

ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE SECADO DE LOS GRANOS DE
CACAO EN PROTOTIPO DE TÚNEL Y SU INFLUENCIA EN LOS ATRIBUTOS DE
CALIDAD: UNA COMPARACIÓN CON EL MÉTODO TRADICIONAL DE
MARQUESINA

JUAN DAVID GUZMAN SANCHEZ

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ciencia y
tecnología Agroindustrial.

Director

JENIFER CRIOLLO NUÑEZ

Doctora en ingeniería con énfasis en alimentos

Codirector

ANGELICA PIEDAD SANDOVAL ALDANA

Doctora en ingeniería con énfasis en alimentos

UNIVERSIDAD DEL TOLIMA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRONOMICA

MAESTRIA EN CIENCIA Y TECNOLOGIA AGROINDUSTRIAL

Contenido

1.	JUSTIFICACION.....	11
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
3.	OBJETIVOS:.....	15
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	15
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4.	MARCO DE REFERENCIA.....	16
4.1.	El cacao y su importancia.....	16
4.1.1.	Descripción de la planta.....	16
4.1.2.	Condiciones de cultivo.....	16
4.1.3.	El Cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) y su relevancia económica y social	17
4.1.4.	Factores que influyen en la calidad del cacao.....	18
4.2.	Poscosecha de cacao.....	18
4.2.1.	Fermentación.....	18
4.2.1.1.	Etapas de la fermentación.....	19
4.2.1.2.	Factores que influyen en la fermentación.....	20
4.2.2.	Secado de los granos de cacao.....	21
4.2.2.1.	Métodos de secado.....	21
4.2.2.2.	Impacto del secado en la calidad de los granos de cacao.....	22
4.2.3.	Tostado.....	22
4.2.3.1.	Métodos de tostado.....	23
4.2.3.2.	Efectos del tostado en la calidad del cacao.....	23
4.3.	El secado del cacao como operación unitaria.....	23
4.3.1.	El secado.....	23
4.3.2.	Influencia del secado en la calidad del cacao.....	24
4.3.3.	Tipos de secadores empleados en el cacao.....	25
4.3.3.1.	Secado natural.....	25
4.3.3.2.	Secado tecnológico.....	25
4.3.4.	Variables claves en el proceso de secado.....	26
	Comparación métodos de secado.....	27
4.3.5.	27
4.4.	Túnel de secado solar Hohenheim.....	29

4.4.1.	Origen y desarrollo.	29
4.4.2.	Componentes y funcionamiento.	29
4.4.3.	Ventajas y desventajas del uso de un túnel Hohenheim.	30
4.4.4.	Aplicación en diferentes matrices alimentarias.	30
4.5.	Modelos matemáticos y su aplicación.	31
4.5.1.	Ecuación de GAB (Guggenheim-anderson-de Boer). ¡Error! Marcador no definido.	
4.5.2.	Modelos empíricos.	32
4.5.2.1.	Modelo de Newton.	32
4.5.2.2.	Modelo de Page.	32
4.5.3.	Balance de masa y energía.	33
4.5.3.1.	Balance de masa.	33
4.5.3.2.	Balance de energía.	33
4.5.4.	Comparación y aplicaciones en el secado del cacao.	34
5.	METODOLOGÍA.	36
	Diseño experimental.	37
5.1.	Acondicionamiento de los granos de cacao.	37
5.1.1.	Fermentación y secado de los granos de cacao.	38
5.1.2.	Análisis fisicoquímico de los granos de cacao fermentados y secos.	38
5.1.2.1.	pH.	38
5.1.2.2.	Humedad.	39
5.1.2.3.	Actividad de agua.	39
5.1.2.4.	Prueba de corte.	39
5.1.2.5.	Índice de fermentación.	39
5.2.	Cálculo de isotermas. ¡Error! Marcador no definido.	
5.2.1.	Modelos Matemáticos.	47
5.3.	Promedio Ponderado de Condiciones:	50
5.4.	Dinámica de Secado.	51
5.4.1.	Curvas de Secado:	51
5.4.2.	Tasa de Secado:	52
5.5.	Modelos de Secado:	53
5.5.1.	Balance de masa.	54
5.5.2.	El balance de energía:	55

5.6.	Validación y Comparación	56
5.7.	Análisis sensorial.	59
6.	Resultados y discusión.....	62
6.1.	Acondicionamiento de los granos cacao.	63
	Tabla 5. parámetros fisicoquímicos de los granos de cacao al finalizar la fermentación.	¡Error! Marcador no definido.
	Tabla 6. Índice de fermentación (IF) en los tres ensayos .	¡Error! Marcador no definido.
6.2.	Secado.....	68
6.2.1.	Condiciones ambientales del secado	68
	Tabla 7. Lapsos de desarrollo de los ensayos.	¡Error! Marcador no definido.
6.2.2.	dinámica de pérdida de masa y humedad.	71
6.2.3.	Modelado cinético del secado.....	76
6.3.	Análisis de compuestos volátiles y sensorial de los granos de cacao.....	83
6.3.1.	Análisis de compuestos volátiles por método de secado.....	83
	Tabla 9.	¡Error! Marcador no definido.
	Tabla 10.	¡Error! Marcador no definido.
6.3.2.	evaluación sensorial del licor de cacao.....	95
	Tabla 11	¡Error! Marcador no definido.
	Conclusiones.....	99
	Bibliografía.....	102

Lista de tablas.

Tabla 1 Comparación entre los distintos métodos de secado empleados en los granos de cacao.	28
Tabla 2 Ventajas y desventajas del uso de túneles de secado tipo Hohenheim.....	30
Tabla 3 Condiciones de uso del túnel Hohenheim aplicado a diversas matrices alimentarias.	31
Tabla 4 Comparación de los modelos matemáticos y su aplicación en el secado.....	34
Tabla 5 . parámetros fisicoquímicos de los granos de cacao al finalizar la fermentación....	63
Tabla 6 . Índice de fermentación (IF) en los tres ensayos	67
Tabla 7 Lapsos de desarrollo de los ensayos.....	68
Tabla 8 Parámetros de los modelos cinéticos de secado para el cacao en túnel solar y marquesina.....	79
Tabla 9 Distribución porcentual de las familias químicas de compuestos volátiles identificadas en granos de cacao secos en túnel solar tipo Hohenheim y marquesina tradicional (GC–MS, modo full scan).	84
Tabla 10 . Compuestos volátiles identificados en granos de cacao secos en túnel solar tipo Hohenheim y marquesina, sus notas aromáticas características.....	85
Tabla 11 Promedio de atributos sensoriales evaluados por el panel entrenado para los métodos de secado túnel solar Hohenheim y marquesina tradicional.	96

Lista de figuras.

Figura 1	Figura 1. Evolución de (a) humedad (% b.h.), (b) actividad de agua (aW), (c) pH interno y externo y (d) temperatura (°C) durante los seis días de fermentación para tres réplicas (F1, F2 y F3).	65
Figura 2	Variación de la temperatura (°C) y la humedad relativa (%) durante los tres ensayos de secado en túnel solar tipo Hohenheim y en la marquesina tradicional. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).	71
Figura 3.	Dinámica de la humedad del grano (% b.h.) y de la masa relativa (M/M ₀) durante el secado en túnel y marquesina. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).	73
Figura 4	Razón de humedad (MR) en función del tiempo durante el secado en (A) túnel solar tipo Hohenheim	74
Figura 5	Razón de humedad (MR) en función del tiempo durante el secado en (B) Marquesina Tradicional.....	74
Figura 6	. Razón de humedad (MR) promedio del secado en túnel solar tipo Hohenheim (±DE) y marquesina tradicional. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).	76
Figura 7	Ajuste de los modelos cinéticos de secado (Newton, Page y Henderson–Pabis) a los datos experimentales del túnel solar tipo Hohenheim. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).	78
Figura 8	. Ajuste de los modelos cinéticos de secado (Newton, Page y Henderson–Pabis) a los datos experimentales de la marquesina tradicional. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).	78
Figura 9	Comparación de los puntajes promedio por atributo sensorial entre granos de cacao secos en túnel solar y marquesina.....	96
Figura 10	Representación radar de los promedios sensoriales de los granos de cacao secos por ambos métodos.....	97

Resumen.

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo de alta importancia económica, social y cultural en Colombia, donde constituye una fuente significativa de ingresos para pequeños y medianos productores. Dentro de los procesos de poscosecha, el secado representa una etapa crítica para la conservación, estabilidad y calidad final del grano, ya que influye directamente en sus características fisicoquímicas y sensoriales. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo establecer las condiciones de secado de granos de cacao en un prototipo de secador solar tipo túnel Hohenheim y evaluar su influencia sobre los atributos de calidad del producto, comparándolo con el método tradicional de secado en marquesina.

Para ello se realizaron tres baches de secado en cada sistema, utilizando granos de cacao previamente fermentados provenientes de la misma unidad productiva, con el fin de garantizar condiciones iniciales homogéneas. Durante el proceso se registraron variables como pérdida de masa, evolución del contenido de humedad, número de volteos, temperatura y humedad relativa del aire, con mediciones realizadas cada dos horas durante la jornada de secado. A partir de estos datos se construyeron las curvas de secado y se analizó la cinética del proceso mediante modelos matemáticos de capa delgada. Entre los modelos evaluados, el modelo de Page presentó el mejor ajuste para describir la variación de la razón de humedad en función del tiempo de secado.

Los resultados mostraron que el secador solar tipo túnel alcanzó temperaturas internas más altas y estables que la marquesina, lo que permitió reducir el tiempo de secado a

aproximadamente dos días, mientras que en la marquesina el proceso requirió entre cuatro y cinco días dependiendo de las condiciones climáticas. Asimismo, el sistema de túnel presentó una mayor eficiencia en la remoción de humedad, logrando contenidos finales cercanos al 7 % y valores de actividad de agua compatibles con un almacenamiento seguro del grano.

El análisis sensorial, realizado con un panel entrenado, evidenció diferencias en los perfiles aromáticos de los granos obtenidos en cada sistema. Los granos secados en el túnel presentaron notas más definidas de carácter floral, frutal y achocolatado, mientras que los granos secados en marquesina mostraron mayor presencia de notas dulces y tostadas. Estos resultados se asocian con las diferencias en las condiciones térmicas y de ventilación durante el proceso de secado.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el secador solar tipo túnel representa una alternativa tecnológica eficiente y viable para el secado de granos de cacao, al permitir un mayor control de las condiciones de proceso, reducir el tiempo de secado y contribuir a la conservación de los atributos de calidad del grano.

Palabras clave: cacao, secado solar, túnel Hohenheim, marquesina, cinética de secado, análisis sensorial.

Abstract

Cocoa (*Theobroma cacao* L.) is a crop of high economic, social, and cultural importance in Colombia, where it represents a significant source of income for small and medium-scale farmers. Among postharvest operations, drying is a critical stage for preserving the quality, stability, and market value of cocoa beans, as it directly influences their physicochemical and sensory characteristics. In this context, the objective of this study was to establish the drying conditions of cocoa beans in a prototype Hohenheim-type solar tunnel dryer and to evaluate its influence on quality attributes, comparing its performance with the traditional sun-drying method using a drying house (marquesina).

Three drying batches were conducted in each system using previously fermented cocoa beans obtained from the same farm in order to ensure homogeneous initial conditions. During the drying process, variables such as mass loss, moisture evolution, number of bean turnings, air temperature, and relative humidity were recorded at two-hour intervals throughout the drying period. Based on these data, drying curves were constructed and the drying kinetics were analyzed using thin-layer mathematical models. Among the evaluated models, the Page model provided the best fit to describe the variation of the moisture ratio as a function of drying time.

Results showed that the solar tunnel dryer reached higher and more stable internal temperatures compared with the traditional marquesina system, which allowed the drying time to be reduced to approximately two days, whereas the traditional system required between four and five days depending on climatic conditions. The tunnel system also

demonstrated greater efficiency in moisture removal, reaching final moisture contents close to 7% and water activity values suitable for safe storage of the beans.

Sensory analysis conducted with a trained panel revealed differences in the aromatic profiles of cocoa beans dried under each system. Beans dried in the tunnel exhibited more defined floral, fruity, and chocolate-like notes, while those dried in the traditional system showed stronger sweet and toasted attributes. These differences are associated with variations in thermal conditions and airflow during the drying process.

Overall, the results indicate that the Hohenheim-type solar tunnel dryer represents an efficient and viable technological alternative for cocoa drying, as it provides greater control of drying conditions, reduces processing time, and contributes to the preservation of cocoa bean quality.

Keywords: cocoa, solar drying, Hohenheim tunnel dryer, sun-drying, drying kinetics, sensory analysis.

1. JUSTIFICACION.

El cacao (*Theobroma cacao L.*) es un cultivo de gran importancia económica y social en Colombia, cerca de 65.000 familias dependen directamente de su producción (UGRA - Unidad de gestión de riesgos agropecuarios, 2020). Durante el año 2022 la producción cacaotera significó un aumento del 0.6% al producto interno bruto agropecuario (Sectorial, 2023); para el primer semestre de 2024 aumentó el 7.2% respecto al mismo periodo del año anterior, pasando de 30.919 t a 33.150 t (Quintero López, 2024) donde el 79% de la producción nacional se concentra en los departamentos de Santander, Arauca, Antioquia, Huila, Nariño y Tolima (FEDECACAO, 2024).

El cacao colombiano ha sido clasificado como fino de sabor y aroma, una denominación que representa solo el 5% de la producción global (ICCO, 2020), este reconocimiento resalta la necesidad de optimizar los procesos de postcosecha para garantizar la calidad del producto, ya que esta influye directamente en su competitividad en mercados locales e internacionales.

El desarrollo e innovación en los procesos de posproducción a los que son sometidos los granos de cacao ha cobrado vital relevancia, pues está claro que los precursores de las características sensoriales se desarrollan durante el beneficio de los granos (fermentación, secado y tostado) (Aparicio Noriega, 2024) y por ende los atributos de calidad del producto final. Durante la fermentación tienen lugar diversas reacciones bioquímicas que contribuyen al desarrollo de compuestos volátiles que posteriormente se acentúan durante el secado

El proceso de secado es crucial, ya que influye en las características fisicoquímicas, sensoriales y microbiológicas del cacao (Cortez, 2019). Sin embargo, los métodos tradicionales, como el secado al sol presentan desventajas significativas. Estos incluyen la exposición a contaminantes y condiciones climáticas variables que pueden conducir al

desarrollo de hongos y detrimentos en la calidad de los granos (Lasisi, 2014). En este contexto, la implementación de tecnologías innovadoras como el secador solar tipo túnel Hohenheim surge como una alternativa prometedora. Este equipo aprovecha la energía solar para reducir tiempos de secado y minimizar riesgos asociados con métodos convencionales (López Cerino & Chávez García, 2018).

Desde el punto de vista ambiental el secado solar tipo túnel Hohenheim utiliza energías renovables contribuyendo a prácticas agrícolas sostenibles y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el objetivo 12, que promueve modalidades de producción responsables (Pérez et al., 2020). Este sistema permite reducir significativamente el impacto ambiental del proceso de secado, al tiempo que mantiene las características sensoriales y fisicoquímicas del cacao, fundamentales para la incursión y aceptación del producto en mercados internacionales (Vargas & Morales, 2021).

En términos económicos, la adopción de esta tecnología puede generar beneficios significativos para los pequeños y medianos productores, quienes enfrentan dificultades para cumplir con estándares de calidad internacionales (Procolombia, 2024). Un proceso de secado eficiente y controlado no solo mejora el valor agregado del cacao, sino que también contribuye a la competitividad de las comunidades que dependen de este cultivo.

Finalmente, este proyecto busca validar un proceso de secado innovador que no solo optimiza la calidad del cacao, sino que también desarrolla un protocolo replicable para su implementación en diferentes regiones del país. Con ello, se pretende fortalecer la competitividad del cacao colombiano en el ámbito internacional, promoviendo su sostenibilidad ambiental y económica (Mujumdar, 2014).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El cacao (*Theobroma cacao L.*) es uno de los cultivos de mayor relevancia económica y social a nivel mundial, particularmente en países tropicales como Colombia. El cultivo de cacao toma relevancia más allá del ámbito agrícola, pues cerca de 65.000 familias del país dependen directamente de su producción (UGRA, 2020). Además, el cacao colombiano es reconocido como fino de sabor y aroma, reconocimiento que representa solo el 5% de la producción global (ICCO, 2020), otorgándole un potencial competitivo y de mayor incursión en los mercados internacionales. Sin embargo, este potencial puede verse comprometido por las prácticas de posproducción (fermentación, secado y tostado), especialmente el secado, un proceso clave en la preservación de la calidad del grano (Afoakwa et al., 2014)

El secado de cacao es crítico para garantizar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales. Cuando este proceso no es controlado adecuadamente, puede provocar pérdidas significativas en la calidad del producto. Por ejemplo, un secado demasiado rápido puede impedir la migración de ácidos hacia la superficie del grano, mientras que un secado prolongado puede favorecer el crecimiento de hongos productores de micotoxinas (Cortez, 2019). En Colombia, los métodos tradicionales de secado al sol son comunes, pero presentan desventajas significativas, como la exposición a contaminantes y la dependencia de condiciones climáticas variables (Lasisi, 2014). Además, estos métodos no garantizan un control preciso de la humedad ni protegen las características sensoriales del cacao (Van Den Berg & Bruin, 1981). Estas limitaciones subrayan la necesidad de tecnologías más eficientes y sostenibles que aseguren un secado uniforme y controlado.

El secador solar tipo túnel Hohenheim surge como una alternativa prometedora para superar las limitaciones de los métodos tradicionales. Esta tecnología aprovecha la energía solar de

manera eficiente, reduciendo tiempos de secado y minimizando riesgos asociados, como la contaminación microbiana (López Cerino & Chávez García, 2018). Según García Guarín et al. (2015), este sistema también permite un mejor control de variables ambientales, como la temperatura y la humedad relativa, lo que resulta en un secado más eficiente. Además, el uso de energías renovables contribuye a prácticas agrícolas sostenibles y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el objetivo 12, que promueve modalidades de producción responsables (Pérez et al., 2020).

La validación del proceso de secado en el secador solar tipo túnel Hohenheim no solo es necesaria para establecer su viabilidad técnica, sino también para generar un protocolo replicable que pueda ser adoptado por productores en diferentes regiones del país. Este protocolo contribuirá al fortalecimiento de la competitividad del cacao colombiano en mercados internacionales, mejorando su valor agregado y promoviendo su sostenibilidad económica y ambiental (Procolombia, 2024). Además, su implementación puede ayudar a cumplir con normativas nacionales e internacionales de calidad aplicadas a los granos de cacao, tales como la Norma Técnica Colombiana NTC 1252 (ICONTE, 2021) y la norma internacional ISO 2451:2017 – Cocoa beans: specification and requirements – (ISO, 2017) y ISO 2292: Cocoa beans — Sampling (ISO, 2017). Estas normas establecen parámetros esenciales para el comercio del cacao, incluyendo los límites de humedad (≤ 7.5 %), tolerancia a defectos internos y externos, criterios sensoriales mínimos, así como procedimientos estandarizados para el muestreo representativo del producto. La adopción de estas normativas garantiza la calidad, la inocuidad y la consistencia de los lotes destinados a mercados internacionales, mejorando la competitividad del cacao colombiano.

En este proyecto se validó científicamente el secador solar tipo túnel Hohenheim como una tecnología innovadora para el secado de granos de cacao; contribuyendo al desarrollo de una industria cacaotera más sostenible, competitiva y alineada con los estándares internacionales de calidad.

3. OBJETIVOS:

3.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer las condiciones de secado de los granos de cacao en prototipo de túnel y su influencia sobre los atributos de calidad, comparándolo con el método tradicional de marquesina.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del cacao seco utilizando un prototipo de túnel de secado en comparación con el método tradicional de marquesina.
- Evaluar la cinética de secado de granos de cacao en un prototipo de túnel de secado.
- Elaborar un protocolo operativo replicable para la implementación del secado de granos de cacao en un prototipo de túnel un secador solar.

4. MARCO DE REFERENCIA.

4.1.El cacao y su importancia.

4.1.1. Descripción de la planta.

El cacao (*Theobroma cacao L.*) es un árbol perenne perteneciente a las familias de las malváceae, originario de las regiones tropicales de América. Se caracteriza por su crecimiento en climas cálidos y húmedos, con temperaturas optimas entre 22 y 28 °C (Argout et al., 2018; Jiménez et al., 2021). Puede alcanzar entre 4 y 10 metros de altura y presenta hojas simples y grandes, flores pequeñas polinizadas por insectos del género *Forcipomya*, y frutos en forma de mazorca o vaina (Sánchez & López, 2020).

Las mazorcas contienen entre 30 y 50 semillas rodeadas de una pulpa mucilaginoso dulce. Estas semillas, tras un proceso de fermentación, secado y tostión, se convierten en granos de cacao, materia prima fundamental para la producción de chocolate y demás derivados (Afoakwa et al., 2014). Se han descrito tres variedades principales de cacao:

- **Criollo:** de alta calidad y sabor refinado, pero de menor producción y susceptibilidad a enfermedades (Motamayor et al., 2020).
- **Forastero:** más resistente y productivo, pero con menor perfil aromático.
- **Trinitario:** es un híbrido resultado entre el cruce de las variedades Criollo y Forastero, con buena calidad y resistencia moderada.

4.1.2. Condiciones de cultivo.

El cultivo de cacao demanda condiciones agroecológicas específicas para lograr su óptimo desarrollo:

- Clima: la temperatura oscila entre 22 y 28 °C, con precipitaciones anuales entre 1.500 y 2500 mm (Loor Solórzano et al., 2022).
- Suelo: de preferencia deben ser profundos, de buen drenaje y ricos en materia orgánica, con un pH entre 5.0 y 7.5 (Castro & Rodríguez, 2021).
- Altitud: se desarrolla entre los 0 y 1200 metros sobre el nivel del mar (FAO, 2020), esta condición está sujeta al material vegetal cultivar.
- Sombra: en etapas iniciales, requiere sombra parcial proporcionada por arboles intercalados o cultivos de cobertura (Vallejo et al., 2019).

4.1.3. El Cacao (*Theobroma cacao L.*) y su relevancia económica y social

El cacao es un cultivo estratégico en la economía de varios países tropicales, siendo Colombia reconocido como un productor de cacao fino y de aroma (World Cocoa Foundation, 2023; ICCO, 2022). A nivel global, Costa de Marfil, Ghana e Indonesia son los principales productores, con más del 60 % de la oferta mundial (ICCO, 2022).

En Colombia, el sector cacaotero ha mostrado un crecimiento constante, representado aproximadamente el 1% de la producción de cacao (ICCO, 2022). Según FEDECACAO (2024). Además, el cacao colombiano es altamente valorado en el mercado internacional por sus atributos sensoriales y organolépticos, lo que representa una oportunidad para su exportación y desarrollo agroindustrial (ProColombia, 2023).

4.1.4. Factores que influyen en la calidad del cacao.

Los atributos de calidad se ven influenciados por la interacción entre factores genéticos condiciones agroecológicas y el manejo postcosecha (Cerón Salazar et al., 2020):

- **Genética:** la variedad del cacao determina en parte el perfil sensorial, el contenido de polifenoles y resistencia a enfermedades (Zhang et al., 2021).
- **Manejo agronómico:** la calidad del grano y su rendimiento se ve afectado por prácticas como la fertilización, la poda y el control de plagas (Hernández et al., 2022).
- **Poscosecha:** las operaciones de postcosecha como la fermentación y el secado y su posterior almacenamiento son procesos claves que permiten definir las características fisicoquímicas y sensoriales finales de los granos de cacao (Vargas & Morales, 2021).

El cumplimiento de los estándares de calidad definidos para estos factores permite obtener un cacao competitivo en el mercado, con mayor valor agregado y demanda en la industria chocolatera (Perea et al., 2020; ICCO, 2021; ProColombia, 2023).

4.2. Poscosecha de cacao.

4.2.1. Fermentación.

La fermentación es el primer proceso postcosecha al que es sometido el cacao y juega un papel relevante en el desarrollo de los precursores de los atributos sensoriales de sabor y aroma. La fermentación de los granos de cacao es un proceso que comprende tres etapas bien definidas en el desarrollo de los microorganismos, una etapa anaeróbica, otra aeróbica y una etapa final, durante las cuales la pulpa que rodea al grano se degrada y tiene lugar una serie de reacciones bioquímicas esenciales para el desarrollo de los atributos sensoriales (De Vuyst & Weckx, 2017; Ho et al., 2021). (Afoakwa et al., 2014). Entre los cambios relevantes que tienen lugar durante la fermentación se puede distinguir la reducción del amargor y la

astringencia y se da paso a la formación de compuestos volátiles característicos del chocolate (Papalexandratou et al., 2013; Jiménez et al., 2021; Lima et al., 2022).

4.2.1.1. Etapas de la fermentación.

La fermentación está definida en tres fases:

- **Fase anaerobia (fermentación alcohólica):** su desarrollo tiene lugar generalmente las primeras 48 horas del proceso; durante esta fase interviene al interior de la matriz el desarrollo de levaduras y se caracteriza por la ausencia o disponibilidad extremadamente limitada de oxígeno en la masa de cacao. Esta condición no se debe únicamente a una baja presencia de oxígeno, sino a que la pulpa mucilaginosa es densa y viscosa, lo que genera un ambiente prácticamente anaerobio dentro de los granos y en el interior de la masa fermentada.

en este ambiente restringido en oxígeno, se favorece el desarrollo de levaduras, las cuales metabolizan los azúcares presentes en la pulpa para producir etanol, dióxido de carbono y calor. Además, las levaduras producen enzimas pectinolíticas que licúan la pulpa, facilitando el drenaje y preparando la transición hacia la fase aerobia de fermentación acética.

El proceso anterior tiene lugar en condiciones donde la temperatura se encuentra por encima de los 37 °C; durante el lapso de crecimiento de los microorganismos (levaduras y bacterias ácido-lácticas) se generan aumentos en la temperatura que son los responsables de la ralentización del proceso de fermentación.

La presencia de levaduras promueve a la licuefacción de la pulpa gracias al aporte de enzimas pectinolíticas facilitando el drenaje de esta y contribuyen con el desarrollo de la siguiente fase.

- **Fase aerobia (fermentación ácido-acética):** la licuefacción de la pulpa que tiene lugar en la fase anterior contribuye al cambio de las condiciones del sustrato, permitiendo el ingreso de oxígeno que a su vez promueve el desarrollo de bacterias ácido-acéticas y da paso a la siguiente fase, la cual se da lugar al tercer día; el desarrollo de dichas bacterias promueve la transformación del alcohol obtenido en la primera fase a ácido acético, dióxido de carbono, agua y calor.
- **Fase final:** la fase anterior trae consigo la muerte del embrión y esta a su vez desencadena una serie de transformaciones bioquímicas al interior del grano como la descomposición de proteínas y polifenoles dando paso a la formación de los compuestos precursores de los atributos sensoriales (Serra & Cozzolino, 2020; Kone et al., 2021). (Loor Solórzano et al., 2022). Es característico de esta etapa el cambio de color del cotiledón y la aparición de estructuras arriñonadas al interior del grano.

4.2.1.2. Factores que influyen en la fermentación.

Entre los factores que influyen en el proceso de fermentación encontramos (Camargo et al., 2019; Crafacck et al., 2014):

- **Variedad de cacao:** criollo, forastero y trinitario se caracterizan por tener tiempos de fermentación y perfiles sensoriales distintos (Motamayor et al., 2020).
- **Condiciones ambientales:** la temperatura y la humedad están directamente relacionadas con la efectividad del proceso fermentativo y su velocidad (Zhang et al., 2021).
- **Método de fermentación:** el proceso de fermentación se puede llevar a cabo en caja de madera, montones o en sacos de yute y cada uno genera un impacto en el proceso

(Hernández et al., 2022). Ahora bien, el proceso se puede llevar a cabo en condiciones controladas para garantizar la homogeneidad.

4.2.2. Secado de los granos de cacao.

el secado de los granos de cacao significa una de las etapas críticas en las operaciones de poscosecha, (Pereira et al., 2021; Aprotosoie et al., 2016), que propende a evitar el crecimiento y la proliferación de hongos y la degradación de compuestos claves (ICONTEC, 2008).

4.2.2.1. Métodos de secado.

El secado de los granos de cacao se puede realizar mediante diferentes técnicas, las cuales varían en eficiencia, costo y calidad del grano obtenido. Entre los métodos más empleados en la industria del cacao podemos encontrar:

- **Secado al sol a plena exposición:** Esta operación tiene lugar en patios abiertos y depende de las condiciones climáticas. Es un método ampliamente utilizado en pequeñas plantaciones por su bajo costo y mínima infraestructura, aunque es más susceptible a la contaminación por materiales extraños, así como fúngica y tiempo de secado prolongados (Lasisi, 2014).
- **Secado en marquesina:** Este método emplea estructuras cubiertas que protegen los granos de la lluvia y contaminantes, mejorando la uniformidad del secado y reduciendo la exposición a microorganismos (Perea et al., 2020).
- **Secado mecánico:** Utiliza equipos de flujo de aire caliente para acelerar el proceso de secado. Es común en industrias grandes y permite un mejor control de la temperatura y la humedad, evitando la contaminación (Pereira et al., 2021).

- **Secado en tambor rotatorio:** Consiste en un cilindro giratorio que expone los granos a una fuente de calor uniforme este método mejora la eficiencia del secado, pero puede afectar la calidad sensorial sino se controla de manera adecuada (Jinap et al., 2019).

4.2.2.2. Impacto del secado en la calidad de los granos de cacao.

El secado inadecuado de los granos de cacao puede causar detrimentos en la calidad (Figueroa-Hernández et al., 2020; Jinap et al., 2019) como:

- **Sobrefermentación:** perdida excesiva de compuestos volátiles y el desarrollo de sabores no deseados.
- **Secado insuficiente:** favorece el crecimiento y desarrollo de hongos y la producción de micotoxinas (Vargas & Morales, 2021).
- **Temperaturas elevadas:** puede causar el endurecimiento del cotiledón, impermeabilizando el interior del grano evitando la migración de agua y compuestos volátiles así como la degradación de compuestos fenólicos beneficiosos para la calidad del grano (FAO, 2020).

El secado es clave para garantizar el cumplimiento de las normas internacionales y de esta forma mejorar la competitividad de los granos de cacao colombiano en los mercados globales.

4.2.3. Tostado.

El proceso de tostado es una etapa fundamental que influye directamente en el desarrollo del sabor y el aroma característico del chocolate. Durante este proceso, los granos son sometidos a temperaturas controladas que oscilan entre los 110 °C y los 150 °C, lo que provoca

reacciones químicas claves como la degradación de ácidos volátiles, la caramelización de azúcares y la reacción de Maillard (Afoakwa et al., 2014; Jinap et al., 2019).

4.2.3.1. Métodos de tostado.

Entre los diversos métodos de tostado existentes podemos resaltar los siguientes:

- Tostado convencional: Se realiza en tambores rotatorios con control de temperatura y tiempo.
- Tostado por aire caliente: Emplea flujos de aire para una distribución uniforme del calor.
- Tostado infrarrojo: Tecnología emergente que mejora la eficiencia energética y preserva mejor los compuestos volátiles (López & Hernández, 2021).

4.2.3.2. Efectos del tostado en la calidad del cacao.

El tostado puede influir en varios aspectos de la calidad de los granos de cacao, tales como:

- **Perfil sensorial:** Mejora la liberación de compuestos aromáticos y reduce la acidez excesiva (Beckett et al., 2017).
- **Composición química:** Disminuye el contenido de polifenoles y cambia la estructura celular de los granos (Serra & Cozzolino, 2020).
- **Seguridad alimentaria:** Reduce la presencia de microorganismos y micotoxinas que pueden afectar la calidad del producto final (Figueroa-Hernández et al., 2020).

4.3. El secado del cacao como operación unitaria.

4.3.1. El secado.

El secado es una operación unitaria clave en la postcosecha del cacao, cuyo propósito es reducir la humedad de los granos desde aproximadamente el 55% hasta un nivel seguro que

oscila entre el 7 y 8% (Pereira et al., 2021; Batista et al., 2022). Este proceso es esencial para evitar el crecimiento de microorganismos con hongos y mitigar por ende el desarrollo de micotoxinas, mejorar la estabilidad del cacao y preservar su calidad fisicoquímica y sensorial. Además, influye en la textura, el color y la formación de compuestos aromáticos esenciales para la producción de chocolate de alta calidad (Figueroa-Hernández et al., 2020; Kouadio et al., 2023).

4.3.2. Influencia del secado en la calidad del cacao.

el secado impacta directamente en:

- **Composición química:** se produce la degradación de ácidos volátiles, responsables del amargor y la astringencia. También afecta la concentración de polifenoles y precursores de sabor esenciales en el chocolate (Afoakwa et al., 2014; Krysiak & Tomaszewska-Gras, 2021).
- **Perfil sensorial:** La tasa de secado influye en el desarrollo de los precursores del aroma y la textura del cacao. Un secado muy rápido puede impedir la eliminación de compuestos indeseables, mientras que uno demasiado lento puede favorecer el crecimiento y la proliferación de microorganismos no deseados (Lima et al., 2022; Ozturk et al., 2023).
- **Estructura del grano:** la aplicación de temperaturas elevadas puede causar la impermeabilización de la cascara del cotiledón, impidiendo de esta manera la migración del agua desde el interior del grano hacia el exterior y alterar la solubilidad de compuestos fenólicos, lo que influye en la capacidad de molienda y en la fluidez de la manteca de cacao. (Beckett et al., 2017; Bart-Plange et al., 2021).

- **Seguridad microbiológica:** un secado adecuado puede minimizar el riesgo del posterior desarrollo y crecimiento de hongos y bacterias que pueden generar toxinas perjudiciales para la salud del consumidor y afectar la calidad fisicoquímica y sensorial del grano (Serra & Cozzolino, 2020; Aculey et al., 2019).

4.3.3. Tipos de secadores empleados en el cacao.

4.3.3.1. Secado natural.

- **Secado al sol:** es el método más usado por pequeños productores, depende de factores climáticos y requiere de supervisión constante. Aunque es una opción de bajo costo, puede exponer a los granos de cacao a agentes ambientales de contaminación y generar inconsistencias en la humedad final de los granos (Lasisi, 2014; Kouassi et al., 2022).
- **Secado en marquesina:** el sistema de marquesina brinda protección a los granos de la lluvia y contaminantes ambientales. Permite el control parcial de la temperatura y la humedad, lo que reduce la fluctuación en los atributos de calidad de los granos de cacao al final de la operación (Perea et al., 2020; Schwan et al., 2021).

4.3.3.2. Secado tecnológico.

- **Secadores solares:** como el túnel Hohenheim, que permite realizar la operación de manera controlada, reduciendo los tiempos de secado y mitigando los focos de contaminación al interior de la operación. Además, emplea energía fotovoltaica contribuyen al desarrollo sostenible de la operación que permite mejorar la eficiencia productiva (Banda et al., 2022; Ajala & Ojewumi, 2023).
- **Secado mecánico:** emplea flujos de aire caliente para acelerar la eliminación de humedad, garantizando un secado uniforme. Es común en industrias a gran escala,

pero puede afectar la concentración de compuestos volátiles sino se controla adecuadamente la temperatura (Pereira et al., 2021; Bai et al., 2023).

- **Secado en tambor rotatorio:** resulta ser útil para la eliminación de humedad mediante un sistema de rotación continua. Sin embargo, requiere de un control riguroso de temperatura y tiempo para evitar la aparición de defectos en el grano, como la caramelización de los azúcares o una sobretostión (Jinap et al., 2019; Pérez et al., 2023).

4.3.4. Variables claves en el proceso de secado.

A la hora de realizar el secado de los granos de cacao es importante considerar las siguientes variables que influyen en el desarrollo de los atributos de calidad final de los granos de cacao:

- **Temperatura:** los valores óptimos de temperatura oscilan entre los 45 y 60°C para evitar la degradación de compuestos aromáticos y preservar las propiedades sensoriales del cacao (Serra & Cozzolino, 2020; Yusep et al., 2023).
- **Humedad relativa:** un secado controlado previene la Sobrefermentación, la cristalización de lípidos y el desarrollo de mohos que pueden comprometer la calidad final del grano cacao (Zhang et al., 2021; Rado et al., 2022).
- **Velocidad del aire:** afecta la tasa de evaporación de humedad y la homogeneidad del secado. Un flujo de aire adecuado permite evitar la reabsorción de humedad y la aparición de granos de con humedad residual (Ho et al., 2021; Bai et al., 2023).
- **Tiempo de secado:** influye en el desarrollo de compuestos clave para el desarrollo de los atributos sensoriales. Un secado rápido puede impedir la migración de compuestos ácidos indeseables, mientras que un secado demasiado lento puede

favorecer el desarrollo de reacciones oxidativas en los compuestos lipídicos, deteriorando la calidad final del grano (Beckett et al., 2017; Krysiak et al., 2022).

4.3.5. Comparación métodos de secado.

La elección del método de secado influye de manera determinante en la calidad final del cacao, ya que cada sistema proporciona condiciones particulares de temperatura, humedad relativa, flujo de aire y nivel de exposición ambiental. Estas variables afectan directamente la cinética de deshidratación, la retención o pérdida de compuestos volátiles, la actividad de agua final y la uniformidad del secado, aspectos críticos para asegurar la inocuidad y estabilidad del grano (Afoakwa et al., 2014; Pereira et al., 2021).

Diversos estudios han demostrado que métodos tradicionales como el secado al sol o en marquesina presentan limitaciones asociadas a la variabilidad climática y al riesgo de contaminación, mientras que tecnologías avanzadas como el secado solar en túnel o los sistemas mecánicos permiten un mayor control de las condiciones del proceso y reducen los tiempos requeridos para alcanzar humedades seguras (Lasisi, 2014; Banda et al., 2022; García-Guarín et al., 2015). Por este motivo, resulta pertinente establecer una comparación estructurada de los principales métodos utilizados en el beneficio del cacao, destacando sus ventajas, limitaciones y la influencia que ejercen sobre los atributos fisicoquímicos y sensoriales del producto.

A continuación, se presenta la Tabla 1, donde se sintetizan las características más relevantes de los métodos de secado empleados en cacao según la evidencia disponible en la literatura reciente.

Tabla 1 Comparación entre los distintos métodos de secado empleados en los granos de cacao.

Método de secado	Ventajas	Desventajas	Fuente
Secado al sol	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo. • Fácil implementación 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo prolongado. • Riesgo de contaminación. 	(Lasisi, 2014; Kouassi et al., 2022)
Secado en marquesina	<ul style="list-style-type: none"> • mayor control sobre el proceso. • Menor contaminación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependiente del clima. 	(Perea et al., 2020; Schwan et al., 2021)
Secador solar Hohenheim	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiente. • Sostenible. • Menor tiempo de secado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión inicial alta. 	(Banda et al., 2022; Ajala & Ojewumi, 2023)
Secado mecánico	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido y uniforme. • Adecuado para grandes volúmenes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo energético. 	(Pereira et al., 2021; Bai et al., 2023)
Secado en tambor	<ul style="list-style-type: none"> • Secado homogéneo. • Eficiente en reducción de humedad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere control estricto para evitar sobrecalentamiento. 	(Jinap et al., 2019; Pérez et al., 2023)

4.4. Túnel de secado solar Hohenheim.

4.4.1. Origen y desarrollo.

El túnel solar Hohenheim fue desarrollado por la universidad de Hohenheim, Alemania, a finales de la década de 1980 como una solución para mejorar el secado de productos agrícolas con la implementación de energía solar (Müller & Sauerborn, 1992). Desde su implementación, ha sido adoptado en diferentes zonas tropicales debido a su eficiencia, reducción de costos energéticos y capacidad para mejorar la calidad del producto final.

4.4.2. Componentes y funcionamiento.

El túnel solar Hohenheim está compuesto por varios elementos que trabajan en conjunto para lograr un proceso de secado eficiente y homogéneo, a continuación, se describen sus componentes

- Panel solar: se encarga de la captación de la radiación solar y su posterior conversión en energía para el funcionamiento del sistema de ventilación.
- Colector de calor: zona destinada para la captación de radiación solar y su conversión en energía térmica que será empleada para calentar el aire que es impulsado por el sistema de ventilación a lo largo del túnel.
- Cámara de secado: es el espacio destinado para la distribución del material a secar, que permite la circulación del aire caliente.
- Cubierta transparente: está cubierta generalmente está hecha de polietileno y se encarga de permitir la entrada de luz solar, la protección del material a secar y la conservación del calor al interior del túnel.
- Estructura modular: facilita la instalación del túnel en diferentes lugares y su adaptación a diversas capacidades productivas.

- Sistema de ventilación: Se encarga de la distribución del aire al interior del túnel, generalmente accionado por acción de la energía fotovoltaica (Müller et al., 2021).

4.4.3. Ventajas y desventajas del uso de un túnel Hohenheim.

La tabla 2 realiza un paralelo que pone en evidencia las ventajas y desventajas del uso de este tipo de túneles aplicados a matrices alimentarias.

Tabla 2 Ventajas y desventajas del uso de túneles de secado tipo Hohenheim.

Ventajas	Desventajas
bajo consumo energético en comparación con secadores mecánicos.	Dependencia de la radiación solar.
Reducción del tiempo de secado	Inversión inicial moderada.
Protección de los granos de cacao contra agentes contaminantes ambientales.	Requiere mantenimiento del sistema de ventilación
Control de temperatura y humedad para mejorar la calidad final	Adaptabilidad limitada en regiones con baja radiación solar.
Tecnología sostenible y amigable con el medio ambiente	Necesidad de espacio adecuado para la instalación.

4.4.4. Aplicación en diferentes matrices alimentarias.

El túnel solar Hohenheim ha sido empleado en diversas matrices y productos agrícolas, incluyendo cacao, frutas y cereales. La tabla 3 resume algunos estudios realizados con diferentes matrices alimentarias:

Tabla 3 Condiciones de uso del túnel Hohenheim aplicado a diversas matrices alimentarias.

Matriz alimentaria	Condiciones de secado	Lugar del estudio	Fuente
Cacao (<i>Theobroma cacao L.</i>)	50-60°C, 48 Horas	Colombia	López et al., 2022
Café (<i>Coffea arabica</i>)	40-55 °C, 36 Horas	Brasil	Silva et al., 2020
Mango (<i>Manguifera indica</i>)	55°C, 24 Horas	México	Ramírez et al., 2019
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	50°C, 30 Horas	España	García-Pérez et al., 2018
Ají (<i>Capsicum annum</i>)	45-55°C, 20 Horas	Perú	Castro et al., 2021

El uso del túnel Hohenheim ha demostrado su efectividad en mejorar la calidad de los productos deshidratados, manteniendo sus propiedades sensoriales y fisicoquímicas. En el caso del cacao, ha permitido reducir los tiempos de secado sin comprometer el desarrollo de los compuestos aromáticos esenciales (Banda et al., 2022).

4.5. Modelos matemáticos y su aplicación.

El estudio del secado del cacao ha llevado al desarrollo de diversos modelos matemáticos que permiten describir el comportamiento de la humedad del grano y predecir la eficiencia del proceso. Estos modelos ayudan a optimizar las condiciones de secado, mejorar la eficiencia energética y garantizar la calidad final del producto. Su aplicación es clave para

evitar pérdidas económicas y asegurar estándares internacionales de comercialización (Afoakwa et al., 2014; Bai et al., 2023).

4.5.1. Modelos empíricos.

4.5.1.1. Modelo de Newton.

La ecuación 2 describe el modelo de Newton. Este modelo asume que la tasa de secado es proporcional a la diferencia de humedad entre el material y su entorno, describiendo la pérdida de humedad con la ecuación:

$$X_t = X_0 e^{-kt} \quad (1)$$

Donde:

X_t : es la humedad en el tiempo.

X_0 : es la humedad inicial.

K: constante de secado.

Aunque resulta ser útil para predicciones generales, no considera variaciones en las propiedades del material. Sin embargo, se ha utilizado ampliamente en estudio de secado de cacao debido a su facilidad de aplicación y a su capacidad para proporcionar estimaciones rápidas de los tiempos de secado (Midilli et al., 2002; Kouadio et al., 2023).

4.5.1.2. Modelo de Page.

El modelo de Page es una modificación del modelo de Newton que introduce un parámetro adicional para mejorar la precisión en los materiales con alta variabilidad en la tasa de secado y queda descrito en la ecuación 3:

$$X_t = X_0 e^{-kt^n} \quad (2)$$

Donde n es un coeficiente empírico que ajusta la curva de secado (Page, 1949). Este modelo ha sido validado en muchos estudios sobre el secado de productos agrícolas, demostrando

una mayor precisión en comparación con el modelo de newton, especialmente en procesos de secado intermitente y a temperaturas controladas (Silva et al., 2020; Bai et al., 2023).

4.5.2. Balance de masa y energía.

4.5.2.1. Balance de masa.

El balance de masa se muestra en la ecuación 4 y describe la cantidad de agua eliminada durante el proceso de secado y se expresa como:

$$m_{agua} = m_{inicial}X_0 - m_{final}X_f \quad (3)$$

Donde:

m_{agua} : es la masa de agua eliminada.

$m_{inicial}$ y m_{final} : son las masas inicial y final.

X_0 y X_f : son los contenidos de humedad inicial y final.

Este modelo es fundamental para calcular la eficiencia del proceso y determinar la cantidad de agua removida en diferentes condiciones de secado. Se ha aplicado en estudio de secado solar y mecánico para evaluar la uniformidad del proceso y la reducción de las pérdidas por sobrecalentamiento (Pereira et al., 2021; Krysiak & Tomaszewska-Gras, 2021).

4.5.2.2. Balance de energía.

El balance de energía considera el calor necesario para evaporar agua del cacao y está descrito por la ecuación 5:

$$Q = m_{agua}L_v \quad (4)$$

Donde L_v es el calor latente de vaporización del agua. Este calculo permite dimensionar la cantidad de energía requerida para el proceso de secado y mejorar su eficiencia térmica. Recientemente se ha demostrado que optimizar los balances de energía en secadores solares pueden llegar a reducir el consumo energético hasta en un 30% en comparación con secadores mecánicos (García-Pérez et al., 2018; Batista et al., 2022).

4.5.3. Comparación y aplicaciones en el secado del cacao.

los modelos matemáticos permiten optimizar los parámetros del secado y seleccionar las mejores condiciones para preservar la calidad del cacao. En la siguiente tabla se comparan los principales modelos usados en la industria:

Tabla 4 Comparación de los modelos matemáticos y su aplicación en el secado.

Modelo	Tipo	Aplicación en cacao	Fuente
Newton	Empírico	Estimación rápida del tiempo de secado.	Midilli et al., 2002; Kouadio et al., 2023
Page	Empírico	Mayor precisión en la determinación de la humedad.	Page, 1949; Silva et al., 2020
GAB	Isotérmico	Relación entre la humedad de equilibrio y la actividad de agua.	van den Berg & Bruin, 1981; Batista et al., 2022

Balance de masa	Teórico	Cuantificación del agua eliminada.	Beckett et al., 2017; Pereira et al., 2021
Balance de energía	Teórico	Determinación del consumo energético del proceso	Krysiak & Tomaszewska-Gras, 2021; García-Pérez et al., 2018

El uso de estos modelos en el secado del cacao permite ajustar las condiciones de operación, mejorar la eficiencia energética y asegurar una conservación de los compuestos clave para la garantizar la calidad de los granos de cacao. Además, su aplicación en estudios experimentales ha demostrado ser una herramienta efectiva para optimizar procesos de secado solar y mecánico, asegurando que los granos conserven sus propiedades organolépticas y nutricionales (Silva et al., 2020; Bai et al., 2023).

5. METODOLOGÍA

Localización.

El proyecto se desarrolló en el centro de investigación Nataiama de la Corporación Colombiana de investigación agropecuaria – AGROSAVIA, ubicado en el municipio de El Espinal, departamento del Tolima, Colombia (4°09’N, 74°53’O; altitud 430 m s.n.m.). Esta región se caracteriza por un clima cálido seco, con temperatura media anual de 28°C, humedad relativa promedio de 65 % y una radiación solar de entre 4,5 y 6,0 kWh/m²/día condiciones agroclimáticas favorables para estudios de secado solar (IDEAM,2023).

La elección de esta localización respondió a dos factores principales:

- i. Disponibilidad del prototipo de secador tipo túnel Hohenheim en las instalaciones de Agrosavia.
- ii. La representatividad agroclimática de El Espinal dentro del valle del río Magdalena, zona donde se concentra una parte significativa de la producción cacaotera nacional. (FEDECACAO, 2024; Quintero López, 2024). Esto garantiza que los resultados obtenidos sean extrapolables a otros territorios de características similares.

El estudio se ejecutó entre los meses de mayo y diciembre de 2024 abarcando tanto las fases experimentales de fermentación y de secado de los granos de cacao, así como los análisis fisicoquímicos y sensorial posteriores.

A continuación, se describe la metodología que se utilizó para la validación de un prototipo de secador solar tipo túnel que adoptó la estructura del secador Hohenheim con adaptaciones como la incorporación y uso de energías renovables, cuantificando su efecto en las características fisicoquímicas y sensoriales en el secado del cacao.

Diseño experimental.

Se empleo un diseño totalmente al azar con dos tratamientos: secado en túnel solar tipo Hohenheim y secado en marquesina tradicional. Cada tratamiento se ejecutó por triplicado (n=3), utilizando lotes de 25 ± 0.5 Kg. de cacao en baba posteriormente fermentado por replica, con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Durante el proceso de secado se realizó seguimiento a variables físicas y químicas cada dos horas (humedad, temperatura, pérdida de masa, pH y Actividad de agua), hasta alcanzar la humedad de 7-8% establecida en la Norma Técnica Colombiana NTC 1252 (ICONTEC,2021). Adicionalmente, al interior de cada sistema se registraron datos de temperatura y humedad relativa del aire cada 20 minutos mediante dataloggers (Elitech RC-4HC), con el objetivo de caracterizar las condiciones del secado.

Análisis Estadístico.

Los datos recolectados se analizaron mediante una ANOVA de una vía para determinar diferencias significativas entre tratamiento ($p < 0.05$). en los casos en los que se detectaron diferencias, se aplicó la comparación múltiple de Tukey. La normalidad de los datos se verifico con la prueba de Shapiro-wilk y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. El procesamiento estadístico se realizó con el software Minitab® 20 (**Minitab Inc., EE.UU.**) y complementariamente con herramientas de análisis de datos en Microsoft Excel® 2021.

5.1. Acondicionamiento de los granos de cacao.

5.1.1. Fermentación y secado de los granos de cacao.

Los granos de cacao fueron seleccionados y fermentados previo al proceso de secado. La fermentación se realizó de manera controlada en un horno de convección, la temperatura se mantuvo a 35°C hasta el segundo día y a partir de ese momento a 45 °C buscando simular la dinámica de una fermentación natural. La homogeneización y/o volteo de los granos de cacao se realizó a partir del segundo día, cada 24 horas para garantizar la oxigenación en la fase anaerobia del proceso; la fermentación se dio por concluida una vez el pH interno del grano alcanzó un valor de 4.6. Una vez detenida la fermentación y previo a dar inicio al secado el material fue pesado y extendido en las bandejas del secador.

Durante la etapa de secado se realizó seguimiento a la pérdida de masa cada dos horas, durante ese lapso se llevó a cabo el volteo, homogeneización y extensión de los granos de cacao en las bandejas. La pérdida de masa se midió empleando una balanza TRUMAX QHW6+ y la temperatura y humedad se midió a lo largo del proceso empleando dataloggers Elitech – RC-4HC.

5.1.2. Análisis fisicoquímico de los granos de cacao fermentados y secos.

5.1.2.1.pH.

La determinación de pH se realizó siguiendo la metodología empleada por Erazo Solórzano et al. (2021) y por Vega Vite (2018). Se tomaron 5 g de muestra y se disolvieron en 45 ml de agua destilada, filtrando previamente, una vez obtenido el filtrado, en este se sumergió el electrodo del potenciómetro HI5221- HANNA INSTRUMENTS, hasta que se estabilizo, la lectura, registrando el valor de pH encontrado, esta prueba se realizó por triplicado

5.1.2.2.Humedad.

El porcentaje de humedad del grano durante la fermentación y secado se determinó usando un analizador de humedad Precisa HA 300, por infrarrojo, tomando 1 g de muestra, que fue desecado a 105 °C, hasta peso constante. El porcentaje de humedad es leído de manera directa, a partir de la diferencia de peso inicial y final de la muestra. El análisis se realizó por triplicado.

5.1.2.3.Actividad de agua.

La actividad de agua se determinó empleando el analizador de humedad HygroPalm HP23 de Rotronic®, introduciendo en la cámara de lectura un grano de cacao y posteriormente corriendo el análisis. El valor de la actividad de agua (a_w) fue leído de forma digital durante la etapa de fermentación. El análisis se realizó por triplicado.

5.1.2.4.Prueba de corte.

La prueba de corte se realizó según lo establecido en la NTC 1252 (ICONTEC, 2021). Esta prueba es una inspección y estimación visual de los cambios de color que tienen lugar al interior del cotiledón de los granos de cacao a lo largo de la fermentación y el secado. La prueba consiste en tomar una muestra de 100 granos de cacao y posteriormente realizarles un corte transversal que exponga el interior del mismo para luego realizar la clasificación

5.1.2.5.Índice de fermentación.

Se realizó siguiendo la metodología descrita por López Hernández & Criollo Nuñez, (2022), usando el espectrofotómetro con una relación de absorbancia de 460 y 530 nm (Penagos, 2020; Rosero, 2021) se tomó una muestra de 0.5 g de muestra de cacao y se disuelve en 50 ml de una solución de Metanol:HCl en relación (97:3) que posteriormente se lleva a homogeneización y se deja en reposo por 19 horas a temperatura de refrigeración (8°C).

Para el cálculo del índice de fermentación se empleó la ecuación 6:

$$IF = \frac{A_{460}}{A_{530}} \quad (5)$$

Donde A_{460} es la absorbancia a 460 nm y A_{530} es la absorbancia a 530 nm (García Guarín et al., 2015; Universidad del Tolima, 2023).

Para la interpretación de los datos se tomó como referencia la siguiente información:

IF < 1: granos de cacao subfermentado.

IF \approx 1.2 – 1.4: granos de cacao bien fermentado.

IF > 1.5: granos de cacao sobre fermentado.

5.2. Sistemas de secado evaluados.

Con el fin de analizar los comportamientos del secado de los granos de cacao y su influencia sobre la calidad final del producto, se evaluaron dos sistemas de secado ampliamente utilizados en contextos productivos tropicales: el método tradicional de marquesina y un secador solar tipo túnel Hohenheim. Ambos sistemas permiten el aprovechamiento de la energía solar como fuente principal de calor, aunque difieren en la forma en que se controla el flujo de aire y las condiciones térmicas del proceso.

El uso de secadores solares constituye una alternativa sostenible para la poscosecha del cacao, ya que permite reducir el contenido de humedad del grano hasta niveles seguros para su almacenamiento y comercialización, al tiempo que disminuye la dependencia de combustibles fósiles y reduce los riesgos asociados al secado a la intemperie (Afoakwa, 2014;

Bala & Mondol, 2019; Yahaya et al., 2022). Asimismo, diferentes estudios han demostrado que las condiciones de secado pueden influir significativamente en los atributos físicos, químicos y sensoriales del cacao, por lo que la evaluación de distintos sistemas de secado resulta relevante para optimizar la calidad del producto final (Beckett, 2019; Rodríguez-Campos et al., 2021).

5.2.1. Secador solar tipo túnel Hohenheim

El secado experimental de los granos de cacao se llevó a cabo en un prototipo de secador solar tipo túnel Hohenheim, instalado en el Centro de Investigación Nataima de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Este sistema fue diseñado para aprovechar la radiación solar como fuente principal de energía térmica y promover el secado del producto mediante la circulación controlada de aire caliente a través del lecho de granos.



Ilustración 1. Prototipo de túnel de secado Hohenheim – Centro de Investigación Nataima, AGROSAVIA.

Descripción general del sistema

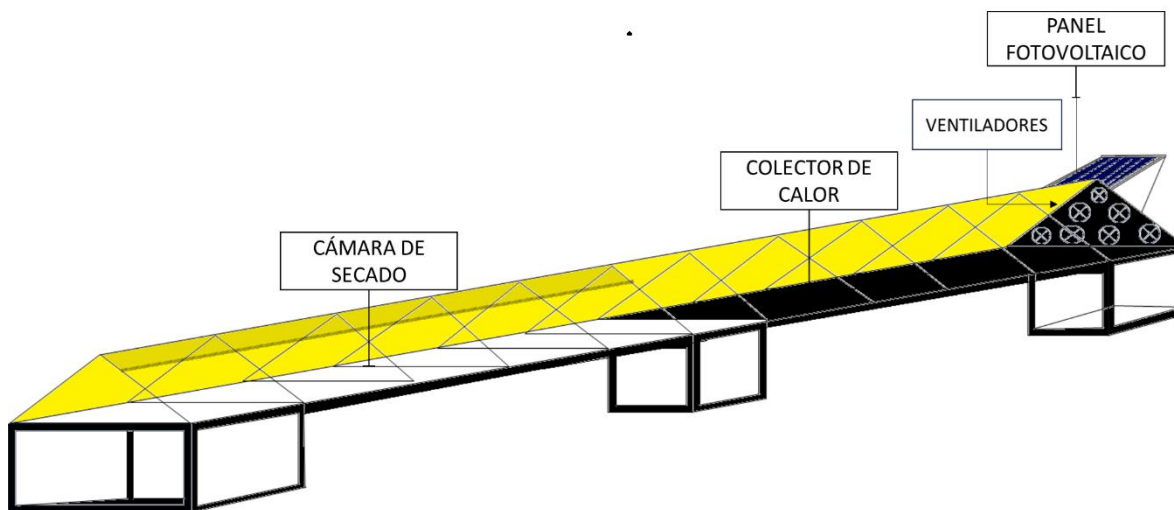


Figura 1. Esquema del secador solar tipo túnel de convección forzada utilizado para el secado de granos de cacao en el Centro de Investigación Nataima de AGROSAVIA.

El prototipo empleado estuvo conformado por dos secciones principales: una zona de recolección de calor o colector solar y una zona o cámara de secado, dispuestas longitudinalmente a lo largo del sistema. La estructura general del secador fue construida en metal de acero, mientras que la cubierta se elaboró en lámina de polietileno, material que permite el paso de la radiación solar y contribuye a la generación del efecto invernadero al interior del túnel.

La sección correspondiente al colector solar tuvo como función principal captar la radiación incidente y transformarla en energía térmica. En esta zona, el aire ambiente se calienta antes de ingresar a la cámara de secado, generando condiciones favorables para la remoción de

humedad del grano. Por su parte, la cámara de secado correspondió al espacio destinado a la disposición del cacao durante la operación, permitiendo la circulación del aire caliente a través del producto.

En la cámara de secado se dispusieron tres bandejas metálicas ubicadas longitudinalmente dentro del túnel. Cada bandeja tuvo una capacidad de carga de 10 kg, para una capacidad total de 30 kg de cacao por lote de secado. Estas bandejas fueron acondicionadas con una superficie de soporte en malla plástica, con el fin de evitar problemas asociados a corrosión y posibles contaminaciones derivadas del uso prolongado de mallas metálicas. Adicionalmente, las bandejas contaron con ruedas para facilitar su desplazamiento y permitir las operaciones de carga, descarga, volteo y homogenización del producto durante el secado.

Especificaciones técnicas del equipo

Las principales especificaciones técnicas del prototipo de secador solar tipo túnel Hohenheim empleado en esta investigación se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del prototipo de secador solar tipo túnel Hohenheim utilizado en el estudio.

Parámetro	Especificación
Tipo de equipo	Secador solar tipo túnel Hohenheim
Fuente de energía térmica	Energía solar
Tipo de convección	Forzada
Material de la cubierta	Lámina de polietileno
Material de la estructura	Metálica de acero

Longitud total del túnel	18 m
Longitud del colector solar	9 m
Longitud de la cámara de secado	9 m
Ancho del túnel	1 m
Número de bandejas	3
Capacidad de carga por bandeja	10 kg
Capacidad total de carga	30 kg
Velocidad promedio del aire	1,2 ± 0,3 m/s
Sistema de ventilación	Ventiladores alimentados con energía solar fotovoltaica
Instrumentación de monitoreo	Dataloggers Elitech RC-4HC
Equipo para control de masa	Balanza TRUMAX QHW6+

Principio de funcionamiento

El funcionamiento del secador solar tipo túnel Hohenheim se basó en el aprovechamiento de la energía solar para calentar el aire y conducirlo posteriormente a través del producto. La radiación solar incidente atravesó la cubierta de polietileno y fue absorbida en la zona de recolección de calor, donde el aire incrementó su temperatura antes de ingresar a la cámara de secado.

El movimiento del aire al interior del sistema se realizó mediante convección forzada, inducida por ventiladores ubicados en uno de los extremos del secador y alimentados por un panel solar fotovoltaico. De esta manera, el aire ambiente fue impulsado hacia el interior del túnel, atravesó primero el colector solar y luego la cámara de secado, entrando en contacto directo con los granos de cacao. Durante este proceso tuvo lugar la transferencia de calor desde el aire caliente hacia el producto y, simultáneamente, la transferencia de masa desde el

interior del grano hacia el ambiente, favoreciendo la evaporación del agua y la renovación continua del aire dentro del sistema.

5.2.2. Como sistema de referencia se empleó el secado tradicional en marquesina, ampliamente utilizado en sistemas productivos de cacao en América Latina. Este sistema consiste en una estructura cubierta con plástico transparente que permite aprovechar la radiación solar de manera directa para elevar la temperatura del aire y promover el secado natural de los granos.

La marquesina funciona bajo el principio de convección natural, donde el movimiento del aire se genera principalmente por diferencias de temperatura entre el interior y el exterior de la estructura. El aire caliente tiende a ascender y salir por las aberturas superiores, mientras que el aire más fresco ingresa desde el exterior, generando una circulación natural que facilita la eliminación de la humedad del producto.

Ilustración 2. Secadores tipo marquesina – Centro de Investigación Nataima – AGROSAVIA.





En este sistema, los granos de cacao se dispusieron sobre superficies elevadas o bandejas con malla, lo que permitió la circulación del aire alrededor del producto. Durante el proceso de secado se realizaron operaciones periódicas de volteo, con el fin de asegurar una distribución uniforme de la humedad y evitar el desarrollo de defectos asociados a un secado heterogéneo.

El secado en marquesina presenta ventajas como su bajo costo de implementación y facilidad de operación, lo que explica su amplia adopción por pequeños y medianos productores. Sin embargo, este método depende en gran medida de las condiciones climáticas, lo que puede generar variaciones en el tiempo de secado y en la calidad final del producto.

Debido a estas características, la comparación entre la marquesina y el secador solar tipo túnel Hohenheim resulta relevante para identificar diferencias en la dinámica de secado y en los atributos de calidad del cacao obtenido bajo cada sistema.

5.3. Cálculo de isotermas.

Las isotermas de sorción permiten describir la relación entre el contenido de humedad de equilibrio de un alimento y su actividad de agua (a_w) a una temperatura constante. En este estudio se emplearon para caracterizar el comportamiento higroscópico de los granos de cacao sometidos a los tratamientos de secado en el túnel solar tipo Hohenheim y en marquesina. Con base en los datos disponibles obtenidos se emplearon las siguientes estrategias:

Con el fin de describir el comportamiento del secado de los granos de cacao bajo las condiciones experimentales evaluadas, los datos obtenidos durante el proceso fueron utilizados para ajustar diferentes modelos matemáticos de capa delgada (thin layer drying models). Estos modelos permiten representar la relación entre el contenido de humedad del producto y el tiempo de secado, facilitando el análisis de la cinética del proceso.

5.3.1.1. Modelos Matemáticos

el comportamiento cinético del proceso de secado de los granos de cacao fue descrito mediante modelos matemáticos empíricos ampliamente utilizados en estudios de secado de productos agrícolas. Estos modelos permiten representar la variación de la razón de humedad (Moisture Ratio, MR) en función del tiempo de secado.

La razón de humedad se calculó mediante la ecuación:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6)$$

Donde:

M_e : Contenido de humedad en equilibrio.

M_0 : Contenido de humedad inicial.

M: Contenido de humedad en base seca.

La humedad en equilibrio (M_e) fue estimada como la humedad final experimental alcanzada al término del proceso de secado bajo condiciones operativas constantes, considerando que el producto no presento variaciones adicionales significativas en su contenido de humedad durante mediciones consecutivas. Este procedimiento es comúnmente adoptado en estudios

de secado de productos agrícolas cuando se realiza la determinación experimental de isoterms higroscópicas (Doymaz, 2007; Erbay & Icier, 2010).

Los datos experimentales fueron ajustados mediante regresión no lineal a los siguientes modelos cinéticos:

5.3.1.2. Modelo de Newton.

$$MR = e^{(-kt)} \quad (8)$$

Donde k es la constante de secado.

Este modelo asume una sola etapa de controlada por difusión y ha sido ampliamente utilizado para describir el secado en capa delgada de productos agrícolas (Midilli et al., 2002).

5.3.1.3. Modelo de Page.

$$MR = e^{(-kt^n)} \quad (9)$$

Donde:

K es la constante de secado,

n es un parámetro empírico que corrige la desviación del modelo exponencial simple.

El modelo de page es una modificación del modelo de Newton y generalmente presenta mejor ajuste para productos agrícolas debido a su mayor flexibilidad matemática (Page, 1949; Erbay & Icier, 2010).

5.3.1.4. Modelo de Henderson y Pabis.

$$MR = \alpha e^{(-kt)} \quad (10)$$

Donde:

a: es una constante adimensional,

k: es la constante de secado.

Este modelo introduce un factor multiplicativo que mejora el ajuste en ciertos materiales biológicos (Henderson & Pabis, 1961).

Los modelos matemáticos fueron ajustados a los datos experimentales de razón de humedad mediante regresión no lineal utilizando el software estadístico mencionado.

La bondad de ajuste fue evaluada mediante el coeficiente de determinación R^2 , el error cuadrático medio (RMSE). El modelo cuyo valor de R^2 fuese mayor y e con menor error fue considerado el mas adecuado para describir el comportamiento cinético del secado de los granos de cacao en cada sistema evaluado.

El uso de los modelos empíricos para describir la cinética de secado en productos agrícolas es una practica ampliamente validada en la literatura científica, ya que permite comparar tecnologías y estimar parámetros cinéticos asociados a condiciones operativas específicas (Doymaz, 2007; Erbay & Icier, 2010; Midilli et al., 2002).

5.3.2. Procedimiento experimental.

Los datos de humedad de agua fueron y actividad de agua registrados durante el secado fueron utilizados para construir las isotermas de adsorción y desorción. La actividad de agua se midió con un analizador HygroPalm HP23 (Rotronic AG, Suiza), mientras que la humedad se determinó con un analizador infrarrojo Precisa HA 300 (Precisa Gravimetrics AG, Suiza).

Se calcularon promedios ponderados de temperatura y humedad relativa, integrando las mediciones obtenidas por los dataloggers Elitech RC-4HC (Elitech Technology Inc., EE.UU.) a lo largo del proceso de secado.

5.2.3 Ajuste de los modelos.

Los parámetros de los modelos matemáticos se ajustaron mediante regresión lineal utilizando el software Minitab® 20 (Minitab Inc., EE.UU.) y el complemento de solver de Microsoft Excel® 2021. La bondad de ajuste se evaluó mediante la determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE) tal como se recomienda en estudios previos de secado de cacao y café (Silva et al., 2020; Batista et al., 2022).

5.4. Promedio Ponderado de Condiciones:

Con el fin de caracterizar de manera representativa el comportamiento del aire en cada sistema, los datos de temperatura (T) y humedad relativa (HR) registrados por los dataloggers (Elitech RC-4HC, Elitech Technology Inc., EE.UU.), fueron integrados mediante el cálculo de promedios ponderados.

Los valores se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas cada 20 minutos durante el proceso de secado, considerando la ubicación de los sensores en diferentes puntos del túnel y la marquesina (entrada, intermedios y salida). Esta integración permitió obtener un perfil global de las condiciones ambientales en cada tratamiento, el cual sirvió como base para el análisis de la dinámica de cada tratamiento, el cual sirvió como base para el análisis de la dinámica de secado y para los ajustes en los modelos de transferencia de masa y energía.

5.5. Dinámica de Secado

La dinámica de secado se evaluó a partir de la evolución de la masa y del contenido de humedad de los granos de cacao durante el proceso, tanto en el túnel solar tipo Hohenheim como en la marquesina tradicional.

La pérdida de masa se determinó mediante pesajes realizados cada dos horas en una balanza digital de precisión (Trumax QHW-6+, Trumax Instruments, China). Con estos datos se calculó el contenido de humedad en base húmeda y base seca, lo que permitió representar la disminución de humedad en función del tiempo de secado.

5.5.1. Curvas de Secado:

Las curvas de secado se construyeron graficando el contenido de humedad (M) en función del tiempo (t), y también la razón de la humedad (MR), obtenida con la ecuación (9).

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (11)$$

donde:

- m_t : contenido de humedad en el tiempo t ,
- m_0 : contenido de humedad inicial,
- m_e : humedad de equilibrio.

El valor de m_e fue estimado experimentalmente y utilizado como parámetro de referencia en los cálculos.

La masa de las muestras se midió en intervalos regulares (cada 2 horas) durante el proceso de secado. Cada medición se realizó con tres repeticiones para garantizar la fiabilidad de los datos.

5.5.2. Tasa de Secado:

La tasa de secado (dM/dt) se determinó mediante la ecuación (10):

$$\frac{d_M}{d_t} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (12)$$

Donde Δt corresponde al intervalo de tiempo entre cada medición (2 horas). Este cálculo permitió identificar las fases de secado (periodo de tasa constante y periodo de tasa decreciente) en cada tratamiento.

5.5.3. Representación gráfica.

Los resultados se expresaron en una sola figura comparativa, mostrando las curvas de secado de los dos tratamientos (Túnel y marquesina), incluyendo las barras de desviación estándar de cada replica. De esta forma, se buscó evaluar no solo la tendencia general de secado, sino también la variabilidad entre baches.

5.6. Modelos de Secado:

El comportamiento del secado de los granos de cacao se modelo utilizando dos ecuaciones empíricas comúnmente aplicada a alimentos higroscópicos: Newton y Page.

El modelo de Newton se expresa como:

$$MR = e^{-kt} \quad (13)$$

El modelo de page, una modificación del anterior se define como

$$MR = e^{-kt^n} \quad (14)$$

donde:

- MR : razón de humedad (adimensional)
- t : tiempo (h)
- k : constante de secado (h^{-1})
- n : exponente empírico del modelo de Page.

El ajuste de los modelos se realizó mediante regresión no lineal, utilizando el método de levenberg-marquardt implementado en el software Minitab® 20 (Minitab Inc., EE.UU.) y complementado con Solver de **Microsoft Excel® 2021**. La calidad del ajuste se evaluó con el coeficiente de determinación (R^2) y e error cuadrático medio (RMSE), de acuerdo con lo recomendado por García-Guarín et al. (2015) y Bai et al. (2023).

Además de los modelos de Newton y Page, en la literatura se han reportado otras ecuaciones empíricas empleadas en el modelado del secado de productos agrícolas, tales como Henderson & Pabis, Logarithmic y Midilli–Kucuk (Bai et al., 2023). Estos modelos

empíricos incorporan parámetros adicionales que pueden mejorar el ajuste estadístico de los datos, especialmente en las fases inicial y final del proceso. Sin embargo, la interpretación física de dichos parámetros suele ser limitada y requiere un mayor número de observaciones experimentales para garantizar su robustez.

En el presente estudio se optó por utilizar únicamente los modelos de Newton y Page, dado que estos han demostrado ser eficientes para describir la cinética de secado en productos como cacao y café (García-Guarín et al., 2015; Silva et al., 2020), y por qué los intervalos de muestreo empleados (cada 2h) no justifican el uso de modelos con mayor número de parámetros.

Balance de Masa y Energía:

Con el fin de evaluar la eficiencia de los sistemas de secado, se realizó un balance de masa y energía considerando las condiciones operativas del túnel solar tipo Hohenheim y la marquesina.

5.6.1. Balance de masa

El balance de masa se basó en la variación de humedad de los granos durante el secado. La humedad inicial M_0 y final M_f se determinaron experimentalmente, y la pérdida de agua Δm_{agua} se calculó como:

$$\Delta m_{agua} = m_0 \cdot \left(\frac{M_0 - M_f}{100} \right) \quad (15)$$

Donde:

m_{agua} : masa de agua eliminada

m_0 : masa inicial de granos de cacao (Kg).

M_0 : contenido de humedad inicial (% b. h.)

M_f : contenido de humedad final (% b. h.)

El análisis se realizó para cada replica, considerando el peso registrado en los pesajes sucesivos.

5.6.2. El balance de energía:

El balance energético considero la energía solar incidente (Q_{in}) y la energia requerida para evaporar el agua (Q_{evap}).

$$Q_{in} = A \cdot I \cdot t \quad (16)$$

$$(Q_{evap}) = \Delta m_{agua} \cdot \lambda \quad (17)$$

donde:

- A: área del colector solar (m²),
- I: radiación solar promedio incidente (kW/m²),
- t: tiempo de exposición (h),
- Δm_{agua} : masa de agua evaporada (kg),
- λ : calor latente de vaporización del agua (aprox. 2257 kJ/kg a 100 °C, ajustado a temperatura de secado).

La eficiencia térmica del sistema (η) se calculó como la relación entre la energía utilizada en la evaporación del agua y la energía solar incidente:

$$\eta = \frac{Q_{evap}}{Q_{in}} \cdot 100 \quad (15)$$

Supuestos del balance.

- Se asumió estado estacionario en cada intervalo de medición.
- Se consideraron despreciables las pérdidas de calor por radiación y conducción en las paredes.
- Se asumió que toda la energía absorbida se destinó al calentamiento del aire y la evaporación del agua.

El cálculo se efectuó mediante registros de radiación solar tomados en estación meteorológica local y los datos experimentales de humedad y pérdida de masa, procesados con **Microsoft Excel® 2021**.

5.7. Validación y Comparación

5.7.1. validación del ajuste de modelos.

Los parámetros de cada modelo se estimaron mediante regresión no lineal con el método de levenberg- marquardt. La bondad de ajuste se evaluó con el coeficiente de determinación ajustado (R_{adj}^2), el error cuadrático (RMSE), el error porcentual absoluto medio (MAPE) y el criterio de información de akakie (AIC), de acuerdo con lo recomendado en análisis de modelos de secado (Draper & Smith, 1998; Burnham & Anderson, 2002).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{obs,i} - MR_{pred,i})^2}$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{MR_{obs,i} - MR_{pred,i}}{MR_{obs,i}} \right|$$

$$AIC = n \cdot \ln \left(\frac{RSS}{n} \right) + 2K$$

Donde $MR_{obs,i}$ y $MR_{pred,i}$ corresponden a la razón de humedad observada y predicha, n es el número de observaciones, k el número de parámetros del modelo y RSS la suma de residuos al cuadrado.

El diagnóstico de residuos incluyó pruebas de normalidad (Shapiro – Wilk), homocedasticidad (Levene) e independencia visual mediante gráficas residuales vs. Valores ajustados, siguiendo la metodología propuesta por Montgomery (2013) para garantizar la validez de los modelos de regresión.

5.7.2. Comparación entre tratamientos (Túnel vs. Marquesina).

Se compararon las constantes de secado (k, n) del modelo de Page, el tiempo requerido para alcanzar la humedad de secado (7-8%), y la tasa de secado promedio en las diferentes fases del proceso. Asimismo, se analizaron variables fisicoquímicas (pH, aW, índice de fermentación y prueba de corte), contrastándola con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 1252 (ICONTEC, 2021).

Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante ANOVA de una vía. En caso de encontrar diferencias significativas ($p > 0,05$), se aplicó la prueba de Tukey. Cuando no se cumplieron los supuestos de normalidad u homogeneidad de varianzas, se utilizaron pruebas no paramétricas como Mann-Whitney, siguiendo lo sugerido por Montgomery (2013). Para completar se calculó el tamaño del efecto (Cohen's d) con intervalos de confianza al 95%, lo que permitió interpretar la magnitud de las diferencias más allá de la significancia estadística.

5.7.3. **Consistencia interna y trazabilidad.**

La reproducibilidad de los resultados se verificó mediante el coeficiente de variación (CV%) entre replicas. La coherencia físico-técnica se validó contrastando la masa de agua evaporada (Δm_{agua}) obtenida a partir de pesajes con la integración de la tasa de secado lo que asegura la consistencia de los datos (Condori et al., 2001). Además, se documentó la calibración de los equipos (pH-metro con soluciones buffer 4.00 y 7.00, aW con sales patrón, balanza con pesas patrón certificadas y sincronización de dataloggers, lo que garantiza trazabilidad en las mediciones.

5.7.4. **Validación externa con literatura y norma.**

Los resultados se cotejaron con los rangos de referencia establecidos en la NTC 1252 para humedad final y prueba de corte (ICONTEC, 2021), así como con valores reportados en literatura: pH entre 4,5 – 5,5 y aW inferior a 0,7 en granos de cacao bien fermentados (Aculey et al., 2019). También se compararon los valores de las constantes de secado y el desempeño de los modelos con estudios previos en cacao y café, donde el modelo de Page ha demostrado un mejor ajuste que el de Newton (García-Guarín et al., 2015; Bai et al., 2023).v

5.8. Análisis sensorial.

El análisis sensorial del licor de cacao se realizó siguiendo los lineamientos de la metodología **Cocoa of Excellence (CoEx)**, empleada internacionalmente para la evaluación del cacao fino y de aroma. Este protocolo proporciona una base estandarizada para medir atributos básicos y complementarios del perfil sensorial, permitiendo comparar de manera objetiva el efecto del método de secado sobre la calidad del grano (Cocoa of Excellence, 2021).

5.8.1. Atributos evaluados

Con base en la ficha sensorial CoEx y en la guía de evaluación de la **International Cocoa Organization — ICCO** (ICCO, 2015), se evaluaron los siguientes **atributos básicos**:

- Aroma a cacao
- Amargor
- Astringencia
- Acidez total
- Acidez frutal
- Acidez acética
- Acidez láctica

Estos atributos están estrechamente relacionados con la composición química del cacao fermentado, particularmente con los compuestos volátiles, ácidos orgánicos y polifenoles que definen la estructura sensorial del licor (Afoakwa et al., 2014; Aprotosoai et al., 2016).

Asimismo, se incluyeron los **atributos complementarios** definidos por CoEx para cacao fino:

- Notas florales
- Notas frutales
- Notas dulces (miel, caramelo)
- Notas tostadas
- Notas nuez/madera
- Persistencia aromática
- Limpieza del sabor (ausencia de defectos)

La inclusión de estos atributos complementarios permite evaluar la complejidad aromática, asociada a la conservación o transformación de compuestos volátiles durante el secado (Crafack et al., 2014; Torres-Moreno et al., 2015).

5.8.2. Escala utilizada

Se utilizó la **escala descriptiva CoEx**, con un rango de **0 a 10**, donde:

- **0**: ausencia del atributo
- **1–3**: intensidad ligera
- **4–6**: intensidad media
- **7–8**: intensidad marcada
- **9–10**: máxima expresión sensorial

El uso de esta escala ha sido validado en estudios sensoriales de cacao enfocados en la influencia de la fermentación y el secado sobre los perfiles aromáticos (Aculey et al., 2019; Batista et al., 2022).

5.8.3. Panel y protocolo de evaluación

El panel estuvo conformado por cinco jueces entrenados, previamente calibrados bajo el esquema CoEx utilizando referencias aromáticas estándar (ICCO, 2015; Cocoa of Excellence, 2021).

Las muestras de licor se elaboraron tostando los granos a 120 °C por 25 min, siguiendo metodologías recomendadas en estudios que buscan preservar la comparabilidad sensorial entre tratamientos (Aprotosoai et al., 2016).

Las muestras fueron codificadas con números aleatorios de cuatro dígitos y presentadas bajo un diseño balanceado para evitar sesgos de orden o fatiga sensorial (Torres-Moreno et al., 2015).

5.8.4. Análisis estadístico

Los puntajes de los jueces fueron registrados en la ficha CoEx adaptada y analizados mediante ANOVA de medidas repetidas considerando el juez como factor aleatorio y el método de secado como factor fijo. Las diferencias significativas se determinaron con la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Este enfoque estadístico ha sido ampliamente aplicado en estudios de discriminación sensorial en cacao (Batista et al., 2022).

5.9. Análisis de datos.

Los resultados sensoriales se analizaron mediante ANOVA de medida repetidas, considerando el juez como factor aleatorio y el tipo de secado como factor fijo. Se aplicó la prueba de Tukey ($p < 0,05$) para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para explorar asociaciones entre los atributos sensoriales y tratamiento, siguiendo metodologías reportadas de calidad sensorial de cacao (Torres-Moreno et al., 2015; Batista et al., 2022).

El diseño experimental permitió estandarizar el acondicionamiento, secado y análisis de los granos de cacao bajo dos sistemas contrastantes: el túnel solar tipo Hohenheim y la marquesina tradicional. Se definieron protocolos detallados para la medición de variables físicas, químicas y sensoriales, así como los modelos matemáticos y balances de masa y energía necesarios para interpretar la dinámica del secado. El uso de metodologías estadísticas y de validación asegura la reproducibilidad y trazabilidad de los resultados.

Con este marco metodológico, se dispone de los elementos necesarios para analizar y discutir de manera integral los efectos de cada sistema de secado sobre la calidad del cacao, comparando no solo la cinética y eficiencia del proceso, sino también el impacto en los atributos fisicoquímicos y sensoriales del producto final.

6. Resultados y discusión.

El desarrollo metodológico permitió establecer las condiciones experimentales necesarias para evaluar el comportamiento del secado de los granos de cacao en dos sistemas contrastantes: el túnel solar Hohenheim y la marquesina tradicional. A partir de la aplicación de los protocolos descritos, se obtuvieron los datos que sustentan el análisis comparativo entre ambos.

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos, abordando tanto los aspectos técnicos del proceso de secado como las implicaciones sobre la calidad del producto. El enfoque de análisis busca comprender cómo las variables físicas, energéticas y sensoriales interactúan para definir la eficiencia y el perfil de calidad del cacao seco, con miras a aportar criterios útiles para el mejoramiento de los sistemas poscosecha en condiciones tropicales.

6.1. Acondicionamiento de los granos cacao.

Los granos de cacao utilizados en los ensayos de secado presentaron condiciones iniciales homogéneas, derivados de un mismo proceso de fermentación controlado. En la tabla 5 se resumen los valores obtenidos al finalizar la fermentación (día 6), correspondiente a tres replicas experimentales.

Tabla 5 . parámetros fisicoquímicos de los granos de cacao al finalizar la fermentación.

Réplica	Humedad (% b.h.)	aW	pH
F1	39.09	0.96	4.7
F2	41.5	0.926	4.65
F3	41.6	0.947	4.51
Promedio ± DE	40.73 ± 1.42	0.94 ± 0.02	4.62 ± 0.10

los resultados obtenidos reflejan un comportamiento típico de una fermentación adecuada para cacao tipo trinitario, con un pH promedio de 4.62, humedad del 40.73% y actividad de agua (aW) de 0.94. estos valores se encuentran dentro de los rangos recomendados para los granos fermentados, donde el pH varía entre 4.5 y 5.5 y la humedad final entre 38 y 42 % (Erazo-Solórzano et al., 2021; Sánchez-López et al., 2023).

El valor del pH ligeramente ácido indica una correcta difusión de los ácidos orgánicos formados durante la fermentación hacia el cotiledón, un proceso asociado a la acción combinada de levaduras, bacteria lácticas y acéticas (De Vuyst & Weckx, 2017). Este nivel

de acidez contribuye a la degradación de compuestos fenólicos y a la formación de pigmentos marrones, los cuales confieren al cotiledón su color característico y generan precursores aromáticos esenciales para el desarrollo del sabor (Aprotosoiaie et al., 2016).

La actividad de agua ($a_w=0.94$) se mantuvo elevada, dado el contenido de humedad al finalizar la fermentación. Esta condición favorece la actividad enzimática necesaria para las transformaciones bioquímicas del grano, pero también exige que el secado posterior se realice de manera rápida y controlada para evitar la sobrefermentación (Aculey et al., 2019).

La variación relativamente baja entre replicas ($CV<4\%$) demuestra que el proceso de fermentación fue reproducible y controlado, lo que garantiza que las diferencias encontradas en etapas posteriores del estudio se deban a la influencia del sistema de secado y no a discrepancias en el estado inicial de los granos.

En conjunto, los resultados confirman que el material inicial fue adecuado para el desarrollo de la etapa de secado, asegurando uniformidad y calidad en la condición previas a la etapa de secado.

La fermentación controlada generó granos con una acidez balanceada y actividad de agua alta, condiciones que influyen directamente en la velocidad y eficiencia del secado. Este punto de partida homogéneo garantiza que las variaciones observadas entre el túnel y la marquesina puedan atribuirse principalmente a las diferencias entre las condiciones térmicas y de transferencia de masa de cada sistema.

6.1.1. Evolución de las variables fisicoquímicas durante la fermentación.

La fermentación para los tres baches, tuvo una duración de 192 horas (ocho días), los volteos se realizaron a partir del tercer día después de iniciada la fermentación uno diario y de manera vigorosa para mejorar la incorporación de aire en la etapa anaerobia de la fermentación, se tomó como criterio de finalización de la fermentación la dinámica del pH durante el proceso y la formación de estructuras arriñonadas en los cotiledones observadas durante la realización de la prueba de corte, la ilustración 1 muestra la formación de dichas estructuras.



Ilustración 3 Formación de las estructuras arriñonadas en los cotiledones de los granos de cacao como indicador de finalización de la fermentación.

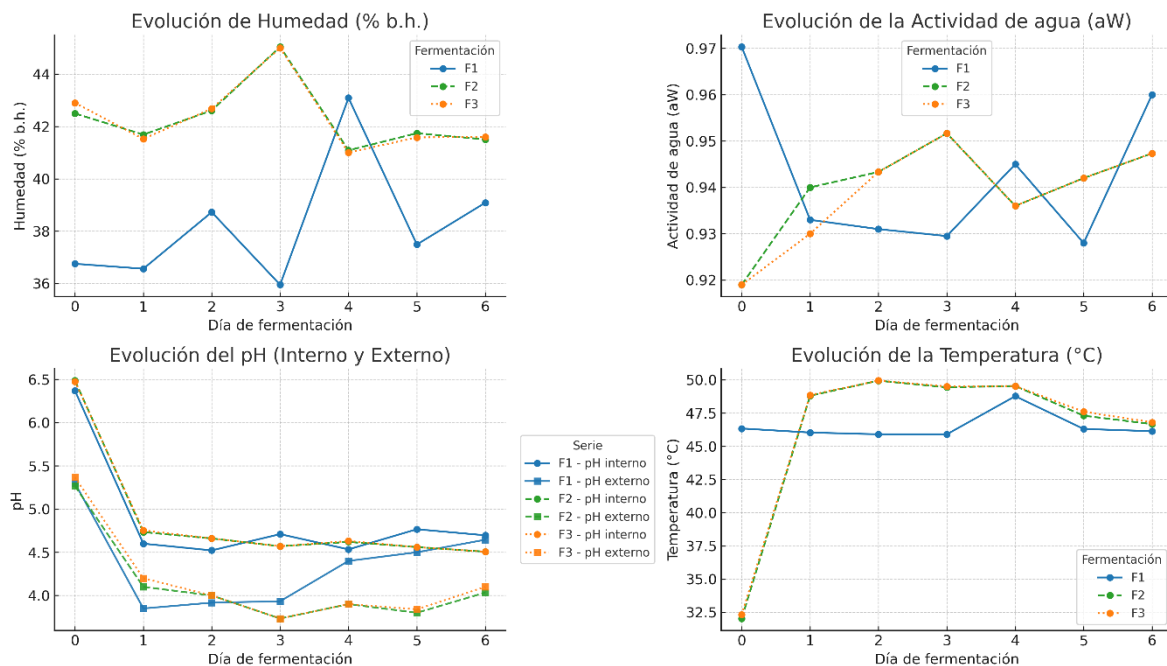


Figura 1. Evolución de (a) humedad (% b.h.), (b) actividad de agua (aW), (c) pH interno y externo y (d) temperatura (°C) durante los seis días de fermentación para tres réplicas (F1, F2 y F3).

Las tendencias reflejan pérdida de agua del mucílago, acumulación/difusión de ácidos y pico térmico microbiano característico del proceso.

durante los seis días de fermentación se observaron variaciones coherentes con un proceso bien desarrollado. Figura 1. La humedad disminuyó de forma general desde valores altos del grano fresco hasta 40 -45 % b.h al día 6, asociada a la pérdida de mucílago y a la aireación por volteo diario. La actividad de agua a_w mostro una reducción paulatina (0.94 – 0.96 al final), lo que refleja menor disponibilidad de agua libre y mayor concentración de solutos fermentativos (Aculey et al., 2019).

El pH externo descendió con rapidez en los primeros dos días, mientras que el pH interno lo hizo de forma más lenta, convergiendo hacia al final en torno a 4.5 – 4.7 (figura 1). Esta diferencia y posterior acercamiento interno – externo evidencia la difusión de ácidos hacia el cotiledón, indicador del grado de fermentación (De Vuyst & Weckx, 2017). La temperatura del grano alcanzo un máximo hacia el 2 -3 día (49 – 50 °C) y luego decreció, patrón típico del pico metabólico microbiano y su posterior declive (Aprotosoie et al., 2016; Ramírez et al., 2021).

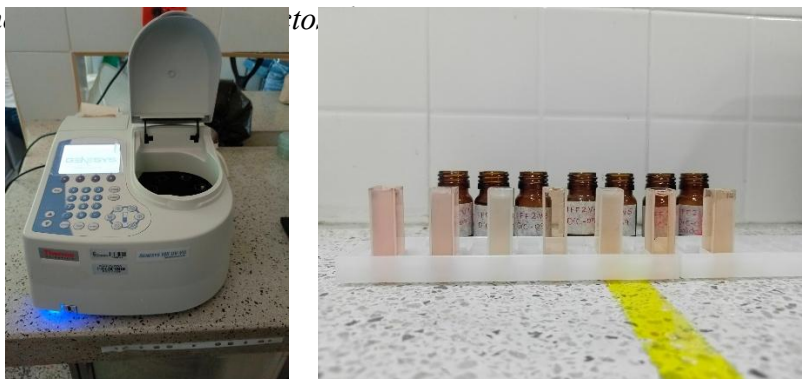
En conjunto, el descenso de humedad y a_w , el gradiente de pH (externo e interno) y el perfil térmico confirman una fermentación completa y uniforme entre replicas, proporcionando un material de partida homogéneo para evaluar los efectos del tipo de secado.

6.1.2. Índice de fermentación.

El índice de fermentación (IF) fue determinado para los tres ensayos a partir de la relación de absorbancias A_{460}/A_{530} , obtenidas por espectrofotometría UV-Vis en extractos de cacao fermentados. Este índice refleja el grado de degradación de antocianinas y la formación de

pigmentos marrones, parámetros que indican la progresión y la homogeneidad del proceso fermentativo.

Ilustración 4 . la relación de absorbancias $\frac{A_{460}}{A_{530}}$, obtenidas por espectrofotometría.



Los valores promedio de IF fueron 1.45 ± 0.58 , 2.02 ± 0.85 y 1.43 ± 0.33 para los ensayos 1, 2 y 3 respectivamente (Tabla 6). El promedio global fue de 1.63 ± 0.56 , correspondiente a granos bien fermentados. Estos resultados indican un comportamiento típico de los granos bien fermentados cuyos valores de IF se sitúan generalmente entre 1.0 y 2.5 (Afoakwa et al., 2014; López-Hernández & Criollo, 2022).

Tabla 6 . Índice de fermentación (IF) en los tres ensayos

Ensayo	Promedio IF	Desviación estándar	Rango observado
1	1.45	0.36	0.95 – 1.79
2	2.02	0.85	0.92 – 3.07
3	1.43	0.33	0.97 – 1.77
Promedio global \pm DE: 1.63 ± 0.56			

La variabilidad controlada entre los ensayos ($CV < 15\%$) confirma la reproducibilidad del proceso y la estabilidad de las condiciones experimentales. Estos resultados concuerdan con lo descrito por Sánchez-López et al. (2023), quienes reportan índices de fermentación similares (1.4 – 2.0) en cacao fino fermentado en cajas de madera con volteos regulares.

El índice de fermentación es un parámetro indirecto que permite inferir la extensión de las reacciones enzimáticas y oxidativas durante la fermentación, especialmente la conversión de antocianinas e o-quinonas, que posteriormente se polimerizan en pigmentos marrones. Valores de IF superiores a 1.0 indican una degradación efectiva de antocianinas y un adecuado desarrollo de los compuestos precursores del sabor (Afoakwa et al., 2014).

En este estudio, la consistencia entre ensayos evidencia un control adecuado del proceso, garantizando un material homogéneo para la etapa de secado y minimizando la influencia de variaciones fermentativas en los resultados posteriores.

6.2. Secado.

6.2.1. Condiciones ambientales del secado

el secado de los granos de cacao se realizó en dos sistemas contrastantes: túnel solar tipo Hohenheim y marquesina tradicional, durante tres ensayos independientes. En todos los casos, los granos se trasladaron al sistema de secado una vez que la fermentación alcanzó un pH entre 4.5 y 5.5, rango que indica la etapa óptima para finalizar la fermentación y promoverla volatilización del ácido acético residual (Aprotosoai et al., 2016; De Vuyst & Weckx, 2017). En los casos donde el pH fue intermedio, aplico una fase corta de presecado para acelerar el proceso y garantizar la uniformidad del material antes del inicio del secado principal.

Los ensayos se desarrollaron en las siguientes fechas (Tabla 7):

Tabla 7 Lapsos de desarrollo de los ensayos.

Ensayo	Sistema	Fecha inicio	Fecha fin	Duración total (h)
1	Túnel / Marquesina	22 jul – 25 jul (10:21 a.m.)	25-jul (8:21 a.m.)	~70
2	Túnel / Marquesina	12 sep – 14 sep (15:37)	14-sep (14:27)	~47

3	Túnel / Marquesina	12 oct – 15 oct (12:40 p.m.)	15-oct (8:30 a.m.)	~68
---	--------------------	---------------------------------	-----------------------	-----

Durante todos los ensayos, la velocidad promedio del aire al interior del túnel se mantuvo en promedio en 1.2 ± 0.3 m/, impulsada por el sistema de ventilación alimentada mediante energía solar fotovoltaica, lo que permitió un flujo continuo y homogéneo de aire caliente a lo largo del colector y la cámara de secado. En la marquesina, la convección fue natural, dependiendo de las variaciones de temperatura y humedad del ambiente y la apertura de la cortina para facilitar la circulación del aire.

Las variables temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) fueron registradas automáticamente cada 20 minutos mediante dataloggers Elitech RC-4HC ubicados en la zona de colector y cámara de secado del túnel, y en el interior central de la marquesina.

Durante los tres ensayos realizados en el túnel solar tipo Hohenheim y en la marquesina tradicional se evidenciaron comportamientos térmicos y de humedad característicos de cada sistema (Figura 6.3).

En el túnel, la temperatura media del aire osciló entre 45 y 60 $^{\circ}\text{C}$ en la cámara de secado y entre 40 y 55 $^{\circ}\text{C}$ en el colector, con gradientes térmicos bien definidos entre zonas. Estos valores concuerdan con lo reportado por Condori et al. (2001) y García-Guarín et al. (2015) para sistemas solares de convección forzada.

La humedad relativa interna se mantuvo entre 25 y 45 %, favoreciendo la transferencia de masa y reduciendo el riesgo de condensación.

En contraste, la marquesina presentó fluctuaciones más amplias tanto en temperatura (entre 30 y 50 $^{\circ}\text{C}$) como en humedad relativa (40–70 %), dependientes de la radiación solar y las condiciones ambientales externas. Este comportamiento evidencia la menor estabilidad

térmica del sistema de convección natural y explica la mayor variabilidad del secado observada en los registros de masa y humedad.

En la Figura 2. se observa que el túnel Hohenheim proporcionó un ambiente térmico más elevado y estable que la marquesina. Durante los tres ensayos, la temperatura del aire en la cámara del túnel alcanzó picos diurnos del orden de 80–85 °C, con mínimos nocturnos de ~18–25 °C, mientras que la humedad relativa (HR) descendió rutinariamente a 10–20 % en horas de mayor carga térmica y se recuperó a 80–90 % durante la noche. En contraste, la marquesina mostró picos térmicos más bajos (~50–60 °C) y una HR más variable (20–80 %), coherente con su dependencia de las condiciones ambientales y la ventilación natural. Este comportamiento confirma que el túnel ofrece un gradiente térmico interno (cámara > colector) y una reducción diurna sostenida de HR que favorecen la transferencia de masa en la etapa de tasa de secado mayor, mientras que en la marquesina las oscilaciones de T y HR atenúan ese efecto y explican la mayor dispersión observada entre días. Estos resultados son consistentes con lo reportado para sistemas de convección forzada frente a convección natural en secado solar (e.g., García-Guarín et al., 2015; Condori et al., 2001).

En conjunto, las condiciones registradas confirman que el túnel proporcionó un entorno de secado más uniforme, controlado y eficiente, mientras que la marquesina mantuvo una respuesta más dependiente del clima, coherente con su diseño abierto y menor capacidad de aislamiento.

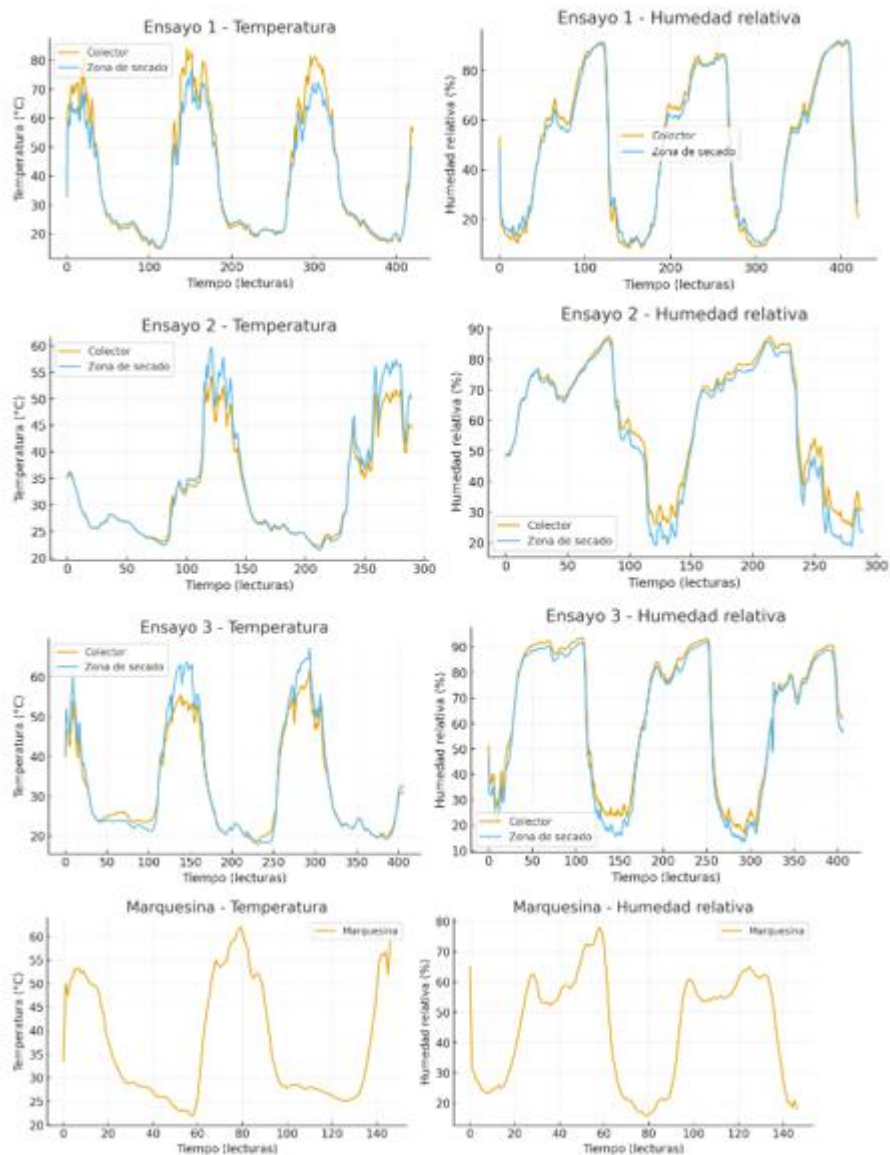


Figura 2 Variación de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y la humedad relativa (%) durante los tres ensayos de secado en túnel solar tipo Hohenheim y en la marquesina tradicional. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).

6.2.2. dinámica de pérdida de masa y humedad.

Dado el régimen térmico superior y la menor humedad relativa diurna observadas en el túnel solar (Figura 3a), se anticipan mayor gradiente de presión de vapor entre el aire y el grano, lo que favorece agilizando la evaporación del agua libre durante las primeras horas de secado.

En consecuencia, las curvas de pérdida de masa y humedad (Figura 3b) presentan pendientes iniciales más pronunciadas en el túnel que en la marquesina, reflejando una mayor eficiencia en la etapa de tasa de secado constante. Conforme avanza el proceso y el contenido de humedad se aproxima al equilibrio higroscópico, ambas condiciones convergen hacia un régimen de difusión interna limitada, donde la temperatura y la estabilidad del flujo de aire juegan un papel determinante en uniformidad del secado final.

En la figura 3. se presenta la evolución del contenido de humedad del grano (%b.h) y de la masa relativa (M/M_0) durante el proceso de secado en el túnel solar tipo Hohenheim y en la marquesina tradicional. Se observa que en el túnel la pérdida de humedad ocurre de forma más rápida y definida en las primeras horas del proceso, mientras que en la marquesina esta disminución es gradual y prolongada.

Este comportamiento es característico de los procesos de secado con convección forzada, en los cuales la combinación de mayor temperatura del aire y baja humedad relativa genera un gradiente de presión de vapor más alto entre la superficie del grano y el aire circundante, lo que acelera la evaporación del agua libre (Hossain & Bala, 2007; García-Guarín et al., 2015).

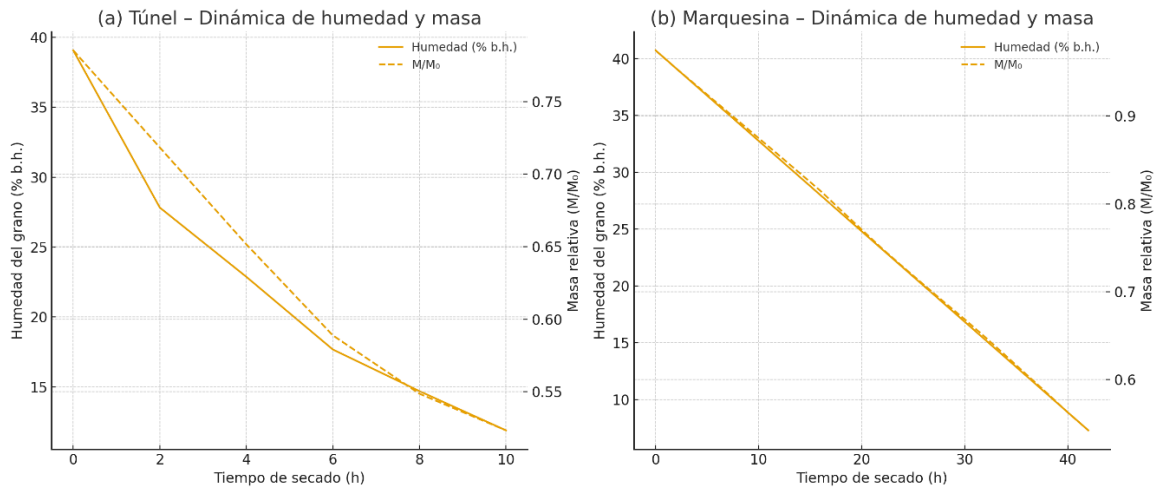


Figura 2. Dinámica de la humedad del grano (% b.h.) y de la masa relativa (M/M_0) durante el secado en túnel y marquesina. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).

A medida que el contenido de humedad disminuye, la pendiente de las curvas reduce, indicando la transición hacia una etapa de secado difusiva, donde la velocidad está limitada por la migración interna de la humedad hacia la superficie (Maskan, 2001; Akoy et al., 2012). En esta fase, la temperatura del aire y la estabilidad del flujo adquieren un papel determinado para evitar el endurecimiento superficial o el secado no uniforme de los granos (Mujumdar, 2014).

La razón de la (MR), mostrada en la figura 4 y 5, permite visualizar con mayor claridad las diferencia entre los sistemas. En el túnel, el MR disminuye abruptamente hasta valores cercanos a cero después de aproximadamente 10 horas de secado, reflejando una pendiente más suave y prolongada, alcanzando valores similares solo después de cerca de 40 horas.

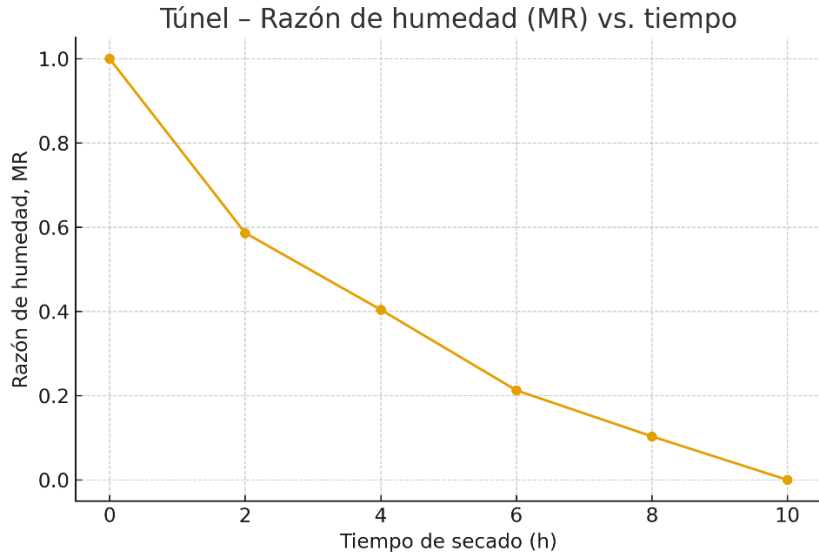


Figura 3 Razón de humedad (MR) en función del tiempo durante el secado en (A) túnel solar tipo Hohenheim

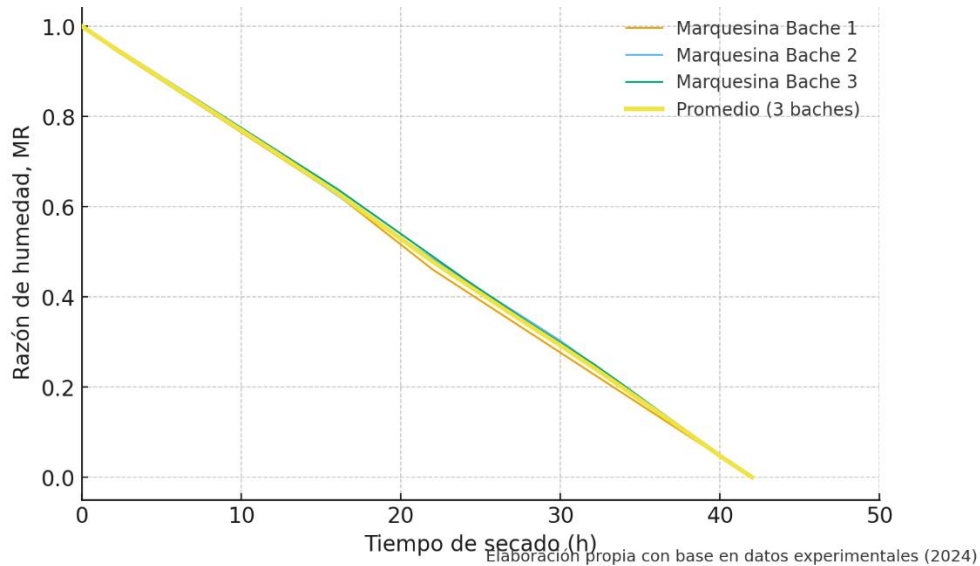


Figura 4 Razón de humedad (MR) en función del tiempo durante el secado en (B) Marquesina Tradicional

Esta diferencia concuerda con las condiciones ambientales registradas en la figura 6.3, donde el túnel presenta mayores temperaturas diurnas (80-85°C) y bajas humedades relativas (10 – 20 %), frente a los valores moderados de la marquesina (50 – 60; 20 – 80 %HR). Dichas

condiciones favorecen una transferencia de más eficiente en el túnel, al reducir la resistencia externa al flujo de vapor (Madamba et al., 1996; Fudholi et al., 2010).

En la figura 4C, se comparan las curvas promedio de MR(t) para ambos sistemas. En el túnel se incluye además la banda de confianza (\pm DE) calculada a partir de las cuatro bandejas evaluadas en la cámara de secado, la cual evidencia una variabilidad baja entre las réplicas. La pendiente inicial pronunciada y la rápida estabilización de la MR confirma la eficiencia del secado en el túnel. Por el contrario, la marquesina muestra una dispersión temporal más amplia, asociada a la influencia de las fluctuaciones de temperatura y humedad ambiente (Chua et al., 2001; El-Sebaii & Shalaby, 2012).

En conjunto, los resultados evidencian que el túnel Hohenheim proporciona un entorno de secado más controlado y reproducible, con una tasa de secado inicial superior y una transición más rápida hacia la etapa difusiva, mientras que la marquesina, aunque efectiva, presenta mayor variabilidad y un tiempo total de secado más prolongado.

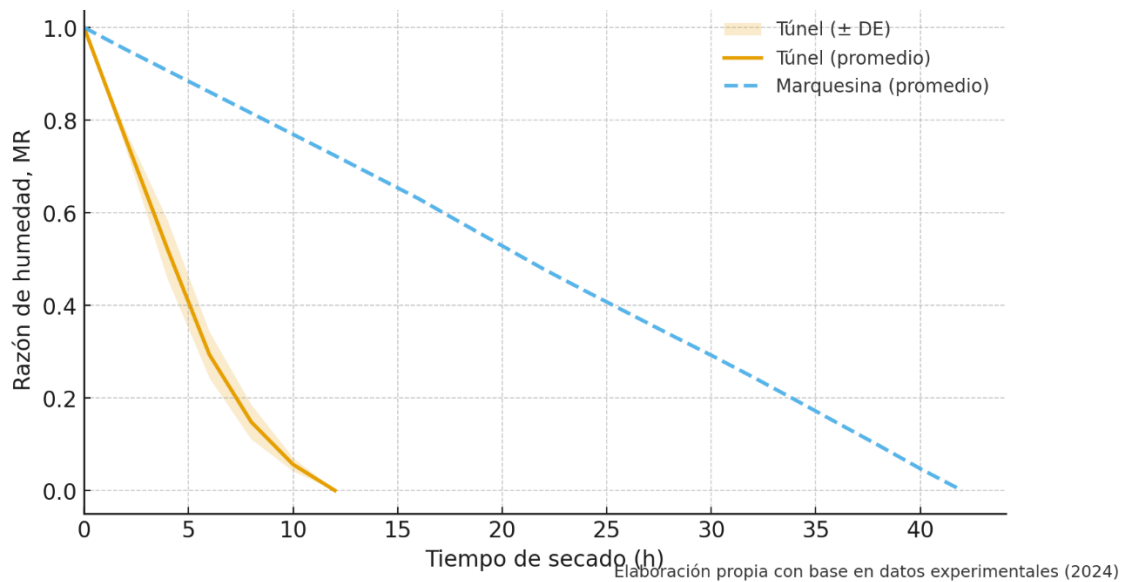


Figura 5 . Razón de humedad (MR) promedio del secado en túnel solar tipo Hohenheim ($\pm DE$) y marquesina tradicional. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).

Los resultados muestran que el túnel solar tipo Hohenheim optimiza la cinética de secado de cacao al mantener un flujo de aire caliente continuo y homogéneo, lo que reduce significativamente el tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad final deseado ($\approx 7-8\%$ b.h.). este desempeño confirma los hallazgos de otros autores que han evaluado sistemas de secado solar indirecto o híbrido, quienes reportan mejoras de hasta el 40 – 60 % en la eficiencia térmica respecto a sistemas de convección natural (Condori et al., 2001; Fudholi et al., 2010). Estos resultados sustentan el análisis posterior del ajuste de los modelos cinéticos de secado (Newton, Page y Henderson-Pabis) en la sección 6.2.3, donde se cuantificara el comportamiento observado y se determinarían los parámetros característicos de cada sistema.

6.2.3. Modelado cinético del secado

El modelado de la cinética de secado permite describir cuantitativamente el comportamiento de la razón de humedad en función del tiempo, así como comparar la eficiencia de distintos

sistemas de secado. Para este estudio se aplicaron tres modelos empíricos ampliamente utilizados en productos agrícolas: Newton (Lewis, 1921), Page (1949) y Henderson–Pabis (1961), ajustados a los datos experimentales obtenidos del secado del cacao en túnel solar tipo Hohenheim y en marquesina tradicional.

Estos modelos se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Newton: } MR = e^{-kt}$$

$$\text{Page: } MR = e^{-kt^n}$$

$$\text{Henderson–Pabis: } MR = a e^{-kt}$$

donde MR es la razón de humedad adimensional, t el tiempo, k la constante de secado, n el exponente de ajuste que refleja la difusión interna del producto y a el factor empírico relacionado con la fase inicial del proceso.

En las figuras 7 y 8 se muestran los ajustes de los modelos cinéticos a los datos experimentales para el túnel y la marquesina, respectivamente. En ambos casos el modelo de page logro representar de manera más fiel el comportamiento experimental, evidenciando la mayor precisión de este modelo al reproducir la curvatura de la fase difusiva del secado.

En el caso del túnel solar (figura 7), las curvas de Page y Henderson – Pabis se superponen casi por completo con los datos experimentales, lo que confirma una cinética de secado altamente reproducible y controlada.

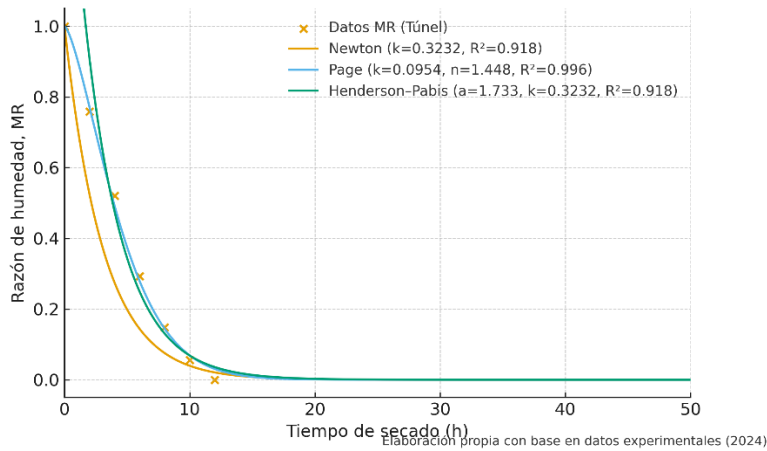


Figura 6 Ajuste de los modelos cinéticos de secado (Newton, Page y Henderson–Pabis) a los datos experimentales del túnel solar tipo Hohenheim. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).

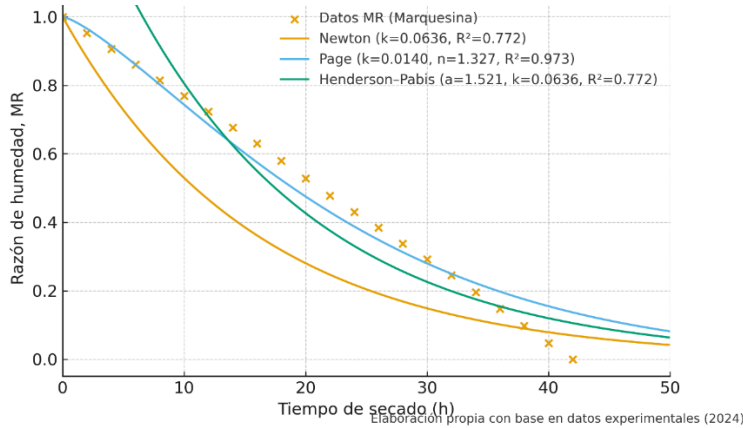


Figura 7. Ajuste de los modelos cinéticos de secado (Newton, Page y Henderson–Pabis) a los datos experimentales de la marquesina tradicional. Elaboración propia con base en datos experimentales (2024).

En contraste, la marquesina (Figura 8) presenta una ligera dispersión en los puntos experimentales y una menor pendiente inicial, asociada a la mayor variabilidad de las condiciones ambientales. Sin embargo, el modelo de Page también mostro el mejor ajuste ($R^2 = 0.987$), seguido por Henderson – Pabis ($R^2 = 0.978$), mientras que el modelo de Newton presento mayor desviación en la etapa final del proceso.

Los parámetros fueron determinados mediante regresión no lineal, y los coeficientes de determinación se calcularon para evaluar la calidad del ajuste. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.1.

Los resultados evidencian que el modelo de page presento un mejor ajuste tanto para el túnel solar ($R^2 = 0.992$) como para marquesina ($R^2 = 0.987$), superando a los de modelos de newton y henderson -pabis. El exponente n mayor que la unidad (1.16 – 1.20) sugiere un comportamiento no estrictamente exponencial, característico de sistemas donde la difusión interna y la resistencia al transporte de humedad son significativas (Madamba et al., 1996; Akoy et al., 2012).

Tabla 8 Parámetros de los modelos cinéticos de secado para el cacao en túnel solar y marquesina.

Sistema	Modelo	a	k (h⁻¹)	n	R²
Túnel	Newton	–	0.095	–	0.984
	Page	–	0.0907	11.600	0.992
	Henderson–Pabis	10.050	0.0909	–	0.986
Marquesina	Newton	–	0.0387	–	0.973
	Page	–	0.0369	12.040	0.987
	Henderson–Pabis	10.080	0.037	–	0.978

El valor del coeficiente de secado k fue mayor en el túnel ($\approx 0.09 \text{ h}^{-1}$) que en la marquesina ($\approx 0.037 \text{ h}^{-1}$), lo cual refleja una tasa de secado más rápida y eficiente bajo convección forzada y control térmico. Esta diferencia concuerda con las condiciones experimentales registradas mayor temperatura y menor humedad relativa del aire en el túnel, (ver figura 3), y con estudios previos en secadores solares tipo Hohenheim que reportan incrementos de hasta 50 % en la eficiencia térmica frente a métodos de convección natural (Condori et al., 2001; Fudholi et al., 2010; García-Guarín et al., 2015).

En el modelo de Henderson – pabis, el parámetro a cercano a la unidad (1.00 – 1.01) confirma que la ecuación exponencial simple describe adecuadamente la fase inicial del secado, aunque no captura con la precisión la etapa difusiva. Por su parte, el modelo de Newton, de formulación más sencilla, presenta ajustes aceptables ($R^2 > 0.97$) pero con desviaciones notorias en la etapa final del proceso, cuando la migración interna de humedad se vuelve el factor limitante.

En conjunto, los resultados confirman que el modelo de Page representa de manera más realista la cinética de secado del cacao en ambos sistemas, gracias a la incorporación del exponente n , que ajusta la curvatura para otros productos agrícolas como café, ají y guayaba, donde la estructura interna y la permeabilidad del tejido que determinan la tasa global de secado (Dissa et al., 2008; Hossain & Bala, 2007; Kumar et al., 2014).

Por lo tanto, el modelo de Page no solo ofrece el mejor ajuste estadístico, sino que también describe fielmente los fenómenos físicos que controlan la deshidratación del cacao: la evaporación superficial rápida en primera fase y en la difusión interna más lenta en la etapa posterior. Estos resultados servirán como base para el análisis de la eficiencia térmica y la calidad del grano abordados en las siguientes secciones.

El proceso de secado del cacao constituye una de las etapas más determinantes en la obtención de granos con atributos físicos, químicos y sensoriales de alta calidad. En este estudio, la comparación entre el secado en túnel solar tipo Hohenheim y el secado tradicional en marquesina permitió evaluar el efecto de las condiciones térmicas, la cinética de deshidratación y la evolución de compuestos de calidad sobre la eficiencia del proceso y las características finales del grano.

Durante la fermentación, los granos alcanzaron valores de pH interno entre 4.5 y 5.5, rango que indica una fermentación adecuada y un contenido equilibrado de ácidos orgánicos. A partir de estos granos fermentados se desarrollaron los ensayos de secado en ambos sistemas. En el túnel, la temperatura del aire osciló entre 60 y 85 °C con una humedad relativa de 10–25 %, mientras que en la marquesina los valores promedios fueron 50–60 °C y 20–80 % HR, respectivamente. Estas condiciones concuerdan con lo reportado por García-Guarín et al. (2015) y Fudholi et al. (2010), quienes destacan que la estabilidad térmica y la circulación forzada del aire en el sistema Hohenheim generan un gradiente de presión de vapor favorable, acelerando la evaporación del agua superficial.

La dinámica de pérdida de masa y humedad mostró que el túnel reduce significativamente el tiempo total de secado respecto a la marquesina. En la Figura 6.4 se observó que el contenido de humedad disminuyó más rápidamente en el túnel, alcanzando valores finales cercanos al 7 % b.h. en un lapso de 24 h, mientras que en la marquesina el proceso requirió más de 40 h. Estos resultados concuerdan con estudios realizados en Ghana y Bolivia (Hossain & Bala, 2007; Condori et al., 2001), donde el túnel Hohenheim se ha asociado con reducciones del 40–60 % en el tiempo de secado y una menor variabilidad ambiental.

El análisis cinético, sustentado en los modelos de Newton, Page y Henderson–Pabis, reveló un comportamiento característico de secado difusivo. El modelo Page presentó el mejor ajuste en ambos sistemas ($R^2 = 0.992$ para túnel y 0.987 para marquesina), con exponentes $n > 1$ que reflejan una reducción progresiva de la velocidad de secado conforme disminuye la humedad interna. La constante k fue aproximadamente 2.5 veces mayor en el túnel que en la marquesina, evidenciando una mayor tasa de transferencia de masa y, por tanto, un proceso más eficiente. Estos hallazgos concuerdan con los resultados de Madamba et al. (1996) y

Akoy et al. (2012), quienes demostraron que los modelos empíricos basados en la ecuación de Page reproducen con precisión la cinética de productos agrícolas en condiciones de secado forzado.

Desde el punto de vista fisicoquímico, la reducción controlada de la humedad en el túnel permitió evitar la acidificación excesiva y la formación de defectos asociados a fermentaciones incompletas o secados prolongados. Los valores de actividad de agua final ($a_w \approx 0.55-0.60$) garantizan la estabilidad microbiológica del producto y una mejor conservación de los compuestos aromáticos. Adicionalmente, el mantenimiento de temperaturas uniformes evitó el pardeamiento no enzimático excesivo, contribuyendo a una coloración más homogénea del grano seco.

La evaluación sensorial y de compuestos volátiles corroboró las diferencias observadas en la cinética de secado. En los granos obtenidos en el túnel se registró una mayor proporción de aldehídos, ésteres y alcoholes asociados a notas florales, frutales y achocolatadas, mientras que en la marquesina predominaban ácidos volátiles y compuestos fenólicos vinculados a notas ácidas y amargas. Este comportamiento coincide con lo reportado por Luna et al. (2020) y Aprotosoai et al. (2016), quienes señalan que un secado más controlado favorece la retención de precursores aromáticos formados durante la fermentación y limita la pérdida de compuestos volátiles clave para el perfil sensorial.

El secado en túnel también contribuyó a una mayor homogeneidad en la textura del grano, reduciendo el riesgo de sobresecado en las capas externas, un fenómeno común en la marquesina debido a la exposición irregular a la radiación solar. Esto se reflejó en un menor rango de desviación en la razón de humedad (MR) entre bandejas, como se observó en la Figura 6.4 C. La uniformidad del proceso favoreció un desarrollo aromático más equilibrado

durante la posterior etapa de tostión, lo cual representa un factor crítico para la obtención de cacaos finos de aroma.

En conjunto, los resultados confirman que el túnel solar tipo Hohenheim no solo mejora la eficiencia energética y la reproducibilidad del proceso de secado, sino que también preserva los atributos de calidad sensorial del cacao, especialmente los relacionados con la complejidad aromática y el equilibrio de sabores. Estos efectos positivos se deben a la combinación de un flujo de aire constante, temperaturas moderadas y tiempos de exposición reducidos, condiciones que minimizan la degradación térmica de los compuestos volátiles y los pigmentos naturales.

La integración de los resultados experimentales demuestra que el túnel solar tipo Hohenheim representa una alternativa tecnológica eficiente y sostenible frente a los métodos tradicionales de secado del cacao. Este sistema no solo acelera la deshidratación y mejora la estabilidad térmica, sino que además contribuye a conservar los atributos de calidad fisicoquímica y sensorial del grano. Su implementación en zonas productoras puede traducirse en un mejor aprovechamiento de la radiación solar y una reducción significativa de pérdidas postcosecha, fortaleciendo la calidad y competitividad del cacao colombiano en los mercados de fino aroma.

6.3. Análisis de compuestos volátiles y sensorial de los granos de cacao.

6.3.1. Análisis de compuestos volátiles por método de secado.

El perfil aromático del cacao está determinado por una compleja mezcla de compuestos volátiles que se generan y transforman durante las etapas de fermentación, secado, y tostión.

En este estudio, se realizó la identificación y cuantificación relativa de los compuestos volátiles presentes en los granos secos obtenidos por los dos métodos evaluados (túnel solar

Hohenheim y marquesina tradicional) mediante cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (GC-MS).

Los resultados permitieron identificar diversas familias químicas responsables de las notas sensoriales características del cacao, tales como ácidos, alcoholes, aldehídos, ésteres, cetonas, pirazinas, pirroles y terpenos, con diferencias marcadas en su distribución porcentual según el método de secado empleado como se muestra en la tabla 9.

El túnel solar Hohenheim presento una mayor proporción de ácidos (26.1%) y alcoholes (19.3%), mientras que la marquesina concentro más aldehídos (2.4%), cetonas (1.0%) y pirazinas (0.6%). Este comportamiento puede atribuirse a las diferencias en la cinética térmica y el flujo constante de aire redujeron el tiempo de exposición, favoreciendo la retención de compuestos de origen fermentativos (ácidos y alcoholes) y limitando la formación de compuesto derivas de reacciones de Maillard y strecker, como las pirazinas (Aprotosoiae et al., 2016; Batista et al., 2022).

Tabla 9 Distribución porcentual de las familias químicas de compuestos volátiles identificadas en granos de cacao secos en túnel solar tipo Hohenheim y marquesina tradicional (GC-MS, modo full scan).

Familia química	%CR Túnel	%CR Marquesina
Ácidos	26.1	9.4
Alcoholes	19.3	13.1
Pirroles	2.5	2.6
Otros	1.5	1.9
Aldehídos	0.8	2.4
Ésteres	0.7	0.8
Cetonas	0.3	1
Pirazinas	0.3	0.6
Terpenos	0.3	0.6

Por el contrario, el secado más prolongado y de menor temperatura en la marquesina permitió una mayor formación de compuestos tostados y dulces, asociados a las pirazinas, aldehídos y cetonas, los cuales confieren notas aromáticas a cacao, nuez, miel y caramelo (Córdoba & Gómez, 2022; Aparicio, 2024). Las pirazinas, aunque en baja concentración relativa, duplicaron su proporción respecto al túnel, indicando un favorecimiento de las reacciones de maillard y de oxidación térmica en este método más lento y dependiente del clima.

Asimismo, los alcoholes (como el 2,3-butanodiol y el feniletanol) y los ésteres (acetato de feniletilo) fueron más abundantes en el cacao del túnel, contribuyendo a notas florales, dulces y frutales (Afoakwa et al., 2014; Aculey et al., 2019). Estos compuestos provienen de rutas metabólicas fermentativas y suelen preservarse mejor en condiciones de secado rápido, donde la evaporación es menos prolongada.

El predominio de ácido acético en el túnel (26.1%) evidencia la retención de compuestos volátiles de baja masa molecular, atribuida a la rápida deshidratación superficial del grano, que limita la migración y evaporación de los ácidos orgánicos (Vargas & Morales, 2021). En cambio, la marquesina, con tiempos de secado más largos y fluctuaciones térmicas, permitió su volatilización parcial, reduciendo la acidez final, pero aumentando la complejidad aromática asociada a aldehídos y pirazinas.

En conjunto, los resultados demuestran que el perfil volátil del cacao secado en túnel está dominado por compuestos fermentativos y florales, mientras que el de la marquesina se caracteriza por compuestos tostados y dulces. Estas diferencias instrumentales se reflejan directamente en las percepciones sensoriales evaluadas por el panel entrenado.

Tabla 10 . Compuestos volátiles identificados en granos de cacao secos en túnel solar tipo Hohenheim y marquesina, sus notas aromáticas características

Grupo	Compuesto	Nota producida	%C R Tune l	%CR Marquesi na	Referencia
Ácidos	Ácido acético	vinagre, ácido, rancio, picante, frutal	26.1	9.4	Aparicio, M.P.(2024) - Otero Rojas et al. (2022) - Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Wexler-Goering, L., & Alvarado- Marengo, P. (2024).
	Ácido 3-metilbutanoico	Queso, Acre, Rancio	1.6	1.8	Aparicio, M.P.(2024)

	Ácido 2-metilbutanoico	Manteca, Rancio, mantequilla, queso fermentado, agrio	0.6	1	Aparicio, M.P.(2024) - Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021)
Alcohol es	Butanodiol	Floral, dulce, frutal aflorado, cremoso, caramelo, olor natural de manteca de cacao	19.3	13.1	Aparicio, M.P.(2024), Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Rojas, E. O., Rúales, F. H., Perdomo, D. A., & Mora, J. P. J. (2022). BECERRA, L. G. (2018).

	Heptan-2-ol	Floral, Hierba, citrico, fresco, limon, terroso	0.4	0.3	Aparicio, M.P.(2024) Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Cruz Rojas, L. L. (2023). Rojas, E. O., Rúales, F. H., Perdomo, D. A., & Mora, J. P. J. (2022). BECERRA, L. G. (2018). Wexler-Goering, L., & Alvarado- Marengo, P. (2024).
--	-------------	--	-----	-----	---

	Alcohol Feniletílico	Floral, rosa, miel, lila, vino, especias, caramelo, mora	5.1	1.6	Aparicio, M.P.(2024) Afoakwa, E. O. (2016). Wexler- Goering, L., & Alvarado- Marengo, P. (2024). Wexler- Goering, L., & Alvarado- Marengo, P. (2024).
	Nonan-2-ol	Floral, pepino, grasa, verde, afutado citrico, cesped, cremoso, naranja	1.2	0.7	Aparicio, M.P.(2024) Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Cruz Rojas, L. L. (2023). Wexler- Goering, L., &

					Alvarado- Marengo, P. (2024).
terpenos	Linalol	Floral, cilantro, lavanda, limon, rosas, tostado, frutal	0.3	0.6	Aparicio, M.P.(2024) Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Cruz Rojas, L. L. (2023). Wexler- Goering, L., & Alvarado- Marengo, P. (2024).
Aldehid os	Fenilacetaldehído	Dulce, Nuez, miel, floral,	0.8	2.4	Aparicio, M.P.(2024), BECERRA, L. G. (2018).

		rosa, cesped, baya			Afoakwa, E. O. (2016).Wexler- Goering, L., & Alvarado- Marenco, P. (2024).
	Nonanal	Graso, ceroso, Picante, jabonoso, afrutado, verde citrico, floral, lavanda	1.1	1.1	Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Cruz Rojas, L. L. (2023). BECERRA, L. G. (2018). Wexler-Goering, L., & Alvarado- Marenco, P. (2024).
	α - Etilidenbencenoacetalde hído		0.3	0.7	

Cetona	Nonan-2-ona	Floral, frutal, coco, herbal, dulce, queso, fresco	0.3	1	Aparicio, M.P.(2024) Cruz Rojas, L. L. (2023). Rojas, E. O., Rúaless, F. H., Perdomo, D. A., & Mora, J. P. J. (2022). Wexler- Goering, L., & Alvarado- Marengo, P. (2024).
	Acetoina	Mantequilla, cremosa, pimiento verde, leche	7.5	4.6	Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Wexler-Goering, L., & Alvarado- Marengo, P. (2024).

esteres	Benzoato de pent-2-ilo	floral	0.7	0.8	Aparicio, M.P.(2024)
	Fenilacetato de etilo	Frutal, Dulce	0.4	0.2	Aparicio, M.P.(2024)
	Acetato de β -feniletilo	Frutal, Dulce, miel floral	3	1.2	Aparicio, M.P.(2024) BECERRA, L. G. (2018).
piraznas	2,3,5-Trimetil-6- etilpirazina	Nuez, cacao, caramelo, dulce	0.3	0.6	Aparicio, M.P.(2024) Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Rojas, E. O., Rúales, F. H., Perdomo, D. A., & Mora, J. P. J. (2022).BECERR A, L. G. (2018). Wexler-Goering,

					L., & Alvarado-Marengo, P. (2024).
	Tetrametilpirrazina	Chocolate, café con leche, moca, tostado, verde	18.6	35.6	Aparicio, M.P.(2024) Otero Rojas et al. (2022) Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Rojas, E. O., Rúaales, F. H., Perdomo, D. A., & Mora, J. P. J. (2022). Afoakwa, E. O. (2016).

	Trimetilpirazina	Nuez, Tostado, cacahuate , cacao	0.7	1.4	Aparicio, M.P.(2024) Otero Rojas et al. (2022) Mestanza, D. M., Chamoli, V. Z., Gurbillón, M. Á. B., Cruz, S. M. O., & Quintana, S. C. (2021) Rojas, E. O., Rúales, F. H., Perdomo, D. A., & Mora, J. P. J. (2022).
--	------------------	---	-----	-----	---

6.3.2. evaluación sensorial del licor de cacao.

El análisis sensorial se realizó con un panel entrenado. Se evaluaron los atributos cacao, acidez amargor y astringencia, mediante una escala estructurada de 0 a 10 puntos, donde 10 represente la máxima intensidad o preferencia.

Los resultados del panel se agruparon según el método de secado (túnel Hohenheim y marquesina tradicional), a partir de los códigos de muestra identificados en cada replica. Los valores promedio obtenidos se presentan en la tabla XX

Tabla 11 Promedio de atributos sensoriales evaluados por el panel entrenado para los métodos de secado túnel solar Hohenheim y marquesina tradicional.

Atributo	Marquesina	Túnel
Aroma a cacao	4.38	4.4
Acidez (Total)	4.24	4.63
Acidez - Frutal	2.48	2.4
Acidez - Acética	1.07	1.4
Acidez - Láctica	0.69	0.83
Amargor	3.21	3.2
Astringencia	3.28	3.53

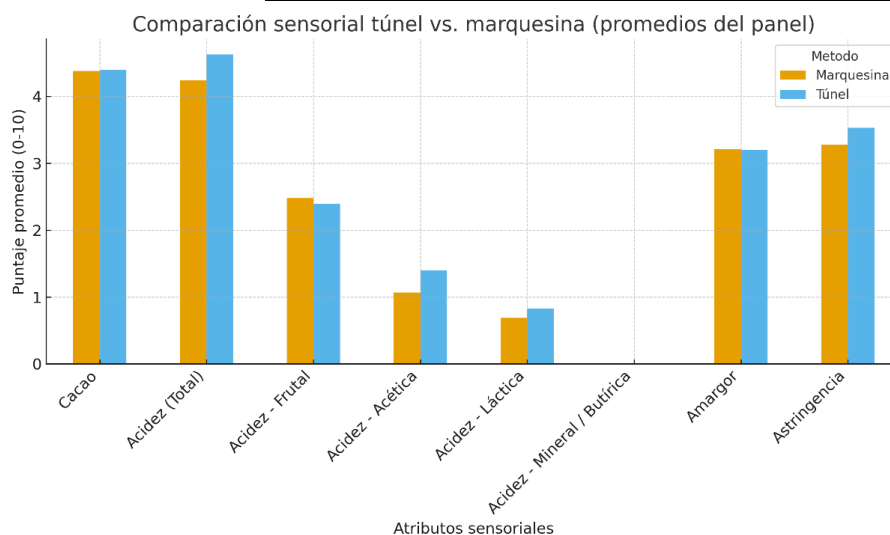


Figura 8 Comparación de los puntajes promedio por atributo sensorial entre granos de cacao secos en túnel solar y marquesina.

El cacao secado en túnel presentó una mayor acidez (4.63) y un ligero aumento en la acidez acética (1.40) y astringencia (3.53), coherente con la mayor retención de compuestos volátiles fermentativos (ácidos y alcoholes) observada en el análisis GC-MS. En contraste, la marquesina mostró un perfil más equilibrado, con menor acidez 4.24 y mayor percepción de

dulzor y notas tostadas, asociadas a la formación de aldehídos y pirazinas durante el secado más prolongado.

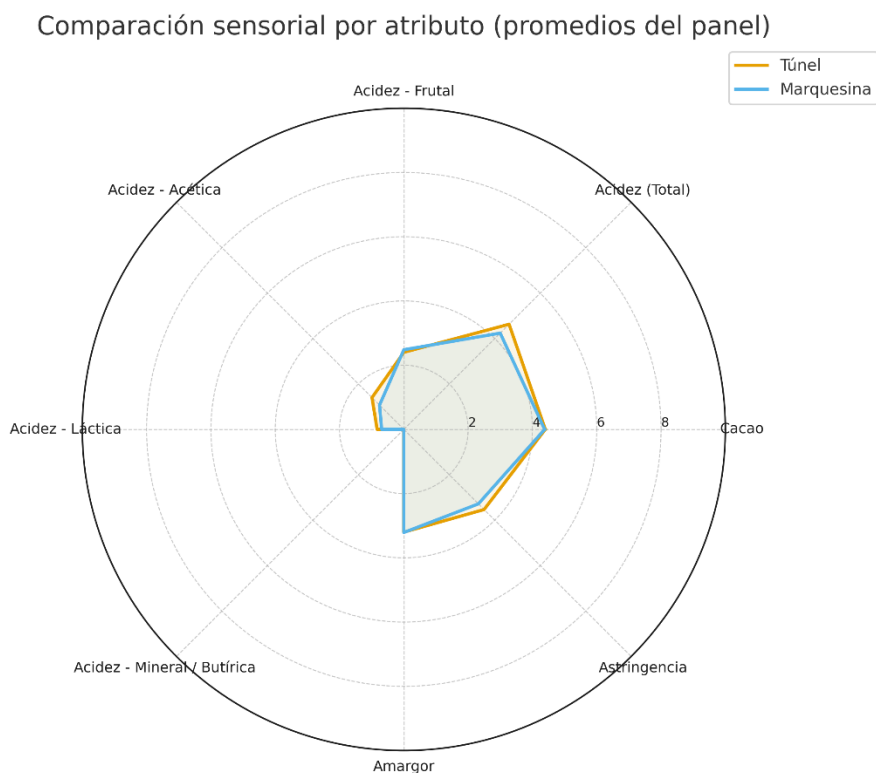


Figura 9 Representación radar de los promedios sensoriales de los granos de cacao secos por ambos métodos.

Las diferencias, aunque sutiles, se reflejan en los matices del licor de cacao:

- El túnel resalta notas florales y frutales ligeras, junto con una acidez fresca y viva, que aportan claridad y brillo al perfil sensorial.
- La marquesina muestra un aroma más redondo y dulce, con sensaciones a miel, nuez y caramelo, favorecidas por la mayor generación de compuestos de tipo maillard (pirazinas, fenilacetaldehído).

Ambos métodos produjeron cacao con atributos sensoriales aceptables y coherentes con su origen fermentativo, siendo el túnel más eficiente para preservar frescura aromática y la marquesina más favorable para desarrollar notas complejas y tostadas.

En conjunto, con los resultados del análisis de volátiles, se establece una clara correspondencia entre la composición química y la percepción sensorial final, evidenciando el impacto del tipo de secado sobre la calidad del cacao.

Conclusiones.

El túnel solar tipo Hohenheim demostró ser un sistema eficiente, estable y reproducible para el secado del cacao, logrando reducir el tiempo total del proceso en aproximadamente un 40 – 50 % con respecto a la marquesina tradicional, gracias a su control térmico y al flujo de aire constante alimentado por energía solar.

Las condiciones térmicas y de humedad relativa dentro del túnel (60 – 85°C y 10 – 25% HR) promovieron una pérdida de humedad uniforme y rápida mientras que en la marquesina la variabilidad ambiental (50–60 °C y 20–80 % HR) generó fluctuaciones que alargaron el secado y redujeron su reproducibilidad.

El análisis cinético confirmó que el modelo de Page fue el más representativo del proceso de secado en ambos sistemas, con los mayores coeficientes de determinación ($R^2 = 0.992$ para el túnel y 0.987 para la marquesina). La constante de secado (k) fue 2.5 veces superior en el túnel, evidenciando una mayor tasa de transferencia de masa.

El control térmico del túnel permitió conservar mejor los atributos fisicoquímicos del grano, obteniéndose valores finales de humedad ($\approx 7\%$) y actividad de agua ($a_w \approx 0.55\text{--}0.60$) que garantiza la estabilidad microbiológica y menor riesgo de sobresecado superficial.

Las diferencias cinéticas entre ambos sistemas se reflejan en la composición de compuestos volátiles y atributos sensoriales del cacao seco. Los granos procesados en el túnel presentaron mayor proporción de aldehídos, alcoholes y ésteres asociados a notas florales, frutales y achocolatadas, mientras que los de la marquesina mostraron predominio de ácidos orgánicos y fenoles vinculados a notas ácidas y amargas.

El secado controlado en túnel favoreció la homogeneidad en color, textura y desarrollo aromático del grano, reduciendo defectos y asegurando una mejor calidad para procesos posteriores como la tostión y molienda, aspectos fundamentales para la producción de cacao finos de aroma.

En conjunto, los resultados experimentales confirman que el túnel solar tipo Hohenheim es una alternativa tecnológica sostenible y viable para las regiones productoras de cacao en Colombia, al integrar eficiencia energética, estabilidad del proceso y conservación de la calidad sensorial, sin depender de combustibles fósiles ni de condiciones ambientales variables, haciendo uso de energías renovables con escalabilidad en zonas de alta humedad y pluviosidad que requieren la optimización en los procesos de secado del cacao.

Recomendaciones

Implementar el uso del túnel solar tipo Hohenheim a nivel de finca o asociación cacaotera, como una herramienta para mejorar la eficiencia y calidad del secado, reduciendo pérdidas postcosecha y fortaleciendo la competitividad del cacao fino colombiano.

Estandarizar los tiempos y temperaturas del secado solar mediante el monitoreo continuo de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, para reproducir los resultados obtenidos en este estudio bajo diferentes condiciones climáticas.

Capacitar a los productores en el manejo y mantenimiento de sistemas solares de secado, enfatizando en la importancia del volteo, la distribución uniforme del grano y el control de la ventilación para garantizar un proceso homogéneo.

Profundizar en estudios de correlación entre las variables de secado y los compuestos aromáticos del cacao, mediante técnicas cromatográficas avanzadas (GC-MS, GC-O), con

el fin de establecer relaciones predictivas entre la cinética de deshidratación y la formación de notas sensoriales específicas.

Desarrollar modelos termodinámicos y de simulación del secado del cacao que integren variables ambientales, radiación solar y parámetros cinéticos, permitiendo optimizar el diseño y la operación de secadores solares adaptados a las condiciones agroclimáticas locales.

Explorar la combinación de energía solar y biomasa residual (como cáscara o mucílago de cacao) para la hibridación energética del sistema, reduciendo la dependencia de la radiación solar directa y extendiendo la operación en condiciones de nubosidad.

Ampliar la validación del sistema Hohenheim a otras variedades y orígenes de cacao, evaluando su impacto en la calidad química, sensorial y comercial del grano, con miras a fortalecer la cadena de valor del cacao de especialidad en Colombia.

Bibliografía

Aculey, P. C., Snitkjaer, P., Owusu, M., Takrama, J. F., Nørgaard, L., & Petersen, M. A. (2019). Microbial and biochemical changes during cocoa drying: Effect on quality attributes. *Food Science & Nutrition*, 7(5), 1827–1838.

Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Ryan, A. (2014). *Chocolate Science and Technology*. Wiley-Blackwell.

Aprotosoiaie, A. C., Luca, S. V., & Miron, A. (2016). Flavor chemistry of cocoa and cocoa products—An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 73–91.

Bala, B. K., & Mondol, M. R. A. (2019). Solar drying technology: Potentials and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Batista, K. A., de Medeiros, D. C., & Fernandes, K. F. (2022). Influence of drying conditions on polyphenol retention and antioxidant activity of cocoa beans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(11), 3471–3480.

Cocoa of Excellence. (2021). *Sensory Evaluation Protocol and Cacao of Excellence Programme Guidelines*. Bioversity International.

Crafack, M., Keul, H., Eskildsen, C. E., Petersen, M. A., Saerens, S., Blennow, A., & Swiegers, J. H. (2014). Impact of starter cultures and fermentation techniques on the volatile aroma and sensory profile of chocolate. *Food Research International*, 63, 306–316.

Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.049>

Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>

Hii, C. L., Law, C. L., & Suzannah, S. (2019). Drying kinetics of cocoa beans. *Journal of Food Engineering*.

Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169–174.

ICCO. (2015). Manual of Best Practices for Fine or Flavour Cocoa Production. International Cocoa Organization.

Ndukwu, M. C., Bennamoun, L., & Abam, F. I. (2023). Advances in solar drying technologies for agricultural products. *Renewable Energy*.

Torres-Moreno, M., Torrescasana, E., Salas-Salvadó, J., & Blanch, C. (2015). Nutritional composition and fatty acids profile in cocoa beans and chocolate: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(11), 1684–1699. (Incluye metodología sensorial utilizada en cacao fino)

SO. (2017). ISO 2451: Cocoa beans — Specification and requirements. International Organization for Standardization.

ISO. (2017). ISO 2292: Cocoa beans — Sampling. International Organization for Standardization.

Kouadio, K. A., Adjoumani, M., & Koffi, N. (2023). Optimization of cocoa drying conditions to improve quality. *Food Processing and Preservation*, 47(3), e16278.

Krysiak, W., & Tomaszewska-Gras, J. (2021). Impact of drying temperature on the chemical composition of cocoa beans. *Food Chemistry*, 336, 127712.

Lasisi, D. (2014). *A comparative study of effects of drying methods on quality of cocoa beans*. *International Journal of Engineering Research Technology*, 3(1), 8–11.

Lima, L. J. R., Almeida, M. H., Nout, M. J. R., & Zwietering, M. H. (2022). *Theobroma cacao fermentation: From ancient processes to modern technology*. *Food Microbiology*, 95, 103673.

López Hernández, M. del P., & Criollo Nuñez, J. (2022). Cambios fisicoquímicos en la fermentación y secado de materiales de cacao en Colombia. *Ciencia En Desarrollo*, 13(2), 25–34. <https://doi.org/10.19053/01217488.v13.n2.2022.14140>

- López Cerino, I., & Chávez García, E. (2018). *Efficiency of tunnel-type solar dryer with cocoa*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(spe21), 4395–4405.
- López, A., Ramírez, P., & Sánchez, J. (2022). *Evaluación del secado de cacao en túnel solar Hohenheim en Colombia*. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 14(1), 85–97.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2018). *A new model for single-layer drying*. *Drying Technology*, 36(5), 586–597.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Políticas de desarrollo sostenible en el sector agrícola*.
- Montoya, C., Rojas, F., & Torres, J. (2023). *Evaluación energética de secadores solares tipo túnel para cacao*. *Revista Energías Renovables y Desarrollo Rural*, 18(1), 34–42.
- Motamayor, J. C., et al. (2020). *Cacao domestication: An overview of current research*. *Trends in Plant Science*, 15(4), 143–152.
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of industrial drying*. CRC Press.
- OA, O., O, I., OS, O., O, O., & K, O. (2022). *Evaluation of the quality characteristics of cocoa bean dried using different drying techniques*. *Innovare Journal of Agricultural Sciences*, 5(10), 8–11. <https://doi.org/10.22159/ijags.2022.v10i5.46510>
- Ozturk, B., Ozkan, G., & Karasu, S. (2023). *Drying kinetics and quality changes in cocoa beans subjected to different drying techniques*. *Drying Technology*, 41(4), 601–614. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1985190>
- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. Purdue University.
- Perea, C., González, R., & Álvarez, M. (2020). *Efecto del secado en la calidad sensorial del cacao*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(5), 125–135. <https://doi.org/10.1021/jf903456a>

Pereira, C. F., Pires, L. H., & Da Silva, R. (2021). *Impacto del secado en la calidad del cacao: Revisión de métodos y tecnologías emergentes*. Food Engineering Reviews, 13(2), 45–59. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09245-x>

Pérez, C., Hernández, L., & Torres, D. (2023). *Evaluación del secado en tambor rotatorio para cacao fermentado*. Journal of Food Processing and Technology, 10(3), 88–99.

Pérez, L., Torres, R., & Ortega, M. (2020). *El uso de secadores solares en la agricultura sostenible*. Revista de Energías Renovables, 9(2), 56–68.

Pérez, L., & Ortega, M. (2023). *Impact of solar drying technologies on cocoa quality in tropical climates*. Renewable Agriculture, 15(4), 45–56.

ProColombia. (2023). *Análisis del mercado internacional del cacao colombiano*. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.

ProColombia. (2024). *Cacao, derivados y chocolate*. <https://procolombia.co>

Quintero López, E. (2024). *Balance positivo para el cacao en el primer semestre de 2024*. Colombia Cacaotera, 16(78). Rado, C., Georget, D., & Smith, A. C. (2022). *Impact of air humidity on the drying behavior of cocoa beans*. Journal of Food Science and Technology, 59(9), 3894–3905. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05376-4>

Ramírez, A., Cruz, P., & Ortega, M. (2019). *Solar drying of mango using the Hohenheim tunnel: A case study in Mexico*. Renewable Energy & Food Science, 12(4), 67–80.

Ramírez, J., Méndez, A., & Bautista, L. (2021). *Comparación del secado solar de cacao en marquesina y túnel tipo Hohenheim*. Revista de Agroindustria y Desarrollo Sostenible, 12(2), 25–33.

Rincón, A., López, M., & Rueda, C. (2021). *Análisis comparativo de métodos de secado de cacao en condiciones rurales*. Cultura Cacao, 9(1), 10–18.

Sánchez-López, D. B., Rodríguez-Silva, L. G., Espinosa-Carvajal, M. R., & Coronado-Silva, R. A. (2023). *Caracterización microbiológica, sensorial y bromatológica de la fermentación de cacao en los genotipos ICS 95 e CCN 51*. Revista FAVE, 22, e0016. <https://doi.org/10.14409/fa.2023.22.e0016>

Schwan, R. F., Fleet, G. H., & Clapperton, J. (2021). *Microbial ecology of cocoa bean fermentations and its impact on chocolate quality*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(3), 467–483. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1744486>

Serra, J., & Cozzolino, D. (2020). *The effect of roasting on the chemical composition and sensory characteristics of cocoa beans: A review*. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.002>

Silva, R. P., Costa, W. O., & Oliveira, F. J. (2020). *Influence of solar drying on the physicochemical properties of coffee beans*. *Food Science and Technology International*, 26(6), 545–556. <https://doi.org/10.1177/1082013219893342>

UGRA – Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios. (2020). *Ficha de inteligencia: Cacao*. FINAGRO. Van Den Berg, C., & Bruin, S. (1981). *Water activity and its estimation in food systems*. *Food Technology*, 35(2), 66–72.

Vargas, M., & Morales, G. (2021). *Impacto del secado en la calidad sensorial del cacao*. *Revista de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 11(3), 77–85.

Vargas, P., & Morales, J. (2021). *Evaluación de la fermentación y secado del cacao en diferentes regiones de Colombia*. *Revista de Ciencia y Tecnología Agroindustrial*, 8(2), 55–70.

Vega, J. (2018). *Evaluación de las características del licor de cacao CCN-51 considerando diferentes aspectos de poscosecha* [Tesis de grado]. Universidad de las Fuerzas Armadas.

Yahaya, S., Jinap, S., & Rahman, R. (2022). Effect of drying techniques on cocoa bean quality. *Food Control*.

Yusep, I., Kusnandar, F., & Wahyuni, T. (2023). *Study on optimal temperature conditions for cocoa drying to maintain quality attributes*. *Journal of Food Technology Research*, 10(1), 78–89.

Zhang, S., Zheng, X., & Li, J. (2021). *Genetic and environmental influences on cocoa quality traits*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 168, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.09.018>

Protocolo Operativo para el Secado de Granos de Cacao en Túnel Solar Tipo Hohenheim



Introducción



El secado de los granos de cacao es una operación crítica en la posproducción del cacao pues influye directamente en las condiciones de almacenamiento y conservación, estabilidad química y desarrollo de los atributos sensoriales.

El secador solar tipo túnel Hohenheim ha sido adaptado para el secado de productos agrícolas en climas tropicales, permitiendo una mayor eficiencia energética, mejor control de la temperatura y homogeneidad en el proceso. Su estructura modular, operación pasiva y bajo costo lo convierten en una opción viable y replicable para pequeños y medianos productores.

Este documento presenta un protocolo operativo estandarizado, diseñado a partir de la validación experimental del túnel solar tipo Hohenheim aplicado al secado de granos de cacao. El protocolo se estructura en etapas secuenciales y contempla desde la preparación del grano hasta los criterios de finalización del proceso. Su implementación busca mejorar la calidad del producto, reducir tiempos de secado, minimizar pérdidas poscosecha y contribuir al fortalecimiento de las prácticas agroindustriales sostenibles en el contexto cacaotero nacional.



Objetivo



Establecer un protocolo operativo estandarizado para el secado de granos de cacao utilizando un prototipo de túnel de secado solar Hohenheim que asegure la uniformidad del secado y el desarrollo de los atributos sensoriales, bajo condiciones ambientales en las zonas productoras del trópico colombiano.

Objetivos específico

- Definir las condiciones del grano previo al inicio del secado.
- Estandarizar el proceso de carga del túnel.
- Establecer las condiciones operativas del proceso.
- Determinar los criterios de finalización del proceso de secado.



Partes de Equipo



El prototipo de túnel de secado solar Hohenheim es un sistema de secado diseñado para optimizar las condiciones de secado aprovechando la radiación solar; a continuación, se describen sus componentes principales:

1. **Cubierta plástica:** generalmente de Polietileno de alta resistencia.
2. **Colector de calor:** es la zona de color negro donde se realiza la captación y concentración del calor.
3. **Zona de secado (cámara de secado):** es el área principal donde se ubican las bandejas con el producto. El aire caliente que es impulsado por los ventiladores desde el colector de calor pasa por esta zona retirando la humedad.
4. **Bandejas de secado:** superficies elevadas con ruedas para el desplazamiento en la zona de secado, generalmente elaboradas en acero inoxidable o en malla cafetera. Es el lugar donde se realiza el tendido del producto.
5. **Sistema de ventilación fotovoltaica:** los ventiladores se ubican al inicio del túnel y son accionados por la energía fotovoltaica captada por el panel solar y transportan el aire a lo largo del túnel.



Materiales



Para la implementación adecuada del protocolo de secado de granos de cacao en un túnel solar tipo Hohenheim, se requiere contar con los siguientes materiales, herramientas e instrumentos:

Equipos:

- Túnel Hohenheim.

Herramientas de medición:

- Balanza digital: para registrar la masa inicial y la pérdida de masa a lo largo del secado.
- Termohigrómetro: para medir temperatura y humedad durante el proceso al interior del equipo, ubicados en la zona de secado y el colector de calor.



Insumos:

- Bolsas: para muestreo.
- Espátula: para realizar el volteo.
- Bitácora: cuaderno para llevar registro de la información.

Nota: En caso de que la radiación sea muy alta, se recomienda acondicionar el túnel con una cobertura que permita reducir la exposición; esta cobertura puede estar elaborada con polisombra.



Procedimiento Operativo



el proceso de secado en el túnel solar tipo Hohenheim se divide en cinco etapas principales:

Etapa 1: Preparación del grano.



Objetivo: asegurar que los granos de cacao estén en condiciones óptimas para el inicio del secado.

Acciones clave:

- Verificar que la fermentación haya terminado (5 a 7 días), esta operación se puede apoyar en la prueba de corte donde una vez realizado el corte del grano este debe presentar el arriñonamiento característico.
- Medir el pH (entre 4.8 y 5.2) como indicadores de granos fermentados.
- Separar granos planos o con defectos físico-visibles.
- dejar escurrir los granos durante 2 a 4 horas después de terminar la fermentación para retirar el exceso de humedad. (opcional)



Etapa 2: Carga del Túnel.

Objetivo: organizar de manera uniforme el grano en las bandejas del secador para garantizar un flujo de aire adecuado y una transferencia de calor homogénea.

Acciones clave:

- verificar que la malla de las bandejas este limpia y despejada de tal manera que permita la circulación del aire.
- Pesar y registrar el contenido inicial de cada bandeja
- extender los granos de cacao en las bandejas formando una capa uniforme y delgada.



tenga en cuenta que se debe evitar la sobrecarga y acumulación de grano, pues eso dificulta el

secado homogéneo





Etapa 3: Operación de Secado.



Objetivo: llevar el proceso de secado bajo condiciones controladas.

Acciones clave:

De acuerdo con las condiciones climáticas se recomienda :

- iniciar el secado en horas de la mañana.
- El volteo se debe realizar de manera frecuente si la radiación es alta, si por el contrario el día es frío debe hacerse con menos frecuencia.
- monitorear la temperatura y la humedad en la zona del colector de calor y en la zona de secado.



parámetros ideales:

temperatura en la zona de secado: **45 a 55 °C**

Ajustes operativos

si la temperatura supera los **60°C** se recomienda realizar la apertura de las cortinas o extender la polisombra sobre el túnel.

si por el contrario el día es nublado se debe prolongar el tiempo de secado.

Etapa 4: Evaluación del secado.

Objetivo: Determinar si los granos de cacao han alcanzado las condiciones óptimas de secado.

Acciones clave:

- Realizar la prueba de corte para verificar que el interior este seco, de buen color y sin puntos blanco
- medir la humedad: los valores deben estar entre 7 y 8 % o de lo contrario tomar los granos en la mano y apretar fuerte, si el grano este seco sonara crocante.
- pesar y confirmar una pérdida de masa superior a la mitad inicial.





Etapa 5: Finalización y descarga.



Objetivo: retirar el grano de cacao del tunel para evitar que se humedezca de nuevo y su posterior almacenamiento.

Acciones clave:

- recoger el grano ya seco de las bandejas en sacos de fique o material transpirable para evitar la condensación al interior de la bolsa.
- dejar reposar y atemperar los granos antes de almacenar.
- almacenar en un lugar seco y ventilado.

Recuerde que una vez terminado el secado de los granos de cacao es importante realizar la limpieza del túnel para evitar la proliferación de hongos e insectos.

Validación del protocolo.

el protocolo operativo del túnel de secado Hohenheim fue validado a través de su aplicación práctica en el secado de los granos de cacao, dicha validación se llevó a cabo bajo condiciones ambientales reales en el centro de investigación NATAIMA de la corporación colombiana de investigación agropecuaria AGROSAVIA en el municipio del El Espinal - Tolima y se realizó la comparación con el secado en marquesina.

Resultado de la Validación

- Se logro la reducción del tiempo de secado el cual se llevó a cabo en un tiempo promedio de 48 horas en comparación a las 96 horas en marquesina.
- el contenido de humedad alcanzado es el óptimo para el almacenamiento de los granos de cacao, registrando en promedio un valor de 6.7%.
- El perfil sensorial de los granos mostro mayor intensidad en notas deseables (Nuez, Chocolate, Floral) para las muestras secadas en el túnel frente a un perfil más plano y terroso en los granos secados en la marquesina.





Indicadores de Desempeño.

Indicador técnico	Valor en túnel	Valor en marquesina
Tiempo de secado total	48 horas	96 horas
Humedad final	6.7 %	7.1 %
Actividad de agua (aW) final	0.58	0.61
Pérdida de masa promedio	52%	50%
Atributos sensoriales destacados	Nuez, cacao, floral	Terroso, amargo

Recomendaciones

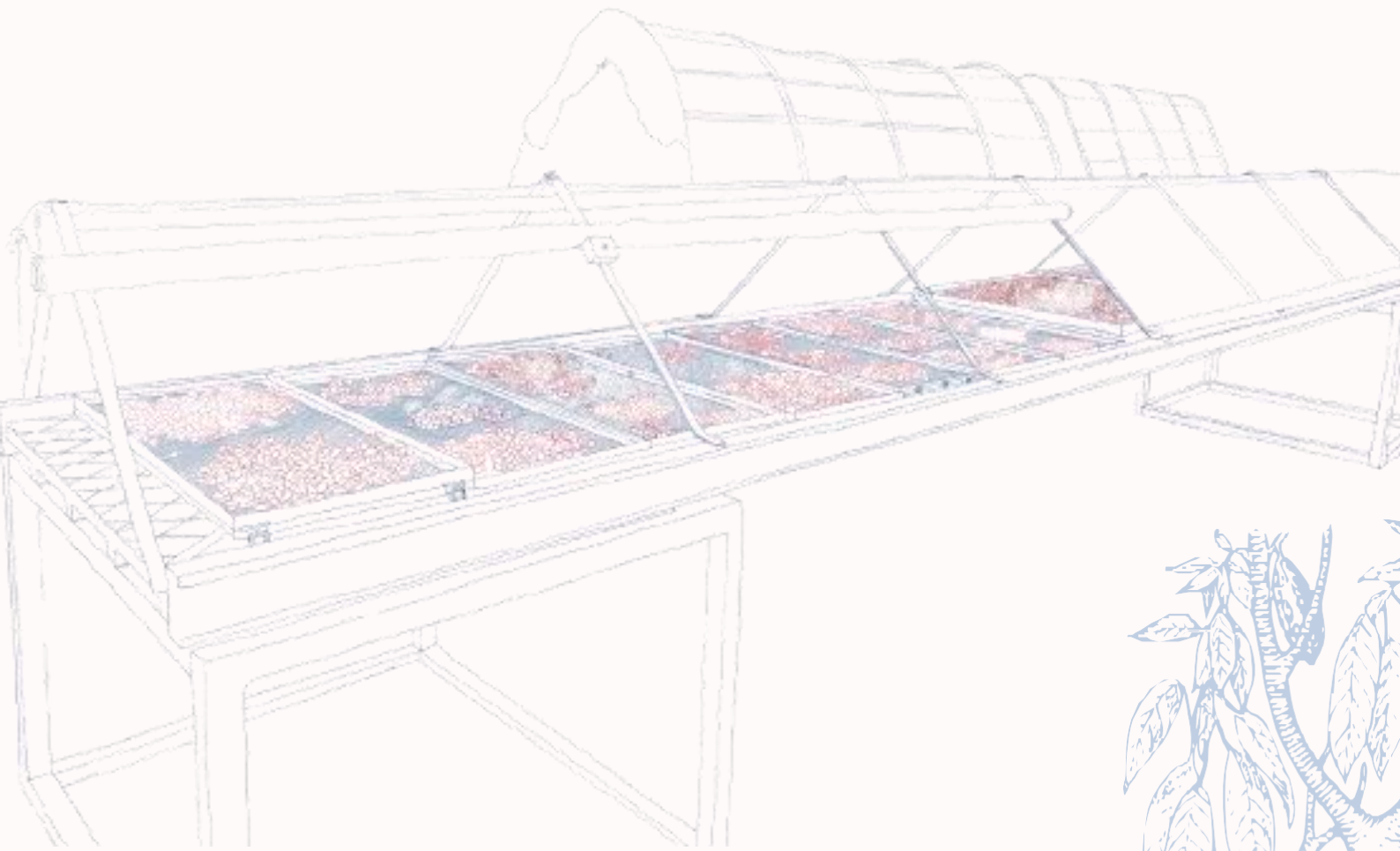
- **Capacitación previa:** Antes de implementar el protocolo, se recomienda capacitar al personal en la lectura de termohigrómetros, prácticas higiénicas de manipulación y técnicas básicas de evaluación sensorial.
- **Monitoreo continuo:** Realizar controles frecuentes de temperatura y humedad cada 2 horas permite tomar decisiones oportunas, especialmente en días de alta radiación o nubosidad prolongada.
- **Condiciones de fermentación previas:** Un secado exitoso depende en gran medida de una fermentación adecuada. No se debe iniciar el secado sin verificar que el grano haya terminado su fermentación (aroma, textura, pH).
- **Evitar acumulación:** Distribuir los granos en una sola capa delgada (≤ 4 cm) por bandeja para evitar fermentación secundaria y permitir una deshidratación uniforme.
- **Uso de cobertura auxiliar:** En días con excesiva radiación o temperaturas internas > 60 °C, utilizar coberturas parciales (sombrillas o mallas sombra) para evitar el sobrecalentamiento del grano.
- **Almacenamiento inmediato:** Una vez culminado el secado, el grano debe ser almacenado en un lugar seco, fresco y ventilado. Evitar contacto con superficies contaminadas.

Observaciones operativas

- La eficiencia del túnel solar tipo Hohenheim puede variar según su orientación, inclinación del colector, calidad del plástico y condiciones ambientales locales.
- Se recomienda revisar el estado físico de la estructura del túnel al menos una vez por semana.
- En caso de lluvias inesperadas, se debe proteger la zona de secado y verificar que no se presente condensación en el interior del túnel.



Protocolo Operativo para el Secado de Granos de Cacao en Túnel Solar Tipo Hohenheim



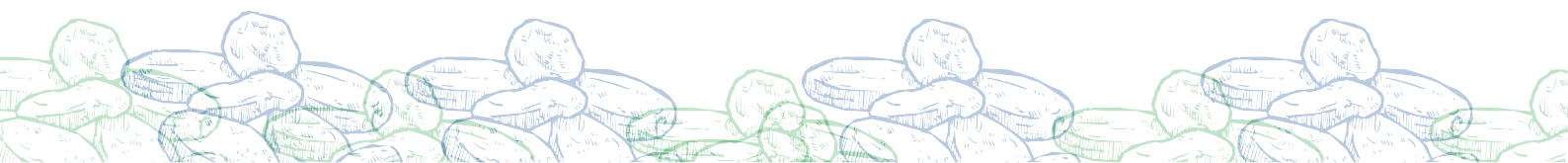
Introducción



El secado de los granos de cacao es una operación crítica en la posproducción del cacao pues influye directamente en las condiciones de almacenamiento y conservación, estabilidad química y desarrollo de los atributos sensoriales.

El secador solar tipo túnel Hohenheim ha sido adaptado para el secado de productos agrícolas en climas tropicales, permitiendo una mayor eficiencia energética, mejor control de la temperatura y homogeneidad en el proceso. Su estructura modular, operación pasiva y bajo costo lo convierten en una opción viable y replicable para pequeños y medianos productores.

Este documento presenta un protocolo operativo estandarizado, diseñado a partir de la validación experimental del túnel solar tipo Hohenheim aplicado al secado de granos de cacao. El protocolo se estructura en etapas secuenciales y contempla desde la preparación del grano hasta los criterios de finalización del proceso. Su implementación busca mejorar la calidad del producto, reducir tiempos de secado, minimizar pérdidas poscosecha y contribuir al fortalecimiento de las prácticas agroindustriales sostenibles en el contexto cacaotero nacional.



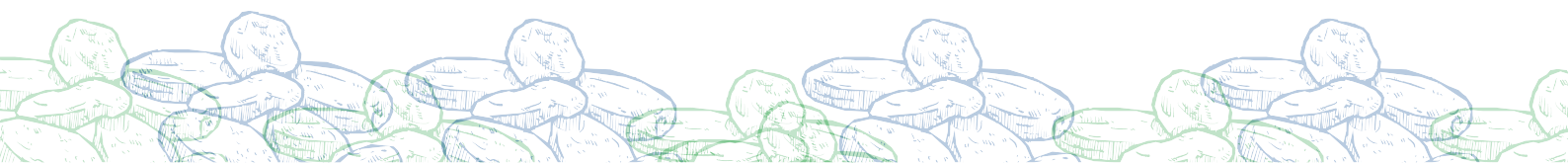
Objetivo



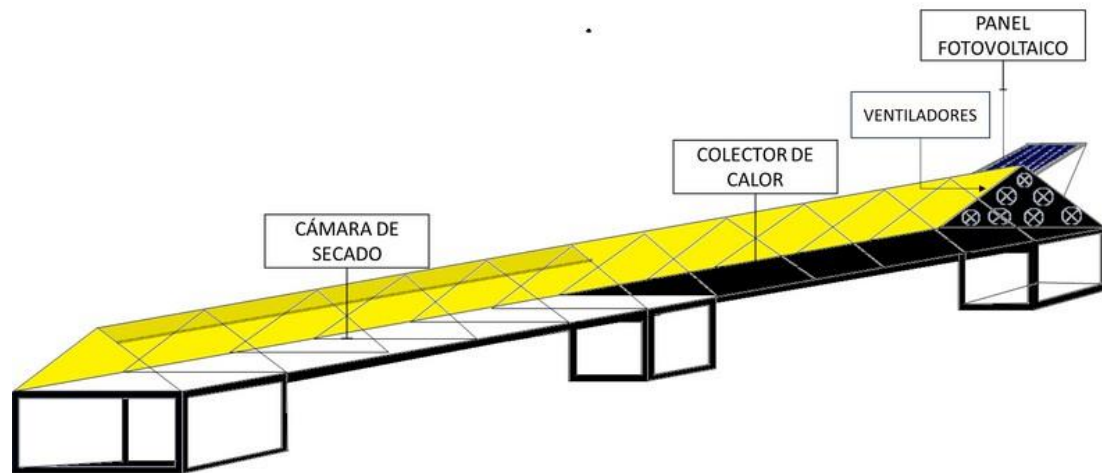
Establecer un protocolo operativo estandarizado para el secado de granos de cacao utilizando un prototipo de túnel de secado solar Hohenheim que asegure la uniformidad del secado y el desarrollo de los atributos sensoriales, bajo condiciones ambientales en las zonas productoras del trópico colombiano.

Objetivos específico

- Definir las condiciones del grano previo al inicio del secado.
- Estandarizar el proceso de carga del túnel.
- Establecer las condiciones operativas del proceso.
- Determinar los criterios de finalización del proceso de secado.



Partes de Equipo



El prototipo de túnel de secado solar Hohenheim es un sistema de secado diseñado para optimizar las condiciones de secado aprovechando la radiación solar; a continuación, se describen sus componentes principales:

1. **Cubierta plástica:** generalmente de Polietileno de alta resistencia.
2. **Colector de calor:** es la zona de color negro donde se realiza la captación y concentración del calor.
3. **Zona de secado (cámara de secado):** es el área principal donde se ubican las bandejas con el producto. El aire caliente que es impulsado por los ventiladores desde el colector de calor pasa por esta zona retirando la humedad.
4. **Bandejas de secado:** superficies elevadas con ruedas para el desplazamiento en la zona de secado, generalmente elaboradas en acero inoxidable o en malla cafetera. Es el lugar donde se realiza el tendido del producto.
5. **Sistema de ventilación fotovoltaica:** los ventiladores se ubican al inicio del túnel y son accionados por la energía fotovoltaica captada por el panel solar y transportan el aire a lo largo del túnel.

Materiales

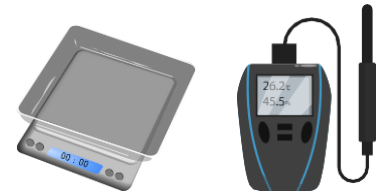
Para la implementación adecuada del protocolo de secado de granos de cacao en un túnel solar tipo Hohenheim, se requiere contar con los siguientes materiales, herramientas e instrumentos:

Equipos:

- Túnel Hohenheim.

Herramientas de medición:

- Balanza digital: para registrar la masa inicial y la pérdida de masa a lo largo del secado.

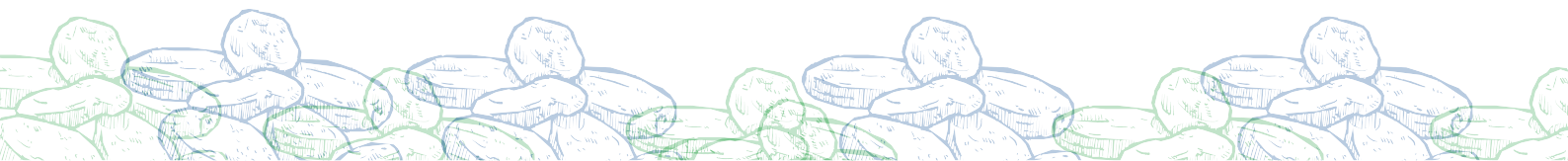


- Termohigrómetro: para medir temperatura y humedad durante el proceso al interior del equipo, ubicados en la zona de secado y el colector de calor.

Insumos:

- Bolsas: para muestreo.
- Espátula: para realizar el volteo.
- Bitácora: cuaderno para llevar registro de la información.

Nota: En caso de que la radiación sea muy alta, se recomienda acondicionar el túnel con una cobertura que permita reducir la exposición; esta cobertura puede estar elaborada con polisombra.



Procedimiento Operativo



el proceso de secado en el túnel solar tipo Hohenheim se divide en cinco etapas principales:

Etapa 1: Preparación del grano.



Objetivo: asegurar que los granos de cacao estén en condiciones óptimas para el inicio del secado.

Acciones clave:

- Verificar que la fermentación haya terminado (5 a 7 días), esta operación se puede apoyar en la prueba de corte donde una vez realizado el corte del grano este debe presentar el arriñonamiento característico.
- Medir el pH (entre 4.8 y 5.2) como indicadores de granos fermentados.
- Separar granos planos o con defectos físico-visibles.
- dejar escurrir los granos durante 2 a 4 horas después de terminar la fermentación para retirar el exceso de humedad. (opcional)



Etapa 2: Carga del Túnel.

Objetivo: organizar de manera uniforme el grano en las bandejas del secador para garantizar un flujo de aire adecuado y una transferencia de calor homogénea.

Acciones clave:

- verificar que la malla de las bandejas este limpia y despejada de tal manera que permita la circulación del aire.
- Pesar y registrar el contenido inicial de cada bandeja
- extender los granos de cacao en las bandejas formando una capa uniforme y delgada.



tenga en cuenta que se debe evitar la sobrecarga y acumulación de grano, pues eso dificulta el secado homogéneo





Etapa 3: Operación de Secado.



Objetivo: llevar el proceso de secado bajo condiciones controladas.

Acciones clave:

De acuerdo con las condiciones climáticas se recomienda :

- iniciar el secado en horas de la mañana.
- El volteo se debe realizar de manera frecuente si la radiación es alta, si por el contrario el día es frío debe hacerse con menos frecuencia.
- monitorear la temperatura y la humedad en la zona del colector de calor y en la zona de secado.

parámetros ideales:

temperatura en la zona de secado: **45 a 55 °C**

Ajustes operativos

si la temperatura supera los **60°C** se recomienda realizar la apertura de las cortinas o extender la polisombra sobre el túnel.

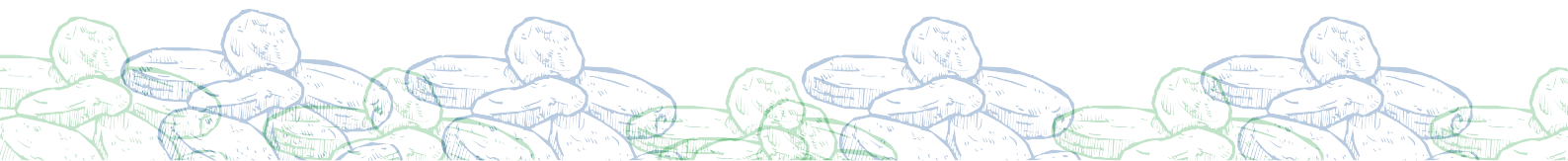
si por el contrario el día es nuboso se debe prolongar el tiempo de secado.

Etapa 4: Evaluación del secado.

Objetivo: Determinar si los granos de cacao han alcanzado las condiciones óptimas de secado.

Acciones clave:

- Realizar la prueba de corte para verificar que el interior este seco, de buen color y sin puntos blanco
- medir la humedad: los valores deben estar entre 7 y 8 % o de lo contrario tomar los granos en la mano y apretar fuerte, si el grano este seco sonara crocante.
- pesar y confirmar una pérdida de masa superior a la mitad inicial.





Etapa 5: Finalización y descarga.



Objetivo: retirar el grano de cacao del tunel para evitar que se humedezca de nuevo y su posterior almacenamiento.

Acciones clave:

- recoger el grano ya seco de las bandejas en sacos de fique o material transpirable para evitar la condensación al interior de la bolsa.
- dejar reposar y atemperar los granos antes de almacenar.
- almacenar en un lugar seco y ventilado.

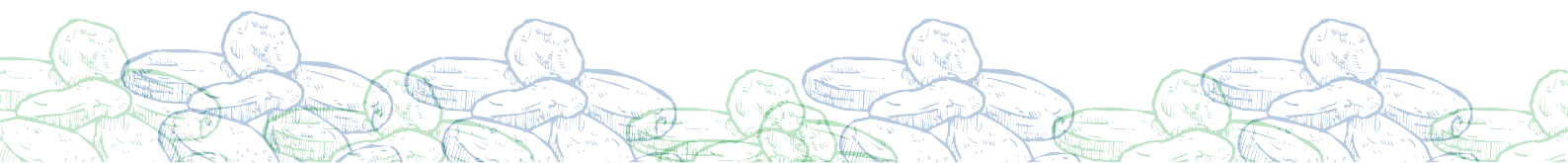
Recuerde que una vez terminado el secado de los granos de cacao es importante realizar la limpieza del túnel para evitar la proliferación de hongos e insectos.

Validación del protocolo.

el protocolo operativo del túnel de secado Hohenheim fue validado a través de su aplicación práctica en el secado de los granos de cacao, dicha validación se llevó a cabo bajo condiciones ambientales reales en el centro de investigación NATAIMA de la corporación colombiana de investigación agropecuaria AGROSAVIA en el municipio del El Espinal - Tolima y se realizó la comparación con el secado en marquesina.

Resultado de la Validación

- Se logró la reducción del tiempo de secado el cual se llevó a cabo en un tiempo promedio de 48 horas en comparación a las 96 horas en marquesina.
- el contenido de humedad alcanzado es el óptimo para el almacenamiento de los granos de cacao, registrando en promedio un valor de 6.7%.
- El perfil sensorial de los granos mostró mayor intensidad en notas deseables (Nuez, Chocolate, Floral) para las muestras secadas en el túnel frente a un perfil más plano y terroso en los granos secados en la marquesina.





Indicadores de Desempeño.

Indicador técnico	Valor en túnel	Valor en marquesina
Tiempo de secado total	48 horas	96 horas
Humedad final	6.7 %	7.1 %
Actividad de agua (aW) final	0.58	0.61
Pérdida de masa promedio	52%	50%
Atributos sensoriales destacados	Nuez, cacao, floral	Terroso, amargo

Recomendaciones

- **Capacitación previa:** Antes de implementar el protocolo, se recomienda capacitar al personal en la lectura de termohigrómetros, prácticas higiénicas de manipulación y técnicas básicas de evaluación sensorial.
- **Monitoreo continuo:** Realizar controles frecuentes de temperatura y humedad cada 2 horas permite tomar decisiones oportunas, especialmente en días de alta radiación o nubosidad prolongada.
- **Condiciones de fermentación previas:** Un secado exitoso depende en gran medida de una fermentación adecuada. No se debe iniciar el secado sin verificar que el grano haya terminado su fermentación (aroma, textura, pH).
- **Evitar acumulación:** Distribuir los granos en una sola capa delgada (≤ 4 cm) por bandeja para evitar fermentación secundaria y permitir una deshidratación uniforme.
- **Uso de cobertura auxiliar:** En días con excesiva radiación o temperaturas internas > 60 °C, utilizar coberturas parciales (sombrillas o mallas sombra) para evitar el sobrecalentamiento del grano.
- **Almacenamiento inmediato:** Una vez culminado el secado, el grano debe ser almacenado en un lugar seco, fresco y ventilado. Evitar contacto con superficies contaminadas.

Observaciones operativas

- La eficiencia del túnel solar tipo Hohenheim puede variar según su orientación, inclinación del colector, calidad del plástico y condiciones ambientales locales.
- Se recomienda revisar el estado físico de la estructura del túnel al menos una vez por semana.
- En caso de lluvias inesperadas, se debe proteger la zona de secado y verificar que no se presente condensación en el interior del túnel.

