguido, la dinámica de flujo de aire al interior del prototipo de secador solar fue simulada, reemplazando las bandejas conteniendo granos por medios porosos con las características definidas en la etapa previa.

**5.4.1** Simulación computacional del flujo de aire a través de las bandejas. Para simular el flujo de aire a través de la monocapa de granos de cacao contenida en las bandejas, se implementó un modelo de medio poroso (Bustos-Vanegas et al, 2019). El dominio computacional fue conformado por una monocapa de granos de cacao dentro de un túnel de viento (Fig 6A). La geometría de cada grano se representó como un elipsoide, con dimensiones de ancho 8,60 mm, diámetro 6,20 mm y largo 18,93 mm, siendo este, el tamaño promedio medido en laboratorio de 10 granos. Una monocapa de granos de área 0.0957 m x 0.0815 m fue ubicada dentro de un túnel de viento virtual de dimensiones (Figura 7) de 0,947 m x 0,0957 x 0,0815; se generó una malla ortogonal de elementos hexaédrico de tamaño máximo de elemento 0.02 m para un total de 537.195 elementos y 114.824 nodos.

En el dominio de cálculo fueron resueltas las ecuaciones de Navier Stokes en estado estacionario y en condición isotérmica para aire a 25 °C. Como condiciones de contorno se definieron velocidades de entrada de aire variando entre 0.2 y 2.0 m/s. Condición de salida a presión atmosférica (presión 0), condición de no deslizamiento en la superficie de los granos y condición de deslizamiento libre en las paredes del túnel.

51

**Figura 7.** A) Dominio computacional y B) Planos utilizados para calcular la caída de presión a través de granos de cacao.



Fuente. Autor

La caída de presión para cada velocidad simulada se calculó como la diferencia total de presión entre el plano de entrada menos la presión en el plano de salida. La ecuación 29 fue ajustada por regresión no lineal a los datos simulados de caída de presión para cada velocidad. Con los valores ajustados de los parámetros a y b, se determinaron los términos de pérdida viscosa e inercial de la ecuación 30. Los valores obtenidos se emplearon en el software ANSYS-CFX para configurar un subdominio con pérdidas direccionales a través de los coeficientes lineal (a) y cuadrático (b). Este subdominio fue localizado dentro del túnel de viento en lugar de la monocapa de granos.

$$\frac{\Delta P}{l} = \left(\mu D + \frac{1}{2}F\rho|u|\right)u \qquad Ecuación (29)$$
$$\frac{\Delta P}{l} = a.u + b.u^2 \qquad Ecuación (30)$$

Donde,  $\frac{\Delta P}{l}$  es la caída de presión por unidad de longitud,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del aire, D es la resistencia viscosa, F es la resistencia inercial,  $\rho$  es la densidad del aire y u es la velocidad de entrada del aire (Bustos y otros, 2019).

5.4.2 Dinámica de flujo de aire al interior del prototipo de secador solar. La geometría del prototipo de secador solar fue creada en el software Design Modeller de Ansys con base en las dimensiones del prototipo de secador construido para el presente estudio (Figura 5). Las 5 bandejas conteniendo los granos de cacao en monocapa fueron reemplazadas

52

por un subdominio hexaédrico, configurado como medio poroso de acuerdo al análisis anterior.

Usando el programa Ansys Meshing se generó una malla ortogonal de elementos hexaédricos de tamaño máximo de elemento 0,02 m. El enmallado se determinó después de analizar que la solución es independiente del tamaño de la malla, obteniéndose un total de 63.822 elementos y 58.125 nodos. El dominio se configuró como aire en condiciones de gas ideal resolviendo las ecuaciones 14, 15 y 16 en estado estacionario. La fuerza de flotación o empuje fue activada en el modelo y se incorporó a la ecuación de la cantidad de movimiento. La radiación solar fue simulada como un término fuente de calor en la frontera del colector (Tabla 4).

Las condiciones de entrada y salida fueron configuradas para permitir que el aire ingrese y salga del sistema a presión y temperatura ambiente (1 atm, 25 °C). El esquema del secador que se observa en la Figura 5 fue simulado con las condiciones de frontera que se muestran en la Tabla *4*.

Condición	de	no	Paredes 1,2,3,4,5,6
deslizamient	0		
Condición ac	diabática		Pared 5
			Pared 6 colector:
Flujo de calo	r		- Simulación 1: 600 W/m2
			- Simulación 2: 1000 W/m2
			- Simulación 3: 300 W/m2
			Pared 1 delantera: 1,813 W/m <sup>2</sup> K
Coeficiente	global	de	Pared 2 trasera: 2,047 W/m <sup>2</sup> K
transferencia	a de calo	r	Pared 3 laterales: 2,42 W/m <sup>2</sup> K
			Pared 4 superior: 0,98 W/m <sup>2</sup> K
			Pared 5 inferior: adiabática
			Pared 6 colector: 2,67 W/m <sup>2</sup> K
Entrada de fl	uido		0,1 m/s - 25 °C
Salida de flui	ido		Presión 0 Pas

**Tabla 4.** Condiciones de frontera usadas en la simulación.

Subdominio	Bandejas 1,2,3,4,5.				
	Coeficiente lineal: 25,82 kg/ m <sup>3</sup> -s				
	Coeficiente	cuadrático:	295,17		
	kg/m⁴				

Fuente: Autor

El flujo de calor en la pared del colector fue definido de acuerdo a la radiación estimada para 9:00 a.m., 12:00 p.m. y 15:00 p.m. respectivamente, según datos meteorológicos reportados por la NASA (2020).

El solver fue configurado para 600 iteraciones con un criterio de convergencia de 1e<sup>-5</sup> para la raíz cuadrada del error medio. La convergencia fue verificada también mediante la observación de la estabilización del flujo másico a la salida del secador.

**5.4.4.1** Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor. El valor del coeficiente global de transferencia de calor (U) (Ec 1.1), depende de las resistencias aplicadas por transferencia de calor por convección del fluido (h) (aire como gas ideal), número de Reynolds (Re), Nusselt (Nu), Prantdl (Pr) y la conductividad térmica del material, área y espesor de los mismos; en este caso la madera y el policarbonato (k) del prototipo de secado. En ese orden de ideas, el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor se desarrolló usando las ecuaciones (1.2), (7), (8), (9), usando como referencia las condiciones ambientales del aire a 25 °C 1 atm de presión. Esto permite una simulación más precisa al identificar la pérdida de calor a través de las paredes o superficies del prototipo en el intercambio de energía con el medio ambiente.

Por otro lado, los valores de conductividad necesarios para los cálculos se muestran en la Tabla 5:

Material		Conductividad (k)		
		(W/m*K)		
Policarbonato		0,2		
Madera M	ИDF	0,12		
suave				
Aire (25 °C)		0,026		

**Tabla 5.** Conductividad térmica de los materiales y fluido del modelo.

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999; elaplas, s.f.).

**5.4.5.** Modelado de turbulencias. El modelo de turbulencia aplicado para resolver el flujo en el dominio computacional es k- $\omega$ . De acuerdo con las recomendaciones de la literatura y el manual ANSYS Fluent, se adopta el modelo de k- $\omega$  turbulence por ser un modelo más simplificado que el k- $\varepsilon$  en términos de la ecuación de k. En este tipo de modelo, se establece una ecuación de transporte para  $\omega$  y modificaciones para análisis en bajo número Reynolds, efectos de compresibilidad y flujo cortante. En este modelo encontramos la variable  $\omega$  la cual representa la tasa específica de disipación de la turbulencia (ANSYS Inc., 2013; Bayona et al, 2015).

**5.4.6** Validación del Modelo. El procedimiento experimental descrito en el ítem 5.3.1 "Evaluación y análisis de los sistemas de almacenamiento térmico", para el tratamiento del secador a condiciones ambientales fue utilizado para validar los resultados obtenidos mediante la simulación computacional en el solver CFX del software Ansys CFD. Se llevaron a cabo tres simulaciones variando la radiación solar 600, 1000 y 300  $\frac{W}{m^2}$ , representando el promedio de energía radiante para 9:00 a.m., 12:00 p.m. y 15:00 p.m. respectivamente mañana, mediodía y tarde en la zona de estudio, que recrearon las condiciones de contorno del comportamiento real de un prototipo de secador solar para granos de cacao. El modelo de simulación fue validado comparando los datos de temperatura registrados durante la prueba del prototipo sin sistema auxiliar para tres puntos dentro de la cámara de secado con los datos obtenidos por los dataloggers ubicados en las bandejas superior, medio e inferior respectivamente. Adicionalmente, se validó el modelo a través del desarrollo de la simulación para diferentes configuraciones de malla, hasta obtener resultados independientes de la misma.

**5.4.7** Post procesamiento. El software de ANSYS brinda opciones de post procesamiento que permiten realizar informes de la solución del comportamiento del fluido utilizando CFD-Post a través del solver CFX como se aplicó en este estudio. Para el post procesamiento de las soluciones, se presentarán los contornos en planos YZ para la distribución de las variables como temperatura, densidad y caída de presión; planos de distribución de vectores de velocidad en 2D; representación del volumen de flujo (aire como gas ideal), gráficos transitorios para la variación de temperatura en la cámara de secado a cada condición de radiación solar como fuente de energía en el dominio computacional.

55

**5.4.8** Modificación al diseño de prototipo de secador solar propuesto. Con el fin de optimizar el funcionamiento del prototipo de secador solar de cacao, relacionando su mejora a las condiciones de comportamiento del flujo de aire dentro de la cámara, se proponen modificaciones en el diseño del prototipo de secador, acorde a lo obtenido en los resultados del prototipo sin modificaciones, obteniendo gráficos de contorno en el post procesamiento que permitan determinar cualitativa y cuantitativamente el mejoramiento.

Dichas modificaciones en el diseño son, en primer lugar, la implementación de un ducto cilíndrico que tenga efecto chimenea; teniendo en cuenta lo propuesto por (Teixeira & Malpica, 2016) donde se establece una altura de 3 m para la chimenea del secador solar pasivo para cacao con una capacidad de 10 kg, siendo para este estudio una proporción del 50%, se aplicaron las condiciones que se observan en la Tabla 6 Además, se varió tanto la altura del ducto como la ubicación del mismo en la parte superior de la cámara, extremo izquierdo, derecho y centro de acuerdo al plano transversal en el eje YZ; finalmente, una modificación de 5° en la inclinación del colector solar.

Material	Conducti	Coeficiente global	Flujo de	Altura	Diámetro	Espesor
	vidad	de transferencia	calor	(m)	(m)	(mm)
	$\left(\frac{W}{m.K}\right)$	de calor, U ( $\frac{W}{m^2 K}$ )	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$			
Acoro		2,99 $\frac{W}{m^{2}K}$	300	1,5		
inoxidabl	14.9	4,11	600	2,0	0.15	0.15
e 304	5,11	1000	2,5	-,	-,	
		6,12		3,0		

**Tabla 6.** Condiciones de contorno y características de la chimenea.

Fuente: Autor

#### 6. RESULTADOS

#### 6.1 CINÉTICA DE SECADO EN CAPA DELGADA EN EL LABORATORIO

**6.1.1** Curvas de secado y velocidad de secado: Con los datos obtenidos en laboratorio, se calculó la humedad inicial en base húmeda y seca del grano de cacao fermentado empleando las ecuaciones (10) y (11), obteniendo 0,62 kg<sub>agua</sub>/kg<sub>total</sub> y 1,63 kg<sub>agua</sub>/kg<sub>seca</sub> respectivamente. La variación de razón de humedad, ecuación (19), respecto al tiempo de secado a las diferentes temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C, se muestra en la Figura 8. Allí, se puede evidenciar que el aumento de la temperatura influye significativamente sobre la reducción del contenido de humedad en el grano a un tiempo determinado, siendo el tiempo más extenso a 30 °C y el más corto a 60 °C; comportamiento similar ha sido reportado en otros estudios de secado de granos de cacao tales como, los propuestos por (MacManus N. , 2009.; MacManus, Ogunlowo, & Olukunle, 2010).

**Figura 8.** Curvas de secado para granos de cacao en función de la razón de humedad contra tiempo para cada tratamiento.



#### Fuente. Autor.

Además, se observa que las pérdidas de agua a través del tiempo no son constantes ni lineales, por el contrario, se evidencia un comportamiento exponencial; esto significa que los sólidos entregan cantidades diferentes de agua en las mismas condiciones de temperatura demostrando diferentes resistencias moleculares, influyendo en el transporte de masa para extraer la humedad en el sólido, disminuyendo así el tiempo de secado, comportamiento presentado por el fenómeno físico de difusividad. Durante las últimas horas de secado, la cantidad de humedad que se extrae por unidad de tiempo disminuye hasta alcanzar humedad constante; resultados similares fueron reportados en otros estudios de cinética de secado para productos agrícolas tales como en arvejas (Pantoja, Osorio, Mejía, & Váquiro, 2016); en ñame (Bach Floresmilda, 2018) y café (Parra, Roa, Oliveros, & Sanz, 2017).

**6.1.2** Ajuste de las curvas de secado - modelación matemática. Los datos experimentales se ajustaron mediante regresión no lineal a los cinco modelos empíricos de secado en capa delgada representados en la Tabla 2. Los términos de los modelos matemáticos utilizados en el presente estudio describen satisfactoriamente las curvas de secado en granos de cacao fermentado de acuerdo con la relación entre el parámetro MR y el tiempo en los diferentes tratamientos. Los parámetros de ajuste se muestran en la Tabla 7, con valores obtenidos de  $R^2adj$  superiores a 90%, RMSE y SSE inferiores a 0,06 y 0,02 respectivamente indicando un buen ajuste.

En la Tabla 7, se logra observar que en los modelos de Newton (Lewis) y Logarítmico, de acuerdo a la constante  $\kappa$ , corresponde a un comportamiento exponencial dependiente de la temperatura, observando que a medida que esta aumenta su valor es directamente proporcional. Para el caso del modelo Logarítmico, se observa un comportamiento similar en la constante (a) para los diferentes tratamientos. Este comportamiento ha sido reportado en la cinética de secado de otros estudios como el caso de descartes de limón (Puente, et al. 2013), manzanas (Nowak & Lewicki, 2004) berenjena (Ertekin & Yaldiz, 2004) y rebanadas de champiñón (Motevali, Minaei, Khoshtaghaza, & Amirnejat, 2011).

	$R^2(adj)$						
Modelos		RMSE	SSE	а	b	k	n
Temperatura a 30 °C							
Newton (Lewis)	0,9727	0,04716	0,01946			0,3184	
Page	0,9924	0,02485	0,005884			0,3184	0,7461

Tabla 7. Resultados del análisis de regresión de los modelos de cinética de secado.

Page							
Modificado	0,9699	0,04946	0,02046			0,4385	0,4529
Midili-Kucuk	0,991	0,02712	0,006178	1,002	0,0009	0,3066	0,7821
Logarítmico	0,9873	0,0321	0,009271	0,919	0,0647	0,2414	
Modelos	$R^2(adj)$	RMSE	SSE	а	b	k	n
		Tempera	atura a 40 °C	)			
Newton (Lewis)	0,9739	0,04979	0,01983			0,3228	
Page	0,9954	0,02083	0,001992			0,5156	0,6679
Page							-
Modificado	0,9702	0,05323	0,01983			0,5957	0,5418
Midili-Kucuk	0,9958	0,01996	0,003038	1,001	0,0025	0,4723	0,7686
Logarítmico	0,9951	0,02168	0,00282	0,925	0,0711	0,4128	
	$R^2(adj)$						
Modelos		RMSE	SSE	а	b	k	n
		Tempera	atura a 50 °C	)			
Newton (Lewis)	0,9793	0,04689	0,01539			0,4152	
Page	0,9993	0,008646	0,0004338			0,6555	0,6307
Paga							
Faye							
Modificado	0,9759	0,05065	0,01539			0,7854	0,5288
Modificado Midili-Kucuk	0,9759 0,999	0,05065 0,01041	0,01539 0,0004485	1,000	-4E-04	0,7854 0,6629	0,5288 0,6162
Modificado Midili-Kucuk Logarítmico	0,9759 0,999 0,9912	0,05065 0,01041 0,03053	0,01539 0,0004485 0,004659	1,000 0,936	-4E-04 0,057	0,7854 0,6629 0,5078	0,5288 0,6162
Modificado Midili-Kucuk Logarítmico Modelos	0,9759 0,999 0,9912 <i>R</i> <sup>2</sup> ( <i>adj</i> )	0,05065 0,01041 0,03053 <b>RMSE</b>	0,01539 0,0004485 0,004659 <b>SSE</b>	1,000 0,936 <b>a</b>	-4E-04 0,057 <b>b</b>	0,7854 0,6629 0,5078 <b>k</b>	0,5288 0,6162 <b>n</b>
Modificado Midili-Kucuk Logarítmico Modelos	0,9759 0,999 0,9912 R <sup>2</sup> (adj)	0,05065 0,01041 0,03053 RMSE Tempera	0,01539 0,0004485 0,004659 SSE atura a 60 °C	1,000 0,936 <b>a</b>	-4E-04 0,057 <b>b</b>	0,7854 0,6629 0,5078 <b>k</b>	0,5288 0,6162 <b>n</b>
Modificado Midili-Kucuk Logarítmico Modelos Newton (Lewis)	0,9759 0,999 0,9912 <i>R</i> <sup>2</sup> ( <i>adj</i> ) 0,9765	0,05065 0,01041 0,03053 <b>RMSE</b> <b>Tempera</b> 0,05227	0,01539 0,0004485 0,004659 <b>SSE</b> atura a 60 °C 0,02129	1,000 0,936 <b>a</b>	-4E-04 0,057 <b>b</b>	0,7854 0,6629 0,5078 <b>k</b> 0,5728	0,5288 0,6162 <b>n</b>
Modificado Midili-Kucuk Logarítmico Modelos Newton (Lewis) Page	0,9759 0,999 0,9912 <i>R</i> <sup>2</sup> ( <i>adj</i> ) 0,9765 0,9786	0,05065 0,01041 0,03053 <b>RMSE</b> <b>Tempera</b> 0,05227 0,04985	0,01539 0,0004485 0,004659 <b>SSE</b> atura a 60 °C 0,02129 0,01965	1,000 0,936 <b>a</b>	-4E-04 0,057 <b>b</b>	0,7854 0,6629 0,5078 <b>k</b> 0,5728 0,6181	0,5288 0,6162 <b>n</b> 0,8409
Modificado Midili-Kucuk Logarítmico Modelos Newton (Lewis) Page Page	0,9759 0,999 0,9912 <i>R</i> <sup>2</sup> ( <i>adj</i> ) 0,9765 0,9786	0,05065 0,01041 0,03053 <b>RMSE</b> <b>Tempera</b> 0,05227 0,04985	0,01539 0,0004485 0,004659 <b>SSE</b> atura a 60 °C 0,02129 0,01965	1,000 0,936 <b>a</b>	-4E-04 0,057 <b>b</b>	0,7854 0,6629 0,5078 <b>k</b> 0,5728 0,6181	0,5288 0,6162 <b>n</b> 0,8409
Modificado Midili-Kucuk Logarítmico Modelos Newton (Lewis) Page Page Modificado	0,9759 0,999 0,9912 <i>R</i> <sup>2</sup> ( <i>adj</i> ) 0,9765 0,9786	0,05065 0,01041 0,03053 <b>RMSE</b> <b>Tempera</b> 0,05227 0,04985 0,05541	0,01539 0,0004485 0,004659 <b>SSE</b> atura a 60 °C 0,02129 0,01965	1,000 0,936 <b>a</b>	-4E-04 0,057 <b>b</b>	0,7854 0,6629 0,5078 <b>k</b> 0,5728 0,6181	0,5288 0,6162 <b>n</b> 0,8409 0,8103
Modificado Midili-Kucuk Logarítmico Modelos Newton (Lewis) Page Page Modificado Midili-Kucuk	0,9759 0,999 0,9912 <i>R</i> <sup>2</sup> ( <i>adj</i> ) 0,9765 0,9786 0,9736 0,9719	0,05065 0,01041 0,03053 <b>RMSE</b> <b>Tempera</b> 0,05227 0,04985 0,05541 0,05722	0,01539 0,0004485 0,004659 <b>SSE</b> atura a 60 °C 0,02129 0,01965 0,02157 0,01988	1,000 0,936 <b>a</b> 2	-4E-04 0,057 <b>b</b>	0,7854 0,6629 0,5078 <b>k</b> 0,5728 0,6181 0,7068 0,6029	0,5288 0,6162 <b>n</b> 0,8409 0,8103 0,8696

Fuente. Autor

**Figura 9.** Curvas de secado experimentales y ajustadas al modelo de Page para las diferentes temperaturas de trabajo (30, 40, 50 y 60 °C).



#### Fuente. Autor

El modelo de Newton Lewis ha sido reportado anteriormente como un modelo adecuado para describir el comportamiento de secado en granos de cacao (MacManus, Ogunlowo, & Olukunle, 2010), utilizando un secador discontinuo calentado a 55, 70 y 81 °C. Por otra parte, el modelo de Midili-Kucuk, en anteriores investigaciones ha sido reportado en cinética de secado de otros productos agropecuarios como el de la pulpa uchuva (*Physalis peruviana*) (Ortega, 2019), por método de ventana refractiva y el modelo de Page en este mismo fruto para el método de ventana refractiva e infrarrojo.

Al comparar los datos experimentales con los métodos matemáticos aplicados y teniendo en cuenta los coeficientes estadísticos, se identifica que el modelo que presenta el mejor ajuste para el secado de granos de cacao estudiado en los diferentes tratamientos a temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C es el modelo de Page, mostrado en la Figura 9, presentando los valores más altos para  $R^2adj$  (0,9924 ≥  $R^2_{adj} \le 0,993$ ) y valores más bajos de RMSE y SSE, resultados similares fueron obtenidos por Giraldo y otros (2010) y otros estudios de frutas y hortalizas como en secado de plátano (Martínez, 2018); papaya chilena (Vega & Lemus, 2006); rodajas de cebolla (Sharma, Verma, & Pathare, 2005); ahuyama (Ortíz, 2014).

**6.1.3** Determinación del coeficiente de difusividad efectiva (Deff) y Energía de Activación (Ea). El coeficiente difusional (Deff) para cada temperatura de secado estudiada de 30, 40, 50 y 60 °C, se calculó a partir de la pendiente de la recta obtenida al graficar el Ln (MR) en función del tiempo de secado en horas (Figura 10). En la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos del coeficiente de difusividad efectiva (Deff) del agua en los granos de cacao para las diferentes temperaturas. Donde, según (Torregroza, Montes, Avila, & Remolina, 2014) los valores de difusividad en materiales alimenticios se encuentran entre 1 x  $10^{-6}$  y 1 x  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s; siendo para este estudio los valores obtenidos entre 1,0504 x  $10^{-11}$  y 3,1749 x  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s.

**Figura 10.** Correlación logarítmica para las curvas de secado a cada temperatura (°C) versus tiempo de secado (s).





**Tabla 8.** Valores de las constantes Deff y valores de los parámetros de Arrhenius (Ecuación 28) para los diferentes tratamientos de temperatura estudiados.

T (°C)	Deff (m²/s)	D₀ (m²/s)	Ea (KJ/ mol)

30	1,0504 x10^-11			
40	1,3989 x 10^- 11	1,578 x10^-6	30,187	
50	1,8768 x 10^-11			
60	3,1749 x10^-11			

### Fuente. Autor

Los valores de difusividad muestran ser dependientes a la temperatura de secado, pues a medida que esta aumenta, también lo hace el coeficiente difusivo. Este fenómeno se puede describir como la influencia de la temperatura sobre la matriz del sólido, disminuyendo la resistencia interna del mismo; generando menor encogimiento y por tanto mayor porosidad; mayor transferencia de masa, es decir, liberación de mayor cantidad de agua contenida por área superficial del sólido lo que se refleja en menores tiempos de secado. Resultados similares se obtuvieron en investigaciones de otros productos agropecuarios tales como, arveja (Pantoja, et al., 2016); descartes de limón (Puente, et al., 2013); ñame (Bach Floresmilda, 2018); zanahoria (Togrul, 2005); mango (Ochoa, et al., 2012); café (Parra, et al., 2017).

Al determinar que la temperatura de secado influye sobre la difusividad del agua en los granos de cacao, se muestra una tendencia de tipo Arrhenius, Ecuación (28). La Ea  $\left(\frac{kJ}{mol}\right)$  se determinó con la pendiente de la recta obtenida al representar Ln (D<sub>eff</sub>) en función de 1/T (Figura 11), de allí, también se obtuvo el factor de Arrhenius (D<sub>o</sub>)  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$  a partir de la ordenada en el origen.

**Figura 11.** Correlación exponencial de la difusividad (Deff) a 30, 40, 50 y 60 °C de granos de granos fermentados.



#### Fuente. Autor

La energía de activación calculada Tabla 8 se encuentra dentro del rango de valores encontrados en la literatura para materiales alimenticios que es entre 12.7 y 110 kJ/mol (Torregroza, Montes, Avila, & Remolina, 2014). El valor de la energía de activación obtenido representa la energía necesaria para iniciar la difusión de humedad de los granos de cacao fermentado en el proceso de secado (Pantoja, Osorio, Mejía, & Váquiro, 2016); (Bach Floresmilda, 2018). Para cacao se reportan valores similares donde se obtuvieron valores para Ea y factor de Arrhenius (D<sub>o</sub>) de 39,94  $\frac{kJ}{mol}$  y 8,64 × 10<sup>-4</sup>  $\frac{m^2}{s}$  respectivamente (MacManus, Ogunlowo, & Olukunle, 2010)

# **6.2** COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO DE SECADO Y EVALUACIÓN DE SISTEMAS AUXILIARES

**6.2.1** Características generales del proceso de secado sin sistema auxiliar. En la Figura 12 se observa que en la zona superior e inferior de la cámara presenta un rango de temperatura superior de aproximadamente 3 °C frente a la zona media, este comportamiento es debido a la mayor transferencia de calor por convección desde el colector en la parte inferior y una conservación de las moléculas de aire caliente en la

superficie superior producto de la diferencia de densidades, donde las moléculas de aire caliente ascienden a lo largo de la superficie similar por lo estudiado Ayyappan & Mayilsamy (2010); Torres, Rodríguez, & Ricardo (2012) y Bejarano (2018) en diseños de secadores solares.



Figura 12. Temperatura en las diferentes zonas de la cámara sin sistema auxiliar y ambiente vs tiempo

## Fuente. Autor

La Figura 13 muestra una diminución favorable de humedad relativa dentro de la cámara de secado; dado a la transferencia de flujo y circulación de aire caliente dentro del prototipo, este comportamiento es beneficioso para el secado de cacao evitando la condensación de humedad; sin embargo este comportamiento no se observa en condiciones de nubosidad y lluvias fuertes, puesto que, ocasiona una baja transferencia de calor por convección y la humedad presente en el medio se dispersa a lo largo de las bandejas lo que se produce al no ser un sistema cerrado.



**Figura 13.** Humedad relativa en las diferentes zonas de la cámara sin sistema auxiliar y ambiente vs tiempo

Fuente. Autor

6.2.2 Evaluación y análisis de los sistemas de almacenamiento térmico. En la Figura 14 se observa que los sistemas de parafina y resistencia eléctrica mejoran la inercia térmica del sistema manteniendo una mayor temperatura y menor humedad relativa en las noches. El sistema de parafina oscilo en cada una de las secciones de la cámara con temperaturas entre 30°C y 44°C, estando por debajo de la temperatura de fusión del PCM (55-60 °C) (Reyes, Vásquez, & Sepúlveda, 2015); sin embargo, su alto calor latente permite absorber y liberar energía por más tiempo en comparación con los demás sistemas, conservando mayor estabilidad térmica en cada una de las bandejas; registrando temperaturas superiores de 4 - 6 °C en comparación al prototipo sin sistema auxiliar; el uso de la resistencia trajo consigo un aumento de temperatura constante con picos superiores de 7-23 °C en comparación al prototipo sin sistema; como era de esperarse este sistema proporciono mayor temperatura en horas de la noche y madrugada pues su fuente de energía es la electricidad. En cuanto los sistemas de botellas y piedras volcánicas presentaron un comportamiento similar siendo el horario de ausencia de radiación solar, las botellas pet, el que presenta mayores valores de temperatura. Ambos comportamientos de almacenamiento son evidenciados por Bistoni y otros (2002), el cual analizo dos sistemas de almacenamiento térmico de tipo invernadero de 15 m<sup>3</sup> cada uno, siendo uno de tipo lecho de piedra y otro de agua en

65

botellas de plástico; obteniendo resultados similares, por lo que este estudio demostró que, para el mismo tiempo de carga de energía térmica, el lecho de agua acumula 1,45 veces más que el lecho de piedra.



Figura 14. Temperatura parte media de la cámara con los sistemas auxiliares vs tiempo.

# Fuente. Autor

La parafina, se mostró como el sistema que mantuvo los menores valores de humedad relativa en el aire dentro de la cámara del secado, registrando valores entre 45 - 50%, y disminuyendo hasta un 30% de humedad relativa frente al ambiente (75 - 80%), lo cual se puede atribuir a su estable descarga de energía térmica almacenada; comparada con las piedras volcánicas y el agua en botellas pet (Figura 15). La resistencia eléctrica, esta presento picos variables de humedad relativa, debido a su funcionamiento intermitente, pero logrando evaporar mayor contenido de agua en el aire en comparación con los otros sistemas.



Figura 15. Humedad relativa parte media de la cámara con los sistemas auxiliares vs tiempo

Fuente. Autor

**6.2.3** Evaluación de los sistemas de almacenamiento de energía junto con resistencia térmica. En la Figura 16 el periodo de ausencia de radiación, no se observan diferencias significativas en cuanto a la variación de temperatura, sin embargo, los diferentes sistemas muestra picos de temperatura entre 27 - 33 °C, lo cual es favorable en el secado de cacao frente a la temperatura ambiente promedio de 22 °C en horas de la noche. Este comportamiento muestra ser independiente de las condiciones meteorológicas, puesto que las mismas fueron variables en los diferentes ciclos para cada sistema.



**Figura 16.** Temperatura de los sistemas auxiliares junto a la operación de resistencia eléctrica parte media vs tiempo

Fuente. Autor

En la Figura 17 diferentes sistemas auxiliares de almacenamiento de energía térmica mostraron comportamiento similar durante el primer ciclo en horas de la noche. Sin embargo, el sistema de parafina mostro un comportamiento favorable en los ciclos 1 y 3, conservando menor cantidad de humedad relativa en el aire, evitando la condensación de humedad; seguido por las piedras en los tres ciclos. Este comportamiento en las piedras puede ser debido a lo estudiado por Bistoni, y otros (2002), donde se afirma que el sistema de almacenamiento térmico necesita alrededor de 5 horas de exposición constante de calor para su funcionamiento.



**Figura 17.** Humedad de los sistemas auxiliares junto a la operación de resistencia eléctrica parte media vs tiempo

Fuente. Autor

# 6.3 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL FLUIDO EN EL SOFTWARE ANSYS CFX

**6.3.1** Validación de los resultados. Como se muestra en la Figura 18, los datos obtenidos para la simulación del modelo computacional presentan un buen ajuste con un rango de diferencia menor a los 4 °C frente al comportamiento experimental de la variación de temperatura dentro de la cámara de secado del prototipo para las diferentes condiciones de radiación solar como fuente de energía térmica.

**Figura 18.** Gráfico de temperatura frente a la radiación solar para las temperaturas promedio registradas experimentalmente por cada datalogger y simuladas de los puntos de medición en cada intensidad horaria.



Fuente. Autor

**6.3.2** Simulación computacional del flujo de aire a través de las bandejas. En la Figura 20, se muestra la caída de presión en función de la velocidad de entrada de aire al sistema de secado con un ajuste de R<sup>2</sup>=99% entre los datos y la ecuación (30) ajustada. En cuanto a la caída de presión a una velocidad de 2,0 m/s entre la geometría elipsoide (a) y la bandeja como medio poroso (b), se observan valores similares en un rango - 27,983 y 58,650 Pa (Figura 19), resultados similares obtuvieron Kenghe, Nimkar, & Shirkole (2011); Figueiredo, Dantas, Silva, Olivier, & Silva (2012). Los valores de los coeficientes de resistencia lineales y cuadráticos (a y b) obtenidos ajustando la Ec. (29) fueron 25,82  $\frac{kg}{m^3s}$  y 295,16  $\frac{kg}{m^4}$  respectivamente, los cuales son dependientes al producto; datos similares fueron reportados por Goneli, Corrêa, Figueiredo, Kirsch, & Botelho (2020) en el estudio de granos de ricino para estos parámetros de resistencia al flujo.

**Figura 19.** Contorno de presión para una velocidad de entrada de aire de 2,0 m/s. Granos remplazados por geometría elipsoide (a); bandejas como medio poroso (b).



Fuente. Autor

**Figura 20.** Caída de presión en función de la velocidad de entrada del aire. Datos calculados por la Ec. (30) (línea). Simulación CFD (puntos).



# Fuente. Autor

Los valores obtenidos para la caída de presión en el mismo rango de velocidad de entrada del fluido (aire) son similares a lo reportado por Altino & Ferreira (2019), quienes obtuvieron entre 0,5 y 1500  $\frac{Pa}{m}$  para avena (14% b.h.) y 0,10 y 1200  $\frac{Pa}{m}$  para lentejas

(11,4% b.h.) demostrando, además, que la resistencia al flujo de aire varía de acuerdo con el contenido de humedad en los sólidos.

**6.3.3** Post procesamiento - análisis del contorno de temperatura. El flujo de aire dentro del prototipo del secador solar se simuló utilizando el paquete de software ANSYS-CFX. El dominio computacional incluye el secador con las bandejas bajo un enfoque de medio poroso de acuerdo a la resistencia al flujo que presentan los granos de cacao.

**Figura 21.** Contorno de temperatura (sección transversal central). Condición de radiación 300 W/m^2 (a); 600 W/m^2 (b); 1000 W/m^2 (c).



Fuente. Autor
**Figura 22.**Representación del volumen del fluido y temperatura correspondiente (sección transversal central). Condición de radiación 300 W/m^2 (a); 600 W/m^2 (b); 1000 W/m^2 (c).



Fuente. Autor

**Figura 23.** Contorno de la densidad del fluido (sección transversal central). Condición de radiación 300 W/m^2 (a); 600 W/m^2 (b); 1000 W/m^2 (c).



Fuente. Autor

El plano analizado tanto para la Figura 21 como para las demás figuras de contorno siguientes Figura 22, se sitúan en el centro del secador (eje YZ) abarcando las secciones de entrada del flujo a 25 °C y 0,1 m/s, colector solar, cámara de secado y salida del flujo; para las tres condiciones de radiación en el colector, 300, 600 y 1000 W/m<sup>2</sup> siendo mañana, tarde y mediodía respectivamente. Se puede observar en la Figura 21, que la condición (a), alcanza la menor distribución de temperatura en la cámara de secado frente a las demás condiciones, con una temperatura de salida del flujo de 30,53 °C disminuyendo a medida que el flujo asciende por la cámara, obteniendo 32,4 °C como valor promedio en esta zona. Para la condición (b) y (c), se observa un incremento de temperatura frente a la condición (a) con una temperatura del flujo a la salida de 38,6 °C y 37,82 °C respectivamente y valor promedio de 32,21 °C (b) y 48,51 °C (c) en esta área. Cabe destacar que en aquellos puntos donde se disparan los valores, se debe al efecto de la malla de la lámina de policarbonato, debido a que algunos elementos de esta zona de la malla en el preprocesamiento no cumplen con los valores correctos de asimetría y ortogonalidad, lo que se refleja en el momento de la resolución de ecuaciones para el post-procesamiento.

Para las tres condiciones que se muestran en la Figura 21, la parte del flujo de aire que circula en áreas más cercanas a la lámina de policarbonato adquieren una temperatura más alta, debido a la transferencia de calor por convección entre el aire que entra a temperatura ambiente y la superficie del material; donde, en la zona inferior de la cámara de secado junto al colector para la condición (a) en horas de la mañana presenta mayor temperatura; esto, también se ve reflejado en la Figura 24 y Figura 25 presentando un pico de 35 °C y velocidad de 0,13 m/s, incluso superiores a las demás condiciones para una altura entre 0,3 y 0,4 m, comportamiento que puede relacionarse con las bajas fuerzas de empuje en esta condición, baja diferencia de temperatura y densidad, generando una corriente advectiva estática en la parte inferior a la placa de policarbonato, resultados similares reporta Rodriguez, (2008). Además, se observa a largo de la cámara para las tres condiciones (a, b, c Figura 21), una transferencia calor dentro del flujo de aire proporcional a la cantidad de energía radiante. Como es de esperarse, se observa en la Figura 23, la estrecha relación entre la densidad del fluido y la temperatura, donde, es claro el efecto de la diferencia de densidades en gases ideales

siendo el fluido más frío quién desciende y el más caliente asciende a lo largo de la estructura, con mayor desplazamiento por la pared delantera de la cámara, donde el mayor volumen de fluido caliente se presenta en la condición (c) para horas del mediodía con rango de temperatura desde 42 a 58 °C como se observa en la Figura 21; por otro lado, disminución de temperatura aguas abajo en la ventilación de entrada y salida muestra el efecto de enfriamiento convectivo del aire ambiente entrante a la cámara de secado.

En cuanto a la temperatura alcanzada a lo largo de la altura del prototipo (Figura 24), como es de esperarse, la condición de radiación de 1000  $\frac{W}{m^2}$  es la que presenta los mayores valores de temperatura, con un rango para la altura de la cámara de 38 a 53 °C. Por otro lado, la temperatura obtenida para las condiciones de 300 y 600  $\frac{W}{m^2}$  no presentan gran variación, sin embargo, se obtiene en esta última una temperatura de salida de 43 °C frente a 39 °C para la primera respectivamente.

**Figura 24.** Variación de la temperatura en la altura del secador (sección transversal central) para cada condición de flujo de calor 300 W/m<sup>2</sup> (a); 600 W/m<sup>2</sup> (b); 1000 W/m<sup>2</sup> (c).



Fuente. Autor

**6.3.4** Análisis de contorno de velocidad y vectores de velocidad 2D. Para condiciones del flujo de aire que ingresa al sistema a 25 °C y 0,1 m/s de velocidad, se observa en la Figura 25, la velocidad del fluido incrementa en la salida lo cual, se debe a la disminución de la sección transversal en esta zona. Adicionalmente, se puede ver que la condición (a) presenta mayor velocidad en el colector, en la cámara y el colector alrededor de 0,05 m/s comparada con las condiciones (b) y (c) las cuales se encuentran entre 0,08 y 0,12 m/s respectivamente.

**Figura 25.** Contorno de velocidad del flujo de aire (sección transversal central). Condición de radiación 300 W/m<sup>2</sup> (a); 600 W/m<sup>2</sup> (b); 1000 W/m<sup>2</sup> (c).



Fuente. Autor

En cuanto a las zonas de menor velocidad como la parte baja de la cámara y profunda del colector, los vectores (Figura 26) presentan una tendencia a recircular, con disminución de velocidad generando mayor volumen y retención del fluido, pues las fuerzas de empuje débiles del diseño del prototipo no generan efecto de salida de succión, impidiendo que el aire se mueva por una mayor área en las bandejas disminuyendo el tiempo y homogeneidad de secado del producto. Es decir, si la velocidad del flujo es mayor, mayor será la transferencia de calor por convección y por tanto mayor la tasa de evaporación y menor el tiempo en las primeras etapas de secado, si por el contrario es menor, el tiempo de secado aumenta y el flujo de calor húmedo retenido

afecta las condiciones composicionales del producto agropecuario. Este comportamiento es común en secadores de bandejas, pues tienen la desventaja de no secar el producto uniformemente requiriendo mayores velocidades de aire o rotación de las bandejas (Okos y otros, 1992).

**Figura 26.** Vectores de velocidad 2D (sección transversal central). Condición de radiación 300 W/m<sup>2</sup> (a); 600 W/m<sup>2</sup> (b); 1000 W/m<sup>2</sup> (c).





**6.3.5** Modificaciones al diseño de prototipo de secador solar propuesto. De acuerdo a lo observado en la Figura 27 el flujo de aire dentro del prototipo de secado presenta mayor distribución y dirección homogénea dentro de la cámara en la condición con ducto en el centro superior de la cámara. Por otro lado, en las condiciones de ducto en los extremos izquierdo y derecho según el plano transversal, el flujo presenta una desviación hacia el punto de succión que genera el mismo mecanismo, creando menor eliminación del flujo húmedo por área de bandejas. Luego, con el fin de identificar la altura más favorable para el diseño, se obtiene en la Figura 28 la condición de 3m (d), con la mayor distribución de la velocidad que presenta el flujo a lo largo de la sección de secado con un rango de 0,093 y 0,28 m/s en la mayor área de la cámara; este comportamiento es favorable teniendo en cuenta lo descrito por Iriarte, y otros (2011), quien afirma que dicha mejora en el flujo ascendente favorece la circulación del fluido y evita la retención de aire húmedo

como de excesivas temperaturas que afectan el producto, comportamiento que es común y desfavorable en secadores de gabinete. Cabe resaltar que dentro de la chimenea se presentan mayores valores de velocidad debido al efecto de gravedad térmica producido por la diferencia de densidad entre el aire interno y el aire ambiente, pues el flujo de aire producido por la chimenea es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de densidad del aire entre estos puntos (Condorí, Mealla, & Saravia, 2001) causando que el aire que se calienta (menos denso) en la chimenea suba; a su vez, este aumento de temperatura en el fluido que pasa por la chimenea se da por mecanismo de transferencia de calor por convección entre la energía radiante aplicada a la pared de la chimenea y el aire que viene de la cámara de secado incrementando el flujo ascendente dentro del sistema, condición fundamental para la circulación de aire en el secador.

**Figura 27.** Contorno de velocidad. Prototipo con adición de ducto - efecto chimenea (1,5 m) en diferentes ubicaciones sobre la cámara. Radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 28.** Contorno de velocidad del flujo de aire modificando la longitud del ducto - efecto chimenea. Radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Longitudes 1,5 m (a), 2,0 m (b), 2,5 m (c) 3,0 m (d).



Fuente. Autor

Cabe resaltar que la propuesta del efecto chimenea se basa en lo afirmado por Iriarte, y otros (2011); Teixeira & Malpica (2016) donde, el uso de la misma permite controlar el tiempo de permanencia del aire dentro de la cámara y aumentar su flujo másico, logrando

incrementar así las velocidades del aire, mayor fuerza de empuje y tasa de remoción de humedad, disminuyendo a su vez, la temperatura del aire y eliminación de aire húmedo para que el producto a secar no se vea perjudicado.

Como última modificación al diseño del prototipo de secado se simuló la condición de un aumento de 5° a la inclinación del colector frente al diseño inicial, facilitó la dirección del flujo de aire que entra al colector y se dirige al producto. Los resultados para la condición de velocidad tanto para el sistema sin modificación como para el sistema con todas las modificaciones mencionadas se observan en la Figura 29 obtiene una notable diferencia en la velocidad del flujo dentro del sistema de secado, pues se obtienen valores superiores en una mayor área de la cámara de secado para el sistema con las modificaciones propuestas, lo cual, permite incrementar las fuerzas de empuje y demás condiciones desfavorables mencionadas, que se producen en el sistema sin modificaciones. Adicionalmente, la distribución del flujo dentro del prototipo simulado (Figura 30) para el sistema modificado (b), muestra un comportamiento de mayor estabilidad u homogeneidad ascendente en las corrientes de flujo que pasan por las bandejas de secado, comparado con el comportamiento de mayor turbulencia en la parte trasera de la cámara que presenta la condición (a).

**Figura 29.** Contorno de velocidad. Prototipo sin modificación (a); prototipo con modificaciones de ducto de 3 m en el centro superior de la cámara con variación de 5° a la inclinación del colector (b).



Fuente. Autor



Figura 30. Distribución del flujo de aire en el prototipo sin modificaciones (a); con modificaciones.

# 7. CONCLUSIONES

- La aplicación de secado bajo condiciones controladas de laboratorio para los granos de cacao (*Theobroma cacao L*) estudiados permitieron estudiar el efecto de la temperatura de proceso sobre la cinética de secado, difusividad efectiva y energía de activación. Obteniendo un comportamiento de reducción del tiempo de secado con el incremento de la temperatura (30, 40, 50, 60 °C); el ajuste de los datos de razón de humedad con respecto al tiempo, a cinco modelos matemáticos de secado en capa fina para productos agrícolas reportados en literatura demostraron ser útiles para describir el comportamiento de cinética, sin embargo, el modelo de Page presentó el mejor ajuste y predicción de los datos coeficientes de difusividad efectiva del agua obtenidos fueron 1,0504 x10<sup>-11</sup>, 1,3989 x10<sup>-11</sup>, 1,8768 x10<sup>-11</sup> y 3,1749 x10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s para 30, 40, 50 y 60 °C, respectivamente; la energía de activación fue de 30,187 kJ/mol y factor de Arrhenius de 1,578 x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s siendo estos resultados obtenidos, acordes a lo reportado en estudios para productos agrícolas.
- Los diferentes sistemas auxiliares demostraron proporcionar energía térmica al prototipo de secador, sin embargo, el sistema de parafina presentó mayor desempeño en horas de ausencia solar; el uso de este sistema permitió absorber y liberar la energía térmica almacenada por más tiempo en comparación con los demás sistemas, alcanzando 4 6 °C por encima de lo obtenido con el prototipo sin sistema auxiliar. Al acoplarlo con la resistencia eléctrica se lograron temperaturas entre 5 y 11 °C por encima y hasta un 30% de humedad relativa comparado con el ambiente.
- La dinámica del flujo de aire y de transferencia de calor al interior del prototipo de secador fue analizada mediante una simulación en CFD. El modelo simulado fue validado con datos experimentales de temperatura. El abordaje de medio poroso para representar las bandejas conteniendo los granos de cacao permitió realizar simulaciones eficientemente, con bajo recurso computacional.

- Los resultados de las simulaciones permitieron identificar regiones dentro de la cámara de secado con bajas fuerzas de empuje y bajas velocidades de aire, y algunas regiones con temperaturas excesivas (>52°C). Estas condiciones pueden afectar la calidad final de los granos de cacao.
- La incorporación de un ducto de 3 m de longitud para la salida del aire húmedo y variación en el ángulo de inclinación del colector; demuestran ventajas significativas en las fuerzas de empuje en el fluido. El aumento de esta variable es proporcional al aumento en la altura del ducto. Con esta modificación se observan corrientes de flujo distribuidas de manera más uniforme a lo largo de la cámara, al igual que una mejor distribución de temperatura.

# RECOMENDACIONES

Se debe tener en cuenta que, si bien hay un aumento significativo en la velocidad de flujo dentro del prototipo de secado y distribución del mismo, este aún requiere mano de obra con mayor especialización para la construcción del modelo anterior en donde se tengan en cuenta:

- Realizar pruebas experimentales de secado con granos de cacao dentro del prototipo, permitiendo evaluar los tiempos de secado tanto para el sistema sin cambios en su configuración geométrica como con el rediseño, logrando analizar la eficiencia del proceso y mejoramiento condiciones finales del producto.
- Un sistema de adecuación para la incorporación del sistema térmico auxiliar, en este caso la parafina como el de mayor almacenamiento energético, de forma que se distribuya equitativamente en el colector con el fin de crear mayor transferencia de calor por convección al fluido circulante por el prototipo de secado.
- Para la implementación de los sistemas combinados por resistencia térmica se debe instalar un sistema de control que permita un mecanismo automático a las condiciones adversas del medio ambiente, evitando mano de obra para la operación del equipo futuro.
- Se recomienda simular el modelo computacional bajo condiciones transitorias donde, no se establezcan valores fijos de radiación solar y temperatura del fluido ambiente, las cuales cambian dependiendo de las condiciones climáticas, obteniendo mayor exactitud en el comportamiento fluido dinámico.
- Se deben realizar estudios más exhaustivos sobre el rediseño de la geometría del prototipo, tales como, distribución de las bandejas y variaciones en altura y longitud del colector, con el fin de garantizar la total homogeneidad en la distribución del flujo circundante a través del producto a secar, considerando los cambios propuestos en el presente estudio, y los requerimientos de materiales de bajo costo para su aplicación en el mayor porcentaje de centros de acopio para granos de cacao, que en su mayoría pertenecen a pequeños agricultores.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Alcaldía Municipal de Ibagué. (2010). Documento técnico de soporte No 5: Atributo Equipamientos. Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial. Tolima, Colombia.
- Alean, J. D. (2011). Modelado y simulación del secado de cacao con aire. (Tesis de maestría). Universidad nacional de Colombia sede Medellín. Colombia.
- Altino, H. N., & Ferreira, C. (2019). Prediction of pressure drop through packed beds of granular materials: influence of moisture reduction and air velocity. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22. DOI: https://doi.org/10.1590/1981-6723.22818.
- Amanlou, Y., & Zomorodian, A. (2010). Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. *J. Food Eng, 101*(1), 8-15.
- Ansys. (2020). ANSYS, Inc.com. Obtenido de Ansys Student Free Software Download: https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student.
- ANSYS Inc. (2013). ANSYS Fluent V2F Turbulence Model Manual. Corporación ANSYS Inc., U.S.A. Obtenido de: http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20V2F%20Turbulence%20 Model%.
- Arrieta, M. A., & Monge, O. N. (julio de 2018). Diseño de la Cámara de Secado de una Máquina Deshidratadora por Atomización de Leche para Bajos Volúmenes de Proceso. (*Trabajo de grado*). Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. Universidad de Costa Rica.
- ASOHOFRUCOL, P. F. (18 de mayo de 2013). Desarrollo de la Fruticultura en el Tolima.
   Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural MADR, Gobernación de Tolima, Fondo Nacional de Fomento Hortofrutícola – FNFH, Asociación Hortofrutícola de Colombia – Asohofrucol, sociedad de Agricultores y Ganaderos del Valle del Cauca – SAG, p. 47.
- Ayyappan, S., & Mayilsamy, K. (Agosto de 2010). Experimental investigation on a solar tunnel drier for copra drying. *Journal of Scientific and Industrial, 69*(8), 635-638.

- Bach Floresmilda, C. C. (2018). (*Trabajo de grado*). Temperatura y espesor de rodajas para secar ñame blanco (*Dioscorea trífida*) y producir harina. Universidad Nacional de Jaén. Jean, Perú.
- Bahari, M., Najafi, B., & Babapoor, A. (2020). Evaluation of α-AL2O3-PW nanocomposites for thermal energy storage in the agro-products solar dryer. *Journal of Energy Storage*, *28*, 101-181 doi:10.1016/j.est.2019.101181.
- Barbosa, C. G., & Vega, M. H. (2000). Deshidratación de Alimentos. España: Editorial ACRIBIA S.A.
- Bayona, C. A., Londoño, L. P., & Nieto, E. A. (2015). Identificación del modelo de turbulencia más adecuado, utilizando software de dinámica de fluidos computacional, para el diseño del vehículo urbano de la competencia Shell Eco Marathon. (*Trabajo de grado*). Colombia: Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá.
- Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; Incropera, F. P; DeWitt., D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* United States of America : John Wiley & Sons.
- Besnier, B. M. (06 de 2019). Determinación de difusividad efectiva en la impregnación de pino radiata con silicato de sodio. (*Trabajo de grado*). (U. d. Bío-Bío, Ed.)
  Concepción, Chile. Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/3457
- Bistoni, S., Iriarte, A., Luque, V. H., & Saravia, L. (2000). Caracterización de un acumulador de piedra con flujo de aire no reversible. (AVERMA, Ed.) *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 4*, 63-68.
- Bo He, F. S. (18 de 12 de 2000). Technical grade paraffin waxes as phase change materials for cool thermal storage and cool storage systems capital cost estimation. (D. o. Technology, Ed.) *Energy Conversion and Management, 43*(13), 1709-1723. doi: https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00005-X
- Bravo, D. H. (31 de 05 de 2018). Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica. (U. S. (USFQ), Ed.) A Survey of Materials for Solar Thermal Energy Storage, 23(2), 144-165. doi.org/10.14483/23448393.12510

- Bustos-Vanegas, J., Hempel, S., Janke, D., Doumbia, M., Streng, J., & Amon, T. (2019).
   Numerical simulation of airflow in animal occupied zones in a dairy cattle building.
   *Biosystems Engineering*, 186, 100-105.
- Caracol, R. (04 de julio de 2021). Sitio web oficial de Caracol Radio Ibagué. Obtenido de https://caracol.com.co/programa/2021/07/04/al\_campo/1625351500\_546558.htm
- CEM. (julio de 2015). DT-171 Datalogger de Temperatura y Humedad. Ficha Técnica. Industrias Asociadas. Recuperado de: https://www.industriasasociadas.com/wpcontent/uploads/2016/03/DT-171.pdf.
- Chapalbay, A. Y., & Reinoso, Q. P. (2011). Diseño y simulacion del funcionamiento de un secador de flujo forzado para madera permeable con capacidad de 43m3/mes, utilizando un quemador con biomasa. *Trabajo de grado*. Sangolqui: Escuela politecnica del ejercito.
- Chavan, A., Vitankar, V., Mujumdar, A., T. B. (2020). Natural convection and direct type (NCDT) solar dryers: a review. *Drying Techonology*, 1-22. doi: https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1753065
- Chinenye, N. M., & Ogunlowo, A. (December de 2010). Cocoa bean (*Theobroma cacao L*) Drying kinetics. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 70(4):633-639.
- Collazo-Abreu, P. L., Morejón-Mesa, Y., Fernández-Chuairey, L., & Vázquez-Alfonso, Y. (2018). Modelos matemáticos y experimentales para el análisis del secado solar de semillas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol.27 no.1 San José de las Lajas.
- Cruz, S. C. (2017). Diseño de un deshidratador solar para optimizar el tiempo de secado de almendras de cacao. Aramango amazonas. (*Trabajo de grado*). Universidad César Vallejo. Chiclayo, Perú.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1980). Solar engineering of thermal processes. Pp. 251-299: 3rd ed. New York: Wiley.
- elaplas. (s.f.). Propiedades fisicas policarbonato (PC). *Ficha Técnica*. Barcelona, España: Obtenido de: http://www.elaplas.es/wpcontent/uploads/policarbonato.pdf.
- Enriquez, G. A. (1985). Curso sobre el cultivo del cacao. En C. T. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica: AGRINTER AGRIS F00 2110.

- Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Draying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of food engineering*, Vol. 63, No. 3, 2004, pp. 349-359.
- Espinoza, J. (2016). Innovación en el deshidratado solar. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24 (Especial), 72–80. https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000500010
- Equipe ESSS. (24 de junio de 2016). Dinámica de Fluidos Computacional: ¿que es? Obtenido de Blog ESSS: Obtenido de: https://www.esss.co/es/blog/dinamica-defluidos-computacional-que-es/
- Farrera, M. F. (07 de 2015). Diseño de un sistema de enfriamiento y calentamiento de un molde de acero mediante un intercambiador de calor para la optimización del proceso de rotomoldeo. (*Trabajo de grado*). Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tuxtla Gutiérrez, México.
- Fedecacao. (2017). Federación nacional de cacaoteros. Estadísticas del sector cacaotero. Recuperado de http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-02-12-17-20-59/nacionales.
- FEDECACAO. (12 de Agosto de 2019). Producción de cacao creció un 11% durante el primer semestre del 2019. Sección Noticias. Colombia: Fedecacao. Bogota D.C, Colombia. Obtenido de https://sac.org.co/produccion-de-cacao-crecio-un-11durante-el-primer-semestre-del-2019/
- FEDECACAO, F. N. (10 de mayo de 2018). Producción de cacao en el primer trimestre bajó 12%. Sección Noticias. Colombia: Recuperado de la Página Web Oficial de Fedecacao, http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-04-23-20-00-33/621-produccion-de-cacao-en-el-primer-trimestre-bajo-12.
- Figueiredo, N. A., Dantas, B., Silva, J., Olivier, N., & Silva, M. (2012). The resistance to the flow of air of the beans of peanut with different percentile of impurity. *Nucleus* , 9(1):85-92.
- FINAGRO, F. p. (noviembre de 2020). Inteligencia de Mercado: Cacao. *Ficha Cacao Versión II*. Colombia: Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios -UGRA.
- García, L., Mejía, M., & Mejía, D. (2012). Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, Vol. 9 No. 2.

- Giraldo, A., Arévalo, A., Ferreira, A., Ferreira, P., Valdes, J., & Pavlak, M. d. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*, ISSN 0101-2061 Campinas, 30(1): 179-182.
- Gobernación del Tolima. (2019). *Cacao Origen Tolima*. Recuperado el 20 de 11 de 2019, de Gobernación del Tolima: https://cacaoorigentolima.com/proyecto/
- Goneli, L. D., Corrêa, C., Figueiredo, A., Kirsch, R. H., & Botelho, F. (2020). Static pressure drop in layers of castor bean grains. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.40, n.2, p.184-191
  Doi: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p184-191/2020.
- Hernandez, L. R. (26 de agosto de 2021). Producción de cacao aumentó 11% en el primer semestre de 2021. Sección noticias, economía. Colombia: RCN Radio.
- Hii, C. L., Law, C. L., Cloke, M., & Suzannah, S. (2009). Thin layer drying kinetics of cocoa and dried product quality. *Biosystems Engineering*, 102(2), 153–161. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2008.10.007.
- HII, C., LAW, C., & CLOKE, M. (2008). Modelling of thin layer drying kinetics of cocoa beans during artificial and natural drying. *Journal of Engineering Science and Technology*. Vol. 3, 1, pp. 1 - 10.
- ICONTEC. (28 de mayo de 2003). Norma Técnica Colombiana 1252 Cacao en Grano (Tercera Actualización). Recuperado de: https://cupdf.com/document/ntc-1252cacao-en-grano-55a0bc2cb4f6a.html. Colombia
- IDEAM & UPME. (2021). Atlas de Radiación Solar de Colombia. República de Colombia.: Ministerio de Minas y Energía - Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial. Recuperado de http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html
- IDEAM. (4 de 10 de 2020). Climatografía de las principales ciudades. Bogota D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (26 de 10 de 2015). Introducción al Atlas Interactivo. Anexo atlas del Tolima. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Recuperado de http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/tolima\_texto.pdf

- IDEAM. (2015). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Bogotá D.C, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106 e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor,* Cuarta Edición. México D.F.: Prentice Hall ISBN 0-471-30460-3.
- Iriarte, A., Bistoni, S., Watkins, M., Luque, V., Sanchez, H., & Brizuel, L. (2011). Analisis de un secadero solar tendalero con torre central en conveccion natural. *Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET*, M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina.
- Inyang, U., Oboh, I., & Etuk, B. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8, 27-48. doi: 10.4236/aces.2018.82003.
- Kenghe, R., Nimkar, P., & Shirkole, S. (2011). Resistance of bulk lathyrus to airflow. *Acta Agrophysica*, 18(1):87-99.
- Koua, B. K., Koffi, P. M., & Gbaha, P. (enero de 2016). Moisture desorption isotherms characteristics of cocoa. *PAK. J. FOOD SCI., 26(3), 2016*, 143-152.
- Lema, A. I., Pontin, M. I., Sanmartino, A. P., Ziletti, M. N., Martinello, M., & et, a. (2007). Características del proceso de secado en capa delgada del perejil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA), 11*, 75-82.
- Lemus, M. R., Vega, G. A., & Moraga, N. O. (03 de 11 de 2011). Computational Simulation and Developments Applied to Food Thermal Processing. *Food Engineering Reviews, 3*, 121-135. doi:10.1007/s12393-011-9040-x
- López, E. C. (diciembre de 2011). Caracterización y evaluación de la eficiencia térmica y de secado en un deshidratador híbrido (solar gas). (Trabajo de grado). Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca.
- MacManus, N. (2009). Effect of Drying Temperature and Drying Air Velocity on the Drying Rate and Drying Constant of Cocoa Bean. Abia State, Nigeria: Michael Okpara

University of Agriculture, Department of Agricultural Engineering Umudike, P.M.B. 7267 Umuahia.

- MacManus, N., Ogunlowo, A., & Olukunle, O. (2010). Cococa Bean (*Theobroma cacao L*) Drying Kinetics. *Chilean Journal of Agricultural*, research 70(4):633-639.
- Martínez, S. L. (07 de 2020). Almacenamiento Inter estacional de energía térmica. La viabilidad de los diferentes sistemas para su aplicación en los edificios. (*Trabajo de grado*). Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- Maureira, P. J. (24 de Julio de 2006). Diseño y simulación de un secador de granos de cacao con colectores solares planos mediante convección forzada para una capacidad de 500 kg. (*Trabajo de grado*). Escuela Politécnica Del Ejército. Sangolquí, Ecuador.
- Maupoey, P. F., Grau, A. M., Barat, B. J., & Albors, S. A. (2016). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. (*Trabajo de grado*). Valencia, España: Universitat Politécnica de Valencia.
- MINAGRICULTURA. (2019). Comparativo de Área, Producción, Rendimiento y Participación Departamental por Cultivo. Base de datos, AGRONET MINCULTURA. Obtenido de https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3
- MINAGRICULTURA. (marzo de 2021). Cadena de cacao. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Obtenido de https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf
- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C., al. (15 de Septiembre de 2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, 321-344. doi:10.1016/j.solener.2020.07.098
- Mora, L. A. (2018). Análisis y optimización del requerimiento energético de un sistema integrado de tratamiento de residuos húmedos para la extracción de productos de alto valor comercial. (*Trabajo de grado*). San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

- Moses, J. A., Norton, T., Alagusundaram, K., Tiwari, B. K., et, & al. (2014). Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews, 6*(3), 43–55. doi:10.1007/s12393-014-9078-7
- Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M., & Amirnejat, H. (2011). Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. Energy pp.y, 36, 6433-6441.
- Naidiuk, O. L., & Torres, P. B. (2018). Introducción al análisis térmico mediante Ansys
   Workbench 16.0. En Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys
   (págs. 1-42). Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala.
- NASA. (2020). POWER Data Access ViewerPrediction Of Worldwide Energy Resource. Obtenido de Blog NASA - National Aeronautics and Space Administration: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/
- NASA, L. R. (05 de 08 de 2021). NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. *Data methodology*. Hampton, Estados Unidos: NASA Earth Science's Applied Sciences Program.
- Norton, T. J., Kumar, T. B., & Sun, D.-W. (01 de 2013). Computational fluid dynamics in the design and analysis of thermal processes: a review of recent advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 53*(3), 251-275. doi:https://doi.org/10.1080/10408398.2010.518256
- Nowak, D., & Lewicki, P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science* and Emerging Technologies, 5, pp. 353-360.
- Ochoa, C. I., Quintero, P. T., Ayala, A. A., & Ortiz, M. J. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window technique. *Journal of Food Engineering*, 109, 69–75.
- Okos, M., Narsimhan, Singh, R., & Weitnaurer, A. (1992). Food dehydration: In Heldman, D.R., Lund, D.B., edn. *Handbook of Food Engineering*, Marcel Dekker, New York.
- Ortega, I., & Gutiérrez, M. (2021). Almacenamiento térmico: el camino hacia la optimización de la gestión energética. *Documento de sitio Web*. Álava, España: The Basque Research and Technology Alliance. Obtenido de https://cicenergigune.com/es/blog/almacenamiento-termico-optimizar-gestion-energetica

- Ortíz, M. J. (2014). Modelación matemática del secado de alimentos por el método de ventana de refractancia. (*Tesis de doctorado*). Cali, Valle del Cauca, Colombia: Universidad del Valle.
- Pantoja, D. C., Osorio, O., Mejía, D. F., & Váquiro, H. A. (2016). Procesamiento de Arvejas (Pisum sativum L.). Parte 1: Modelado de la Cinética de Secado por Capa Delgada de Arveja, Variedades Obonuco Andina y Sureña. *Inf. tecnol. vol.27 no.1 La Serena*, ISSN 0718-0764. Obtenido de; http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000100009.
- Parra, A. C., Roa, G. M., Oliveros, C. E., & Sanz, J. R. (2017). Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino. Colombia: ISBN 978-958-8490-19-9 Cenicafé.
- Parra-Rosero, P. (diciembre de 2017). Modelación de un Proceso de Secado de Cacao Utilizando una Cámara Rotatoria Cilíndrica y Flujo de Aire Caliente. (*Tesis doctoral*). Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Parra, H. (02 de marzo de 2021). Tolima es el cuarto mayor productor de cacao en el país. Sección noticias, economía. Colombia: El Nuevo Día.
- Perez, M. Á. (2017). Guía de buenas prácticas de cosecha, fermentación y secado para la producción de cacaos especiales. *Coexca*. Colombia - Cooperación Suiza:
   Fundación Suiza para la cooperación técnica.
- Porras, F. J. (diciembre de 2013). Diseño, construcción y caracterización experimental de un secador solar de túnel tipo Hohenheim de convección forzada. (trabajo de grado). Bogotá D.C, Colombia: Universidad de los Andes. Obtenido de http://hdl.handle.net/1992/19915
- Prakash, O., & Kumar, A. (marzo de 2017). Solar Drying Technology. *Green Energy and Technology*. Springer Nature Singapore. DOI: 10.1007 / 978-981-10-3833-4
- Priyadarshini, Shukla, R. N., & Mishra, A. (2013). Microwave Drying Characteristics of Green Peas and its Quality Evaluation. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology*. Vol. 4, Number, pp. 445-452.
- Puente, D. L., Echegaray, P. E., Castro, M. E., Di Scala, K., Et, & Al. (10 de 2013).
  Aplicación de modelos matemáticos al proceso de secado asistido por infrarrojos de descartes de limón (*Citrus limon (L.*) Burm. F. Cv. Genova. *Dyna, 80*(181).

- Puziah, H., S. Jinap, K. S., & Asbi., A. (mayo de 1999). Effect of mass and turning time on free amino acid, peptide-N, sugar and pyrazine concentration during cocoa fermentation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. J. Sci. Food Agric. 78: 543-550.
- Reyes, A., Vásquez, J., & Sepúlveda, F. (30 de 08 de 2015). Análisis de ciclos fusión-solidificación de ceras de parafina. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*(12), 1-9. Obtenido de http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23869
- Ríos, G., Granados, M. F., Martínez, G., Félix, M. G., et, & al. (2011). Modelado Matemático en el Secado de Betabel (*Beta vulgaris*) en un Secador de Lecho Fluidizado y Caracterización. Universidad Autónoma de Zacatecas, 1(1).
- Riva, M., & Peri, C. (1986). Kinetics of sun and air-drying of different varieties of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 21:199-208.
- Rodriguez, J. M. (2008). Transferencia de calor, flujo de aire y similitud en un secador solar pasivo de tipo indirecto. (*Tesis de Maestría*). Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Romero, V., Cerezo, E., Garcia, M., Sanchez, M., et, & al. (2014). Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program. (U. d. Caribe, Ed.) *Energy Procedia*, *57*, 1651-1658. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.156
- SAC, S. d. (2019). Producción de cacao creció un 11% durante el primer semestre del 2019. Sección Noticias. Colombia: Fedecacao. Recuperado de https://sac.org.co/produccion-de-cacao-crecio-un-11-durante-el-primer-semestredel-2019/.
- Sánchez, B. E., & Falla, G. A. (2019). Influencia de la temperatura de secado en el contenido de polifenoles totales de un filtrante elaborado a base de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) y piña (*Ananas Comosus*). (*Trabajo de grado*). Universidad nacional del santa. Nuevo Chimbote, Perú.
- Sharma, G., Verma, R., & Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of food engineering*, 71 (2005) 282–286.

- Shuangmao, W. G., & Liu, X. (04 de 2011). Dynamic discharging characteristics simulation on solar heat storage system with spherical capsules using paraffin as heat storage material. *Renewable Energy*, 36, 1190-1195. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.012
- Sonthikun, S., Chairat, P., Fardsin, K., Kirirat, P., Kumar, A., & Tekasakul, P. (2016). Computational fluid dynamic analysis of innovative design of solar-biomass hybrid dryer: An experimental validation. *ELSEVIER, Renewable Energy.*
- Swisscontact. (2017). Guía de buenas prácticas de cosecha, fermentación y secado para la producción de cacaos especiales. *Coexca*. Emajada de Suiza en Colombia: Cooperación Suiza: Fundación Suiza para la cooperación técnica.
- Teixeira, J. M., & Malpica, F. A. (2016). Desarrollo de un modelo matemático para dimensionar un deshidratador solar directo de cacao. *ngeniería Mecánica.*, Vol. 19. No. 1, p. 30-39.
- Tétreault, J., & Bégin, P. (2018). Silica Gel: Passive Control of Relative Humidity Technical Bulletin 33. *Canadian Conservation Institute (CCI) Technical Bulletins*, 1-22.
- Tinoco, H., & Ospina, D. (2010). Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado. *EIA*, Número 13, p. 53-63.
- Togrul, H. (2005). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, V. 77 (2006) 610–619.
- Torregroza, E. A., Montes, M. E., Ávila, G. A., & Remolina, L. J. (27 de 07 de 2014).
  Modelado de las cinéticas de secado de tres variedades de yuca industrial. (U. N.
  Colombia, Ed.) Dyna, 81(186), 184-192.
  doi:https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.39923
- UNIDO. (1985). Alimentos secos. En UNIDO, Programa de Capacitación para Empresarias de la Industria de Procesamiento de Alimentos (Vol. 2, pág. 290).
   Food and nutritión.
- Váquiro, H. A. (2009). Contribución al estudio y optimización del secado intermitente: aplicación al secado de mango (*Mangifera indica L var . Tommy Atkins*). (*Tesis doctoral*), Dpto de Tecnología de Alimentos. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

- Varón, T. (2019). Vigilancia Tecnológica en 10 sectores Productivos del departamento del Tolima. Tolima: Edo Impresores.
- Vega, A. A., & Lemus, R. A. (2006). Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (Vasconcellea pubescens). *Información Tecnológic*, Vol. 17 N°3-2006, pág.: 23-31.
- Vélez, P. S., Ciro, V. H., Osorio, S. J., Largo, A. E., et, & al. (2019). Estudio del efecto de la geometría de un secador solar típico para café con CFD. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 18*(35), 149-161. doi:https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a9.

# ANEXOS

**ANEXO A.** Dimensiones promedio del grano de cacao (Theobroma L) seco estudiado en laboratorio.



Fuente: Autor

**ANEXO B.** Muestras de granos de cacao seco obtenidos en laboratorio para las diferentes condiciones de temperatura estudiadas (30, 40, 50 y 60 °C).





Fuente: Autor

**ANEXO C.** Gráficas obtenidas en Matlab R2011b versión estudiantil para cinética de secado ajustadas a los diferentes modelos matemáticos y sus parámetros.

- i. Modelos Logarítmico (a); Midili-Kucuk (b); Newton (c); Page (d); - Page modificado (e) para la prueba de 30 °C.





Fuente: Autor

- ii Modelos Logarítmico (a); Midili-Kucuk (b); Newton (c); Page (d); - Page modificado (e) para la prueba de 40 °C





- iii Modelos Logarítmico (a); Midili-Kucuk (b); Newton (c); Page (d); - Page modificado (e) para la prueba de 50 °C

Fuente: Autor

- iv Modelos Logarítmico (a); Midili-Kucuk (b); Newton (c); Page (d); - Page modificado (e) para la prueba de 60 °C.



Fuente: Autor

ANEXO D. Prototipo de secador solar para cacao (Theobroma L).



**ANEXO E.** Sistemas de almacenamiento térmico auxiliar probados en el prototipo de secado.

- I. Resistencia eléctrica de 1200 W





Fuente: Autor



- II. Resistencia eléctrica dentro del colector

- III. Resistencia eléctrica dentro del colector, en la izquierda interruptor del sistema.

Fuente: Autor

- IV. Botellas pet con capacidad de 1 litro



# Fuente: Autor

- V. Parafina como sistema PCM



- VI. Piedra mineral



Fuente: Autor

**ANEXO F**. Dataloggers para registro de temperatura y humedad relativa empleados.



**ANEXO G.** Modelo 3D de la cámara de secado (a) sin geometrías de malla (b) con geometrías de malla.





### PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DE USUARIOS

### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Página 1 de 2

Código: GB-P04-F03

Versión: 04

Fecha Aprobación: 04/03/2019

Los autores:

Nombre Completo	Identificación N°
Maryli Jessenia Bohorquez Peña	1110596464
Kevin Esteban Garzón Alonso	1110592598
(an) la valuate d des	

Autorizar	x	
No Autorizar	Motivo:	

La consulta en físico y la virtualización de **mi OBRA**, con el fin de incluirlo en el repositorio institucional de la Universidad del Tolima. Esta autorización se hace sin ánimo de lucro, con fines académicos y no implica una cesión de derechos patrimoniales de autor.

Manifestamos que se trata de una OBRA original y como de la autoría de LA OBRA y en relación a la misma, declara que la UNIVERSIDAD DEL TOLIMA, se encuentra, en todo caso, libre de todo tipo de responsabilidad, sea civil, administrativa o penal (incluido el reclamo por plagio).

Por su parte la UNIVERSIDAD DEL TOLIMA se compromete a imponer las medidas necesarias que garanticen la conservación y custodia de la obra tanto en espacios físico como virtual, ajustándose para dicho fin a las normas fijadas en el Reglamento de Propiedad Intelectual de la Universidad, en la Ley 23 de 1982 y demás normas concordantes.

La publicación	de:
----------------	-----

Trabajo de grado X

Producto de la actividad académica/científica/cultural en la Universidad del Tolima, para que, con fines académicos e investigativos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad del Tolima. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento en el momento mismo que hago entrega del trabajo final a la Biblioteca Rafael Parga Cortes de la Universidad del Tolima.

> Universidad del Tolima Barrio santa Helena parte alta / A.A. 546 – Ibagué, Colombia Nit: 8907006407 PBX: 2771212 – 2771313 – 2771515 - 2772020 línea 018000181313 www.ut.edu.co


De conformidad con lo establecido en la Ley 23 de 1982 en los artículos 30 "...Derechos Morales. El autor tendrá sobre su obra un derecho perpetuo, inalienable e irrenunciable" y 37 "...Es lícita la reproducción por cualquier medio, de una obra literaria o científica, ordenada u obtenida por el interesado en un solo ejemplar para su uso privado y sin fines de lucro". El artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores" y en su artículo 61 de la Constitución Política de Colombia.

Identificación del documento:

Trabajo de grado presentado	CACAO (Theobroma Cacao L)
para optar al título de:	Ingeniero Agroindustriai

Quienes a continuación autentican con su firma la autorización para la digitalización e inclusión en el repositorio digital de la Universidad del Tolima, el día 23 del mes noviembre del año 2021.

Nombre Completo	Firma	Identificación N°.
Maryli Jessenia Bohorquez Peña	( Hatt	1110596464
Kevin Esteban Garzón Alonso	Kevin Estebah Garzon	1110592598

El autor y/o autores certifican que conocen las derivadas jurídicas que se generan en aplicación de los principios del derecho de autor.

Universidad del Tolima

Barrio santa Helena parte alta / A.A. 546 – Ibagué, Colombia Nit: 8907006407 PBX: 2771212 – 2771313 – 2771515 - 2772020 linea 018000181313 www.ut.edu.co