

**DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO DEL CACAO (*Theobroma cacao*
L.) A TEMPERATURAS DE 40, 50 Y 60 °C Y EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS
RESULTANTES**

DIANA ROCÍO MEDINA RAMÍREZ

CARLOS GABRIEL ORTÍZ LOZANO



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
NEIVA
2013**

**DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO DEL CACAO (*Theobroma cacao L.*)
A TEMPERATURAS DE 40, 50 Y 60 °C Y EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS
RESULTANTES**

DIANA ROCÍO MEDINA RAMÍREZ

CARLOS GABRIEL ORTÍZ LOZANO

**Proyecto de grado presentado como requisito, para optar al título de:
INGENIERO AGRÍCOLA**

**Director
Ph.D. JOSE DUBAN HENAO CUELLAR**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
NEIVA
2013**

Nota de aceptación:

JOSE DUBAN HENAO CUELLAR
Director del trabajo

NELSON GUTIERREZ GUZMAN
Jurado

ORLANDO GUZMAN MANRRIQUE
Jurado

Neiva, 2013

DEDICATORIA

Durante estos años de lucha constante, de momentos de éxitos, de gratas vivencias, de angustias y desesperanza para poder cumplir mis objetivos y así poder alcanzar uno de mis más grandes anhelos, culminar mi carrera, los deseos de superarme y de lograr mi meta eran tan grandes que logre vencer todos los obstáculos y es por ello que debo dedicar este triunfo a quienes en todo momento me llenaron de amor y apoyo, y por sobre todo me brindaron su amistad:

A Dios Todo Poderoso por darme la fuerza, el valor y la constancia para salir adelante.

A mis abuelos Alcides y Aminta, a mis Tías Dolly y Beatriz, a mi Mamá Rocío y su Esposo Salvador, a mis Hermanos Juan y Nani y demás familiares Tíos, Primos (as), quienes con mucho amor, cariño, apoyo, comprensión, han hecho de mí una persona de muchos valores y me han dado el ejemplo para ser una gran Mujer y acompañarme durante esta etapa de mi vida. A mis tres ángeles de la guarda: mi Abuelita Lucia, mi Abuelito Aurelio y mi Palino, que desde donde ellos estén van a estar compartiendo conmigo este momento tan feliz y deseándome lo mejor. A toda mi familia en general gracias por estar en el momento en que me hago una profesional y por estar conmigo en esta etapa como Mamá.

A los profesores Fanny Llanos H. y Rodrigo Pachón B. por compartir todas sus todas sus enseñanzas y experiencias conmigo. A doña Gladys por ser nuestra mamá en la USCO. A mis amigos y compañeros: Anaid M, Nancy V, Shirley C, Daniel C, Lucho T, Oscar B, Carlos C, Mario T, Andrés C, Wilson E, Juan S, Sergio V, Jorge S, Cristian M, Renso C, Oscar O, Harrinzon F, por estar conmigo en los buenos y malos momentos de mi vida, por aguantarme las rabietas y alegrías.

A mi compañero de tesis Carlos Gabriel por su apoyo incondicional y su paciencia. A todos muchas gracias por su apoyo.

“Salmo 1:3 Él es como un árbol, plantado al borde de las aguas, que produce fruto a su debido tiempo,
y cuyas hojas nunca se marchitan: todo lo que haga le saldrá bien”

DIANA ROCÍO MEDINA RAMÍREZ

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre Julio Cesar (Q.E.P.D) de quien heredé la perseverancia, A mis padres Elcy y Carlos a quienes les debo todo, a mis hermanos Nino, Carolina y Francisco, a mis tíos Nelson y German, a María y Fidelina, y a mi amigo Perdomo, porque todos en mayor o menor forma hicieron parte de este proceso y sin su apoyo y colaboración habría sido imposible o más complicado.

A la Universidad Surcolombiana por abrirme las puertas como mi segundo hogar, a Todos los profesores de quienes tuve la fortuna de aprender, a la inigualable mamá adoptiva Doña Gladys, a Don Efren, a mis amigos y compañeros de clase de quienes aprendí casi tanto como de nuestros profesores y en especial a mi compañera Diana a quien le debo la oportunidad de compartir la realización de este trabajo y le agradezco por su infinita paciencia.

A todos infinitas gracias.

CARLOS GABRIEL ORTÍZ LOZANO

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a:

A Dios, nuestros padres y demás familiares por el apoyo constante, la motivación, las enseñanzas que nos brindan todos los días de nuestras vidas.

A la Universidad Surcolombiana, su facultad de Ingeniería y a nuestro Programa de Ingeniería Agrícola por brindarnos los conocimientos necesarios para ser unos buenos Ingenieros.

Al Director de tesis PhD. José Dubán Henao Cuéllar por su asesoría y asistencia en la realización de este proyecto.

Al PhD. Nelson Gutiérrez Guzmán por la colaboración brindada con su experiencia, conocimientos y compromiso durante la ejecución del proyecto.

Al Ingeniero Orlando Guzmán, Ingeniero Agrícola, Magister en Mercadeo, por su colaboración como jurado del proyecto.

A Don Bernardo Murcia, quien con su experiencia como productor cacaotero brindo toda su colaboración y confianza para poder realizar la investigación del proyecto.

A Pedro Nel Córdoba Cortes analista técnico de cacao de CasaLuker S.A. por abrirnos las puertas y colaborarnos en el estudio del proyecto.

A Doña Gladys Quino, Secretaria del Programa de Ingeniera Agrícola por su colaboración y apoyo durante todo el proceso de formación académica como Ingenieros Agrícolas. Gracias por ser nuestra Mamá en la USCO.

A los compañeros de Ingeniería Agrícola que de una u otra manera nos brindaron, colaboraron y motivaron para la realización del proyecto de grado. Gracias por haber compartido los mejores momentos de nuestra vida universitaria.

A todas aquellas personas que de una u otra manera nos colaboraron en la realización del presente trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. REVISIÓN DE LITERATURA	15
3.1 Generalidades del cacao.....	15
3.1.1 Clima y altitud.....	15
3.1.2 Suelo.....	16
3.2 Variedades del cacao.....	16
3.3 Zonas de producción.....	17
3.4 El cultivo de cacao en el Departamento del Huila.....	17
3.5 El proceso de beneficio del cacao.....	17
3.5.1 Cosecha o recolección.....	18
3.5.2 Partida de mazorcas.....	19
3.5.3 Desgranada.....	19
3.5.4 Fermentación.....	19
3.5.4.1 Sistemas de fermentación.....	20
3.5.5 Secado.....	21
3.5.5.1 Secado natural.....	21
3.5.5.1.1 El sol y su energía.....	22
3.5.5.1.2 Radiación solar.....	22
3.5.5.1.3 Aspectos básicos de la radiación solar.....	23
3.5.5.1.4 Declinación solar.....	23
3.5.5.1.5 Angulo de inclinación de los rayos solares.....	23
3.5.5.1.6 Inclinación del secador tipo túnel.....	24
3.5.5.1.7 Determinación altura solar.....	24
3.5.5.1.8 Determinación ángulo de inclinación.....	25
3.5.5.1.9 Radiación directa.....	26
3.5.5.1.10 Radiación difusa.....	26
3.5.5.2 Secado artificial por convección forzada.....	26
3.5.5.2.1 Aforo de un ventilador.....	27
3.6 Mecanismos y cinética de secado.....	29
3.6.1 Movimientos de la humedad dentro del material.....	30
3.6.2 Determinación del contenido de humedad.....	31
3.6.3 Curva de secado.....	32
3.6.4 Tasa de secado.....	32
3.6.5 Período de disminución de la velocidad de secado.....	33

3.6.6 Modelos empíricos de secado.....	35
3.7 Análisis estadístico de los modelos.....	38
3.8 Análisis sensorial de alimentos.....	39
3.8.1 Los cinco sentidos y las propiedades sensoriales.....	39
3.8.1.1 El olor.....	39
3.8.1.2 El aroma.....	39
3.8.1.3 El gusto.....	39
3.8.1.4 El sabor.....	40
3.8.1.5 La textura.....	40
4.MATERIALES Y METODO.....	41
4.1 Materiales.....	41
4.2 Método.....	41
4.2.1 Selección y desgrane de las mazorcas.....	41
4.2.2 Caracterización física.....	42
4.2.3 Determinación del diámetro-Espesor.....	42
4.2.4 Determinación de la densidad aparente y real del grano.....	42
4.2.5 Proceso de Fermentación.....	43
4.2.6 Proceso de secado.....	44
4.2.6.1 Secado al sol.....	44
4.2.6.2 Secado por convección forzada.....	44
4.2.7 Determinación de humedad.....	45
4.2.7.1 Determinación de la humedad durante el secado.....	46
5.RESULTADOS Y DISCUSION.....	49
5.1 Parámetros de diseño de un secador parabólico.....	49
5.2 Aforo de un ventilador.....	50
5.3 Caracterización física.....	50
5.4 Condiciones ambientales.....	51
5.5 Fermentación.....	52
5.6 Curvas de secado.....	53
5.7 Análisis estadístico de los modelos.....	55
5.8 Tasa de secado.....	55
5.9 Resultados análisis físico y perfil sensorial muestras de cacao del departamento del Huila.....	59
6.CONCLUSIONES.....	64
7. RECOMENDACIONES.....	66
8. BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS.....	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Corrección de ángulo de inclinación.....	25
Tabla 2. Datos de aforo ventilador centrífugo.....	50
Tabla 3. Caracterización física de Cacao tipo Híbrido.	51
Tabla 4. Parámetros estadísticos de los modelos propuestos para todos los tratamientos.	55
Tabla 5. Constantes y valores de difusividad para todos los tratamientos y energía de activación para secado artificial.	58
Tabla 6. Resultados del análisis físico de cada muestra.	59
Tabla 7. Análisis sensorial de la muestra 1 (Secado al sol).	60
Tabla 8. Análisis sensorial de la muestra 2 (Secado de 40°).	61
Tabla 9. Análisis sensorial de la muestra 3 (Secado de 50°).	61
Tabla 10. Análisis de la muestra 4 (Secado de 60°).	62
Tabla 11. Datos de condiciones ambientales.	72
Tabla 12. Datos secador parabólico y modelos de Thompson y Henderson & Pabis....	72
Tabla 13. Datos secado artificial por convección forzada a Temperatura de 40°C y modelos de Lewis y Henderson & Pabis.	73
Tabla 14. Datos secado artificial por convección forzada a Temperatura de 50°C y modelos de Lewis y Henderson & Pabis.	74
Tabla 15. Datos secado artificial por convección forzada a Temperatura de 60°C y modelos de Lewis y Henderson & Pabis.	74
Tabla 16. Valores de Difusividad efectiva para Cacao y otros productos biológicos. ...	75
Tabla 17. Parámetros relación de Arrhenius.	75
Tabla 18. Valores de Energía de activación para cacao y otros productos.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esfera celeste mostrando el movimiento aparente del sol y el ángulo de declinación solar (IGNACIO, 2008) citado por Bahamón y Torres 2013.....	23
Figura 2. La masa atmosférica que los rayos solares atraviesan medio día y/o atardecer (SOLÍS, 2005). Citado por Bahamón y Torres (2013).....	24
Figura 3. Inclinação del secador tipo túnel (IGNACIO, 2008), Citado por Bahamón y Torres (2013).....	24
Figura 4. Interacción de la radiación con la atmósfera terrestre (SALDAÑA et al., 2004), Citado por Bahamón y Torres (2013).....	26
Figura 5. Selección y desgrane de mazorcas.....	42
Figura 6. Medición de diámetro.....	42
Figura 7. Determinación de la densidad aparente y real del grano.....	43
Figura 8. Proceso de fermentación.....	43
Figura 9. Secado al sol.....	44
Figura 10. Secado por convección forzada.....	45
Figura 11. Determinación de humedad inicial.....	45
Figura 12. Determinación de humedad final.....	47
Figura 13. Condiciones ambientales para el secado.....	51
Figura 14. Gráficas de fermentación teniendo como parámetro la temperatura ambiente y de la masa de granos.....	52
Figura 15. Curvas de secado y modelos de Lewis (convección forzada) y modelos de Thompson y Henderson & Pabis (Secador parabólico).....	53
Figura 16. Curvas de secado datos experimentales y modelos de Henderson & Pabis (Secador parabólico).....	54
Figura 17. Logaritmo natural de la relación de humedad Ln (RH) vs tiempo (Hr) de cada uno de los tratamientos.....	56
Figura 18. Relación de Arrhenius para secado artificial.....	58
Figura 19. Muestra 1 (Secado al sol).....	60
Figura 20. Muestra 2 (Secado de 40°).....	61
Figura 21. Muestra 3 (Secado de 50°).....	62
Figura 22. Muestra 4 (Secado de 60°).....	63

RESUMEN

La realización de este trabajo se basó en frutos de cacao tipo híbrido (*Theobroma cacao L.*) obtenidos del (Complejo Agroindustrial y Turístico Cacaotero Villa Stefany) en la necesidad de evaluar la cinética de secado y parámetros importantes en la calidad del producto resultante a tres temperaturas de 40, 50 y 60°C, en secado de capa delgada promedio de 0,01 m por convección forzada a 0,26 (m/s), y en secador solar parabólico, cuyas temperatura (T) y humedad relativa (HR) se midieron usando un Termo-Higrómetro digital modelo 303C.

La masa total de cacao en baba empleada en cada ensayo desde el proceso de fermentación fue de 3kg, llegando al proceso de secado aproximadamente 2 kg. Los resultados obtenidos para los tratamientos en secador artificial a 40, 50, 60 °C y secador solar parabólico fueron; tiempo de secado (26, 19, 13 y 41 horas), difusividad efectiva (Def) (6,67772E-11, 1,39165E-10, 3,16347E-10 y (1,63484E-11 - 1,41338E-10) (m²/s), respectivamente. La energía de activación (Ea) para la difusividad se calculó en 67,4 (kJ/mol).

Se utilizaron los modelos de Lewis, Thompson y Henderson y Pabis (H&P) para determinar el de mejor ajuste con los datos experimentales mediante los parámetros estadísticos r², X² y RMSE. Siendo el modelo de Henderson & Pabis el que mejor se ajustó a los tratamientos a 40 y 50 °C, el de Lewis al tratamiento a 50°C, y el modelo combinado de Thomson y H&P para el tratamiento en el secador solar parabólico.

Se realizó análisis físico y sensorial al producto obtenido, arrojando como resultado deficiencias en los procesos de fermentación que se evidenciaron en sabores a almendras violetas, tonos verdes y fruta sobre-fermentada. El secado acelerado no permitió disminuir el amargor ni la astringencia de sustancias volátiles que enmascararan los atributos de un buen cacao. En general las muestras se calificaron como desagradables.

Palabras Clave: Beneficio de Cacao, Cinética de secado, Difusividad efectiva, Energía de activación, Análisis sensorial.

ABSTRACT

The realization of this work was based on fruit type hybrid cocoa (*Theobroma cacao L.*) obtained from (Complejo Agroindustrial and Tourism Cocoa Villa Stefany) on the need to evaluate the kinetics of drying and important parameters in the quality of the resulting product to three temperatures of 40, 50 and 60 ° C, in thin layer drying average forced convection 0.01 m to 0.26 (m / s) and parabolic solar dryer whose temperature (T) and relative humidity (RH) were measured using a digital thermo-hygrometer model 303C.

The total mass of cocoa used in each assay from the fermentation process was 3kg, reaching the drying process approximately 2 kg. The results for treatments artificial dryers 40, 50, 60 ° C and parabolic solar dryer, were: drying time (26, 19, 13 and 41 hours), effective diffusivity (Def) (6.67772 E-11 1.39165 E-10, 3, 16347E-10 (1.63484 E-11-1.41338 E-10) (m² / s)), respectively. The activation energy (Ea) for the diffusivity was calculated at 67.4 (kJ / mol).

Models were used, Lewis, Thompson and Henderson and Pabis (H & P) to determine the best fit with the experimental data using statistical parameters r², X² and RMSE. Being the model of Henderson & Pabis the best fit to the treatments at 40 and 50 ° C, the Lewis-treatment at 50 ° C, and the combined model of Thomson and H & P for treatment in the solar dryer parabolic.

We performed sensory and physical examination to the product obtained, yielding results in impaired fermentation processes were found in almond flavors violets, greens and fruit over-fermented. Accelerated drying not allowed to reduce the bitterness or astringency of volatile substances which mask the attributes of a good cocoa. In general the samples were rated as unpleasant.

Keywords: Cocoa Benefit, Drying kinetics, Effective diffusivity, Activation energy, Sensory analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Según PROEXPORT (2012), tradicionalmente el sistema de producción de cacao en Colombia es desarrollado por cerca de 25.000 familias campesinas, donde el 90% de la producción es responsabilidad de pequeños agricultores, destacándose la participación del Departamento de Santander que aporta cerca del 38 % de la producción nacional.

Según Eslava (2011), el cultivo de cacao cuenta con ventajas comparativas en el país y en el Departamento del Huila, derivadas de las condiciones naturales para su producción (condiciones agroclimáticas), de ahí que haga parte del Programa de Productividad y Competitividad del Huila que ha venido desarrollando en todos los municipios productores del grano, acciones técnicas, administrativas y financieras, con el fin de encauzar el subsector hacia un desarrollo integral, sostenible y diversificado, consolidando así una oferta exportable de alto valor agregado, y logrando incursionar y mantenerse en los mercados nacionales e internacionales.

Según la Secretaría de Agricultura y Minería (2011) citado por Eslava (2011), el Observatorio de Territorios Rurales y las Evaluaciones Agropecuarias Municipales 2011, el departamento registra un total de área sembrada de cacao de 9.786,5 hectáreas, de las cuales 7.303,4 hectáreas son cosechadas, con un rendimiento promedio de 488 kg/ha. y una producción anual de 3.562,9 toneladas.

Según Rohan (1964), Cros & Jean Jean (1995) citado por Fariñas et al (2003), en el proceso de beneficio del cacao, la fermentación y el secado son las etapas de mayor importancia, ya que en la primera se producen las reacciones bioquímicas que causan disminución del amargor y la astringencia, dando origen a los precursores del sabor y el aroma a chocolate; mientras que en la segunda etapa se reduce el exceso de humedad que queda después de la fermentación, lo que evita el desarrollo de mohos que deterioran el producto y facilita el almacenamiento, el manejo y la comercialización del mismo.

Para este proyecto, se determinó la cinética de secado de cacao variedad tipo híbrido. Las muestras se sometieron al proceso de fermentación, seguido el secado en el secador eléctrico por convección forzada (INGESEC, modelo Laboratorio 40) a temperaturas de 40, 50 y 60°C y una velocidad del aire de secado de (0,26 m/s), paralelamente a este proceso se evaluó la cinética de secado de cacao en un secador solar parabólico, para determinar a cuál de estas temperaturas se obtuvo un producto de óptima calidad.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Determinar de la cinética de secado de cacao (*Theobroma cacao L.*) a temperaturas de 40, 50 y 60° C, provenientes de frutos híbridos del “Complejo Agroindustrial y Turístico Cacaotero Villa Stefany” ubicado en La Vereda Termopilas del Municipio de Rivera-Huila, en secado por convección forzada y en secador solar parabólico y evaluación del producto resultante.

2.2. Objetivos específicos

- * Monitorear el proceso de fermentación, teniendo en cuenta la temperatura como parámetro importante en este proceso.
- * Secar mecánicamente cacao tipo híbrido mediante convección forzada a temperaturas de 40, 50 y 60 °C, y secado en secador solar parabólico.
- * Evaluar cuantitativamente la relación entre los datos obtenidos con las curvas de los modelos de Lewis, Henderson & Pabis y Thompson con los datos experimentales mediante los parámetros: Coeficiente de determinación (r^2), chi-cuadrado reducido (χ^2) y error cuadrado medio (**RMSE**).
- * Caracterizar la calidad del producto final mediante análisis físico y sensorial teniendo en cuenta la norma ICONTEC 1252.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Generalidades del Cacao

Según la FAO (1993), el cacao es originario del Amazonas y actualmente se cultiva en diferentes países del trópico ubicados entre los 18° Norte hasta los 20° Sur de la línea ecuatorial 6. Actualmente en Colombia se cultiva en regiones que cumplen con las condiciones edáficas, fisiográficas y climáticas adecuadas para el cultivo de cacao. (Entre 0-1.100 msnm, 24-28°C, 1.800-2.600 mm de precipitación anual).

Colombia por su posición geográfica de país tropical, ubicado en zona ecuatorial, se beneficia de una luminosidad permanente durante todo el año. De igual forma, cuenta con una gran variedad de pisos térmicos y disponibilidad de recursos hídricos. Costa de Marfil es el mayor productor a nivel mundial con 2.150.000 hectáreas a 2010, seguido por Ghana (1.625.000 ha) y Nigeria (1.344.500 ha). Ecuador, Colombia, Perú y Venezuela producen 70% del cacao fino y de aroma del mundo. De estos, Ecuador cuenta con 360.025 ha, Colombia con 143.645 ha, Perú con 77.192 ha y Venezuela con 48.400 ha.

Según PROEXPORT COLOMBIA (2012), en la actualidad Colombia cuenta con 2 millones de has. aptas para el desarrollo del cultivo de acuerdo con Corpoica, Fedecacao y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) quienes realizaron un estudio de zonificación por aptitud para los cultivos de cacao (escala 1:100.000), teniendo en cuenta criterios edáficos y climáticos. Este estudio estimó que en Colombia existen 2 millones de Has. con aptitud para plantaciones de cacao (2003), de las cuales 662.669 Has. son tierras sin restricciones o ligeras restricciones (A1), es decir que no requieren ningún tipo de adecuaciones de suelos para el cultivo y 1.3 millones tienen restricciones moderadas (A2).

Para la producción del cacao es importante tener en cuenta las siguientes exigencias agroecológicas:

3.1.1. Clima y altitud

El clima propicio para el desarrollo del cacao en Colombia coincide con las características del piso térmico cálido, que comprende la franja de tierras ubicadas desde el nivel del mar hasta 1.300 m.s.n.m. Los principales elementos del clima a tener en cuenta son:

- **Temperatura:** Entre 22°C y 30°C en promedio.
- **Precipitación:** 2.500 milímetros anuales, preferiblemente bien distribuidos a través del año.

- **Humedad relativa:** Cercana del 80%
- **Vientos:** Zonas de vientos fuertes permanentes son inconvenientes, a no ser que se puedan instalar barreras vivas rompe vientos a base de franjas abundantes de árboles.

3.1.2. Suelo

Según FINAGRO (2009), los suelos deben ser sueltos y profundos para que las raíces se distribuyan sin dificultad, así la raíz principal puede penetrar de 80 a 150 centímetros.

3.2. Variedades del Cacao

Según FUNDACIÓN CACAO MÉXICO (2010), hay tres variedades principales de cacao, aunque se conocen 18 especies distintas. A continuación se mencionan las tres principales: .

- **Criollo o nativo:** Es el cacao genuino y fue bautizado así por los españoles al llegar a México. Se cultiva en Perú, Venezuela (fundamentalmente en Chuao), Honduras, Colombia, Ecuador, Nicaragua, Guatemala, Trinidad, Bolivia, Jamaica, México, Granada; y en el Caribe, en la zona del océano Índico y en Indonesia. Es un cacao reconocido como de gran calidad, de escaso contenido en tanino, reservado para la fabricación de los chocolates más finos. El árbol es frágil y de escaso rendimiento. El grano es de cáscara fina, suave y poco aromática. Representa, como mucho, el 10% de la producción mundial. Un ejemplo de la variedad criolla es el cacao Ocumare proveniente del Valle de Ocumare de la Costa, Venezuela.
- **Forastero o campesino:** Originario de la alta Amazonia. Se trata de un cacao normal, con el tanino más elevado. Es el más cultivado y proviene normalmente de África. El grano tiene una cáscara gruesa, es resistente y poco aromático. Para neutralizar sus imperfecciones, requiere un intenso tueste, de donde proceden el sabor y el aroma a quemado de la mayoría de los chocolates. Los mejores productores usan granos forasteros en sus mezclas, para dar cuerpo y amplitud al chocolate, pero la acidez, el equilibrio y la complejidad de los mejores chocolates proviene de la variedad criolla.
- **Híbrido:** Entre los que destaca el trinitario: es un cruce entre el criollo y el forastero, aunque su calidad es más próxima al del segundo. Como su nombre sugiere, es originario de Trinidad donde, después de un terrible huracán que en 1727 destruyó prácticamente todas las plantaciones de la Isla, surgió como resultado de un proceso de cruce. De este modo, heredó la robustez del cacao forastero y el delicado sabor del cacao criollo, y se usa también normalmente

mezclado con otras variedades. Como ejemplo de un trinitario tenemos al Carenero Superior, de Barlovento, al este de Caracas, en el estado de Miranda, Venezuela.

3.3. Zonas de producción

Según FINAGRO (2009), el departamento que tradicionalmente ha concentrado la mayor producción de cacao es Santander con el 46,2% de participación en el total. Le siguen en importancia con sensiblemente menor participación: Arauca, Norte de Santander, Tolima, Huila, Nariño, Antioquia, Cundinamarca, los cuales en conjunto representan el 45,4% del total. Estos ocho departamentos participan en total, con el 91,6% de la producción, lo cual indica una alta concentración de la producción en ellos.

3.4. EL cultivo de cacao en el Departamento del Huila

Según GOBERNACION DEL HUILA et al (2009), por tradición, el departamento del Huila ha sido considerado cultivador de cacao, actualmente se cultiva en los 37 municipios que componen su geografía, y su producción en grano seco lo ubica en el segundo lugar a nivel nacional, con un aporte en grano seco de 4.036 toneladas, y un área sembrada de 9.863 hectáreas, a 31 de diciembre de 2008, según datos de la Evaluación Agrícola Final de Cultivos Permanentes y Semipermanentes del año 2008, elaborado por la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Minero del departamento del Huila

3.5. El proceso de beneficio del cacao

En el mercado mundial, los granos o almendras de cacao, se clasifican usualmente en dos grandes categorías: La primera es la de los granos utilizados para producir manteca de cacao y productos para los que se requiere gran cantidad de chocolate y son denominados cacaos corrientes, los cuales en los Estados Unidos son conocidos como "basic beans" y granos ordinarios o "Bulk beans" en Europa.

La segunda clasificación contempla los granos que dan características específicas de sabor, aroma y color en chocolates finos, en revestimientos o coberturas y para la obtención de polvo para dar sabor a recetas domésticas y la preparación de diversos alimentos y bebidas que se consiguen en el mercado. Este tipo de granos se denominan finos, cacao fino en Europa y "flavor beans" (granos de aroma) en los Estados Unidos.

La anterior clasificación corresponde totalmente al aspecto comercial sin tener distinguos geográficos, genéticos, climatológicos o de poscosecha, solamente atendiendo a las características concretas que presente el grano. Sin embargo es

preciso puntualizar que en el resultado final de la calidad, influyen la herencia, es decir el material genético del que provienen las semillas usadas para la plantación de donde son extraídas, el ambiente en el que se desarrolla el cultivo y el beneficio al que es sometido el grano a partir de las mazorcas maduras.

De otra parte es muy claro que las condiciones en que se beneficia el grano es decir de acuerdo con el tratamiento de poscosecha, en especial de acuerdo a como se fermente, adquirirá características que le darán su calidad final, por lo cual es de suma importancia que el productor haga especial énfasis en dicho proceso. Por último, el ambiente complementa los factores que hemos indicado como formadores de la calidad, el cual se refiere a la suma de las condiciones ambientales suelo y clima. Que son específicos de cada una de las regiones en las que se cultiva cacao y que son inmodificables por el hombre.

Según FEDECACAO (2004), en cuanto a la calidad con relación al precio obtenido en el mercado del mundo. Los cacaos corrientes tienen un precio piso, a partir del cual los granos con características de fino obtienen mejor aceptación en la medida en que éstas sean mayores y más notables. El manejo de poscosecha del cacao, denominado beneficio, constituye un aspecto de máxima importancia para presentar al mercado un producto de calidad. El buen beneficio asegura que el grano sea apreciado, apetecido por la industria, garantiza por ende su comercialización tanto a nivel nacional como para la exportación y justifica un mejor precio.

El beneficio del cacao es un proceso que obedece a los principios básicos de conservación de alimentos y se hace con la finalidad de mejorar la calidad del grano. La demanda de granos de calidad por parte de los industriales aunado al desconocimiento de los agricultores en prácticas de beneficio plantean la necesidad de capacitar a estos últimos en técnicas básicas que les permitan obtener un producto de buena calidad que satisfagan los requerimientos exigidos por los compradores. Granos mal fermentados, humedad elevada, mezcla de almendras sanas con enfermas, demasiada impurezas son factores negativos que afectan la calidad. En términos esquemáticos, el beneficio del cacao consiste en lo siguiente:

3.5.1. Cosecha o recolección

Según MINISTERIO DE AGRICULTURA PERU (2004), la cosecha se inicia cuando el fruto o mazorca está maduro. La madurez de la mazorca se aprecia por su cambio de pigmentación: de verde pasa al amarillo o del rojo y otros similares al amarillo anaranjado fuerte o pálido. No obstante, en frutos de coloración roja – violácea muy acentuada el cambio de color puede no ser muy aparente y se corre el riesgo de no cosechar a tiempo las mazorcas que han alcanzado madurez plena. Debido a esta dificultad las mazorcas pueden madurar y germinar. Cuando existen dudas respecto del estado del fruto maduro basta golpearlo con los dedos de la mano y si se produce un sonido hueco es señal de que el fruto está maduro.

3.5.2. Partida de mazorcas

Generalmente, los montones o pilas de frutos, deben hacerse en un lote sin árboles de cacao, en donde pueda fácilmente realizar la labor de la partida y donde puede amontonar las cáscaras para su descomposición y posterior utilización en el mismo cultivo, como abono orgánico de muy buena calidad. Ojalá previamente mediante un proceso de compostaje.

Antes de empezar a partir las mazorcas, debe separar las sanas de las enfermas para beneficiar solamente los granos sanos y no dañar la calidad del producto final. La quiebra o partida de las mazorcas debe hacerse con un machete corto o con un mazo de madera, evitando dañar los granos, esto depende de la habilidad del operario. También se utiliza el sistema de un machete corto colocado en forma invertida sobre un tronco de madera. Con este sistema puede aumentarse el rendimiento en esta labor, con menor riesgo de accidentes para el operario.

3.5.3. Desgranada

Según FEDECACAO (2004), la extracción de las semillas de la cáscara, se denomina desgranada o deguyada y se hace deslizando los dedos de la mano a lo largo de la placenta o vena central de la mazorca, evitando extraerla para no mezclarla con los granos de cacao. Si esto sucede debe sacarse posteriormente dicha placenta pues constituye una impureza que perjudica la calidad del producto.

3.5.4. Fermentación

Denominado también beneficio, cura o preparación. Es un proceso bioquímico interno y externo de la semilla en la que ocurren cambios notables en su estructura. La fermentación consiste en lo siguiente:

- Descomposición y remoción del mucílago azucarado que cubre el grano fresco, para facilitar el secado y la conservación o almacenamiento.
- Elevar la temperatura que mata al embrión, para facilitar el desarrollo del sabor a chocolate.
- Destrucción de las células pigmentadas o cambios en la pigmentación interna.
- La transformación del sabor astringente de los cotiledones.
- El desarrollo de sabor y aroma del chocolate.
- Durante la fermentación los azúcares que contienen las almendras son transformados a alcoholes por las levaduras. Estos a su vez son convertidos en ácido acético por las bacterias acéticas.

Una cantidad considerable de calor se desprende durante la fermentación mientras la pulpa se desintegra. Este incremento en la temperatura es el causante de la muerte del

embrión y es precisamente en este momento cuando se inician los cambios bioquímicos internos de la semilla: el cambio de color violeta a marrón claro, disminución del sabor amargo y el desarrollo de los sabores precursores del chocolate.

3.5.4.1. Sistemas de fermentación

Según MINISTERIO DE AGRICULTURA PERU (2004,) existen diversos procedimientos para la fermentación del cacao. Entre los más usados, tenemos la fermentación en costales, en rumas o montones y en cajones de madera.

- **Fermentación en sacos.** Para la fermentación del cacao en costales de polietileno o yute se colocan las almendras dentro de estos, se cierran y se los deja fermentando en el piso. Algunos agricultores suelen colgarlos para que tengan mejor aireación durante dos o tres días al cabo de los cuales son extraídas para someterlas al proceso del secado. Este método no es recomendable debido a que las almendras presentan un elevado porcentaje de granos violáceos y pizarrosos.
- **Fermentación en rumas o montones.** La fermentación en rumas o montones es bastante simple. Sobre el piso se dispone una capa de hojas de plátano que sirve de base y facilita el drenaje del exudado. Las almendras son acondicionadas sobre estas hojas formando rumas que se cubren con hojas de plátano y sacos de yute para evitar la fuga de calor que dará muerte al embrión de las semillas. Estos montones deben estar expuestos directamente al sol y no bajo sombra con remociones a intervalos de 48, 72 y 96 horas que es el tiempo necesario para obtener un cacao bien fermentado por encima del 90 %. Por lo general, todo el proceso demora 5 días. Este método tiene la ventaja de fermentar cualquier volumen y no ocasiona costo alguno.
- **Fermentación en cajones.** Para este tipo de fermentación se colocan las almendras frescas dentro de cajones fermentadores por un período de 5 días.

Para una buena fermentación, debe nivelarse uniformemente la masa de cacao en los cajones y cubrirlos con hojas de plátano, costales de yute o plástico, a fin de mantener la humedad y conservar el calor desprendido por la fermentación alcohólica. La capa de granos frescos no debe superar los 70 centímetros. De hacerlos se corre el riesgo que se compacten y reduzca la aireación de los granos además de dificultar el volteo obteniéndose una fermentación dispareja. La razón de realizar los volteos es la de uniformizar el desarrollo de los procesos bioquímicos que se manifiestan en el curso de la fermentación. La acumulación de temperatura se inicia lentamente debido a la poca contaminación del mucílago fermentado que al airearse convenientemente, produce un efecto positivo directo.

El primer volteo se debe efectuar a las 48 horas de depositarse la masa de cacao, luego a las 72 y por último a las 96 horas, quedando apto para someterse al secado a las 120

horas (5 días). Luego de estos tres volteos las almendras tienen en promedio un 80% de humedad. Este procedimiento permitirá lograr una fermentación más uniforme si la comparamos con los métodos anteriores.

3.5.5. Secado

Según FEDECACAO (2004), mediante este proceso se disminuyen el contenido de agua, la acidez y la astringencia de la almendra, características importantes de calidad. Al final de la fermentación el contenido de humedad de los granos de cacao está alrededor del 55 %. Para ser almacenados con seguridad debe reducirse a límites del 7 u 8%.

Según MINISTERIO DE AGRICULTURA PERU (2004), el proceso de secado no constituye una simple reducción de humedad sino que los cambios químicos continúan mientras el contenido de humedad desciende con lentitud hasta que se detienen por la falta de humedad o la inactivación de las enzimas por otros medios. Por este motivo el proceso no debe ser muy rápido durante los dos primeros días, la alta temperatura puede inactivar las enzimas.

En lo posible el secado debe hacerse al sol, que es la fuente de calor más barata y adecuada. Si se utiliza secado artificial debe tenerse cuidado con los silos para que la temperatura no sobrepase los 60 grados centígrados. El secado debe ser lento y a bajas temperaturas particularmente al comienzo.

Según FEDECACAO (2004), para el secado al sol se utilizan estructuras como las paseras, casa elbas, camillas de madera o carros corredizos. No se deben usar patios de cemento ni áreas pavimentadas pues sobre todo en estas últimas, se produce contaminación por elementos nocivos.

Según MINISTERIO DE AGRICULTURA PERU (2004), la rapidez del secado varía según el método que se emplee. En caso que el secado sea solar; es decir, al aire libre dura de 5 a 7 días. Esto dependerá de las condiciones atmosféricas para deshidratar óptimamente las almendras. Se sabrá que ha completado el secado del cacao cuando a la presión de los dedos índice y pulgas, se rompan los granos fácilmente.

3.5.5.1. Secado natural

Según la FAO (1993), se entiende por secado natural aquél en que el movimiento del aire de secado se debe a la acción de los vientos, y la energía para evaporar la humedad proviene de la capacidad de secado del aire y de la incidencia directa de la energía solar. Para reducir el tiempo de secado comúnmente se construyen patios de secado o secadores simples que aprovechan la acción del viento y la energía solar. Este método de secado es muy utilizado por la mayoría de los agricultores de los

países en vías de desarrollo, a veces por desconocimiento de técnicas más modernas y porque las condiciones climáticas permiten su uso a un costo muy reducido.

3.5.5.1.1. El sol y su energía

Según ICAITL (1983) citado por Bahamón y Torres 2013, el sol es la estrella de mayor importancia y la que aporta la energía necesaria para la vida de la tierra, del cual dista, en promedio, unos 150 millones de kilómetros. Dentro del sol se producen continuamente reacciones de fusión nuclear, a una escala gigantesca, a causa de lo cual se liberan inmensas cantidades de energía, donde permite que el sol emita hacia el espacio, en forma de ondas electromagnéticas, la energía liberada por los procesos nucleares. Esta energía, al abandonar el sol y viajar por el espacio sufre una dispersión progresiva, que es cada vez mayor cuanto más lejos del sol se considere. Además de las enormes cantidades de energía liberadas por el sol, solo llegan a la tierra aproximadamente unas 2 billonésimas partes, pero a esta pequeña cantidad de energía se pueden atribuir casi la totalidad de los procesos meteorológicos y biológicos que se desarrollan en la Tierra. El sol es la fuente primordial de la energía que nuestro planeta ha recibido en el pasado, recibe en el presente y recibirá en el futuro. De acuerdo con Carvajal (2009) citado por Bahamón y Torres (2013), el sol siempre ha sido un objeto de adoración, ha dado luz, calor y seguridad a la humanidad.

Según Calvin (2000) citado por Bahamón y Torres (2013), La energía solar, generada en el centro del Sol tarda un millón de años para alcanzar la superficie solar. Cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio. En el proceso se liberan 5 millones de toneladas de energía pura; por lo cual, el Sol cada vez se vuelve más ligero.

3.5.5.2. Radiación solar

Según Solís (2005) citado por Bahamón y Torres (2013), la distancia Tierra-Sol, el diámetro solar y su temperatura es lo que determina el flujo de energía casi constante que incide en la superficie terrestre y aunque existen varios modelos para calcularlo, el valor comúnmente aceptado es de 1.354 W/m^2 . Este valor se define cómo el flujo de energía proveniente del Sol que incide sobre una superficie de un metro cuadrado, ubicada fuera de la atmósfera terrestre, perpendicular a los rayos solares y a una distancia media de la Tierra al Sol y es conocido como Constante Solar.

Además de los gases que conforman la atmósfera terrestre, la radiación encuentra diferentes “obstáculos” que hacen variar su intensidad. Las nubes, por ejemplo, desvían los rayos solares y provocan que la intensidad de éstos al llegar a la superficie terrestre sea menor. A partir de estos fenómenos podemos clasificar a la radiación solar, como radiación directa o difusa. Ver fig.4.

3.5.5.2.1. Aspectos básicos de la radiación solar

Según Hernández et al (2001), la cantidad de energía solar que llega a un punto de la superficie terrestre depende de la inclinación con que los rayos solares inciden sobre la superficie, ya que cuanto más perpendiculares sean dichos rayos (a la superficie terrestre) mayor será la intensidad de radiación solar. La mayor o menor perpendicularidad de los rayos solares varía con la situación del sol, que depende de la localización geográfica (latitud del lugar), de la época del año en la que nos encontremos y de la hora del día.

3.5.5.2.2. Declinación solar (Δ)

Según Montero (2005) citado por Bahamón y Torres (2013), el eje rotatorio de la tierra forma con el eje normal al plano de la elíptica un ángulo constante igual a 23.5° . Debido a esto, el ángulo de los rayos solares con el plano del ecuador, denominado declinación solar, δ , varía entre 23.45° (solsticio de verano) y -23.45° (solsticio de invierno)

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (1)$$

Dónde: d_n = el número de día del año (1 para el 1 Enero y 365 para el 31 Diciembre)

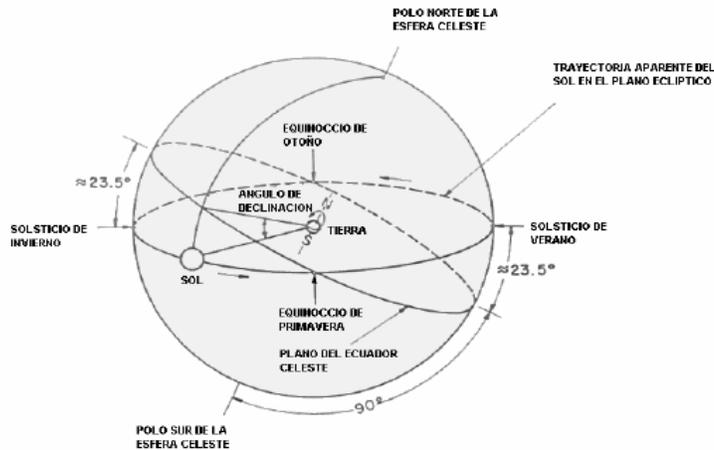


Figura 1. Esfera celeste mostrando el movimiento aparente del sol y el ángulo de declinación solar (IGNACIO, 2008) citado por Bahamón y Torres 2013.

3.5.5.2.3. Ángulo de inclinación de los rayos solares

Según Solís (2005) citado por Bahamón y Torres (2013), el Angulo de inclinación es importante, debido a que la radiación solar es menos intensa cuando el ángulo de

incidencia es mayor. Al mediodía, cuando los rayos solares caen perpendicularmente a la superficie terrestre “ángulo de incidencia nulo” son más intensos que al atardecer y/o amanecer „ángulo de incidencia máximo”. La cantidad de masa atmosférica que atraviesa los rayos solares varía con el ángulo de incidencia.

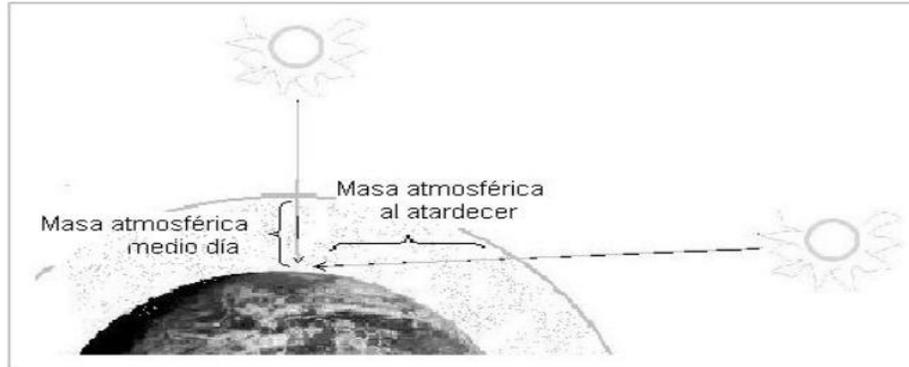


Figura 2. La masa atmosférica que los rayos solares atraviesan medio día y/o atardecer (SOLÍS, 2005). Citado por Bahamón y Torres (2013).

3.5.5.2.4. Inclinación del secador solar tipo túnel

Según Ignacio (2008) citado por Bahamón y Torres (2013), para estimar la inclinación del secador y captar la máxima radiación solar posible, es necesario conocer la altura del sol (figura), de tal forma que la incidencia de los rayos del sol sea normal a la superficie del secador.

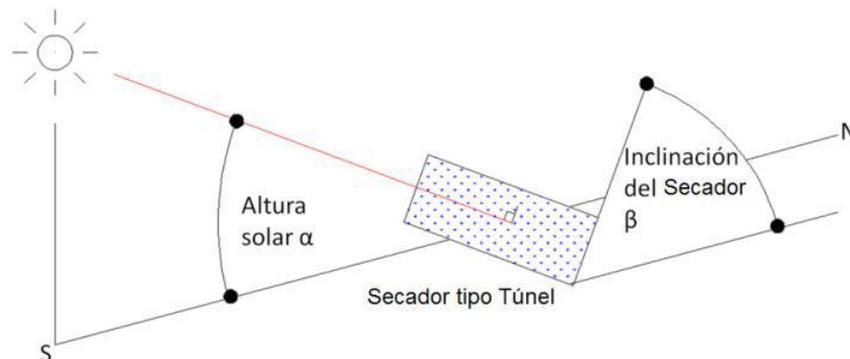


Figura 3. Inclinación del secador tipo túnel (IGNACIO, 2008), Citado por Bahamón y Torres (2013).

3.5.5.2.5. Determinación altura solar (A)

Según Montero (2005) citado por Bahamón y Torres (2013), la altura solar α (también llamada elevación solar) es la altura angular del sol sobre el horizonte celestial del observador. Este es el ángulo que varía entre (0-90°), la altura solar es el complemento del ángulo cenital y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \sin^{-1}[(\cos \varphi) \cdot (\cos \delta) \cdot (\cos w_h) + (\sin \varphi) \cdot (\sin \delta)] \quad (2)$$

Dónde:

φ : latitud del lugar de estudio

w_h : (12-Hr deseada) $\cdot 15^\circ$

δ : declinación solar en grados

α : altura solar

3.5.5.2.6. Determinación ángulo de inclinación

Según Rivera (2004) citado por Bahamón y Torres (2013), el ángulo de inclinación del secador tipo túnel se determina con la siguiente:

$$\beta_c = 180 - (90 + \alpha) \quad (3)$$

Dónde:

β_c : Ángulo de inclinación del secador tipo túnel

α : altura solar

El ángulo de inclinación de los secadores solares sobre un plano horizontal se determina en función de la latitud geográfica y del período de utilización de la instalación, de acuerdo con los valores de la siguiente tabla:

Tabla 1. Corrección de ángulo de inclinación.

PERÍODO DE UTILIZACIÓN	INCLINACIÓN DE LOS SECADORES SOLARES
Anual, con consumo constante	$\beta^{\circ}c$
Preferentemente en invierno	$(\beta+10)^{\circ}$
Preferentemente en verano	$(\beta - 10)^{\circ}$

Fuente: RIVERA, (2004), citado por Bahamón y Torres (2013).

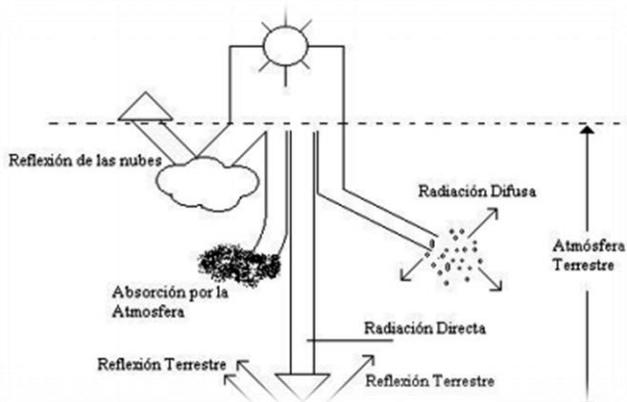


Figura 4. Interacción de la radiación con la atmósfera terrestre (SALDAÑA et al., 2004), Citado por Bahamón y Torres (2013).

3.5.5.2.7. Radiación directa

Es la radiación solar que llega en línea recta a la superficie de la tierra sin haber sido difundida por la atmósfera; forma sombras definidas ante algún obstáculo y puede enfocarse por medios ópticos.

3.5.5.2.8. Radiación difusa

Es radiación solar que se dispersa al atravesar la atmósfera por causa de moléculas de aire, vapor de agua, polvo, etc., de tal modo que llega a la superficie de la tierra como si procediera de todo el cielo. No da sombras nítidas ni puede enfocarse con un instrumento óptico.

La suma de estos dos tipos de radiación se conoce como la Radiación Global. Según Zambrano (2009) citado por Bahamón y Torres (2013), nos indica que la superficie de la tierra recibe un total de 51% de la radiación global, de los cuales 26 partes lo hacen en forma de radiación directa y 25 como radiación difusa; del mismo 51%, 5 partes se ceden hacia el exterior, por lo que tan solo el 46% constituye la radiación que efectivamente alcanza a la superficie terrestre.

3.5.5.3. Secado artificial por convección forzada

Según UNIVERSIDAD DE NARIÑO VIRTUA (2013), el secado artificial consiste en el empleo de métodos de secado mecánico, como estufas y/o generadores de aire seco caliente, en las que la masa de cacao se encuentra estacionaria y se hace pasar una corriente de aire seco y caliente bajo la masa de cacao, hasta alcanzar una humedad en grano entre 6.5 y 7.5 %. Como fuente de calor se puede usar leña, carbón mineral, diésel o electricidad. Con este método la duración del secado puede variar entre 20 a 36 horas con temperaturas entre 50 y 60°C.

Según MORENO Y SANCHEZ (1989), tanto en el secado natural como en el artificial se recomienda que la capa no supere los cinco centímetros de grosor, además en ambos casos se debe remover la masa con cierta frecuencia para que haya uniformidad en el secado. El volteo de cacao se hace con rastrillo o pala de madera, nunca con instrumentos metálicos.

3.5.5.3.1. Aforo de un ventilador

Según la guía de laboratorio USCO (2013), cualquier dispositivo que produce una corriente de aire puede denominarse ventilador. Una de las características mediante la cual se clasifican los ventiladores es la naturaleza del flujo que pasa a través de las aspas del rodete. Los rodetes pueden ser de flujo o axial, radial y transversal.

Para efectos del presente trabajo se utilizó un ventilador tipo centrífugo. En estos el aire entra en forma paralela a su eje, se mueve radialmente a través de sus álabes y es descargado tangencialmente por entre su carcasa. Son los más indicados para presiones fuertes y caudales débiles.

Al funcionar, los ventiladores desarrollan una presión total (p_t) conformada por la presión estática (P_e) que es la fuerza que el aire ejerce perpendicularmente a la pared del ducto, que vence los rozamientos y otras resistencias ofrecidas al paso del aire. La presión dinámica o presión de velocidad (P_v) es la presión correspondiente a la velocidad promedio en la salida del ventilador.

$$P_t = P_v + P_e \quad (4)$$

La carga de presión debida a la velocidad se puede determinar con el tubo de Pitot, el cual consiste en dos tubos concéntricos; el tubo exterior está perforado lateralmente por donde se trasmite la presión total estática; el flujo interior que está frente al flujo, transmite la presión total. Estas presiones se miden al unir la salida de cada uno de los tubos concéntricos respectivamente a un manómetro en forma de U.

Cuando se usa el tubo de Pitot la lectura efectuada no es directamente la velocidad, debe observarse que hay que convertir las lecturas antes de realizar otra operación.

Debido a que la velocidad del aire varía en los diferentes puntos de la sección transversal, es necesario tener una velocidad promedio. En ductos circulares, se divide la sección en una serie de áreas imaginarias de igual tamaño y encontrando la presión de velocidad en el centro efectivo de tales divisiones.

Otra forma de determinar la velocidad para calcular el volumen, es utilizando un anemómetro, aplicando los principios propios de ajuste a dicha velocidad; a mas que

dicho equipo debe calibrarse constantemente, su uso está limitado a velocidades demasiado bajas.

La mejor forma de describir las características del comportamiento de un ventilador es por medio de sus gráficas. Generalmente se emplea el caudal Q (m³/s) como abscisa y como ordenada cualquier otra variable, como Presión (mmca), potencia de entrada (HP), eficiencia *n*.

Las ecuaciones empleadas para los cálculos son:

$$Q = A * V \tag{5}$$

$$V = 4.043\sqrt{P_v} \tag{6}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \tag{7}$$

$$pf = \frac{0,02 * La}{\theta P_v} \tag{8}$$

$$n = \frac{Q\left(\frac{m^3}{min}\right) * Pt(mmca)}{4562,7} \tag{9}$$

Dónde:

Q = Caudal de aire del ventilador (m³/s)

A = Área sección transversal del tubo empleado para la medición. (m²)

V = Velocidad del ventilador (m/s)

P_v = Presión de velocidad (mm.c.a)

D = Diámetro del tubo (m)

pf= Perdidas por fricción en la tubería.

La= longitud de la tubería (pies)

θ= diámetro del ducto (pies)

n= eficiencia

Pt= presión total (mmca)

3.6. Mecanismos y cinética de secado

Según Madariaga citado por CERQUERA (2006), un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa. Para esto es necesario conocer los elementos más útiles de la transferencia de calor y masa que actúan en los secadores, estas dependen de una serie de factores que van desde condiciones internas a externas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del aire, y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido sino de las condiciones del aire y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el aire y la superficie del material, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del aire, comportándose como una superficie de agua libre.

Las condiciones internas están definidas por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir, que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del aire, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante será las propiedades del material.

Cuando se seca un material se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- Transferencia de masa como movimiento de la humedad interna y líquido evaporado.

Según MENON AND MUJUNDAR, citados por CERQUERA (2006), independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde ésta al interior del sólido. Excepto en el caso del secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior. También se utiliza otro tipo de secado llamado secado por sublimación o liofilización.

En el secado por convección el calor necesario para la evaporación del líquido se transmite por un agente gaseoso o un vapor que pasa por encima del sólido o lo atraviesa.

Según PERRY, citado por CERQUERA (2006), en el secado por conducción el producto que debe secarse se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido. En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes próximas.

Según LA PEÑA, citado por CERQUERA (2006), en el secado dieléctrico la energía es generada en el interior del propio material mediante un campo electromagnético de alta frecuencia en la zona de microondas (DE).

Según KASATKIN, citado por CERQUERA (2006), el secado por sublimación o liofilización es el que se realiza en estado de congelación y en condiciones de vacío. Según el método de transmisión del calor este procedimiento es análogo al secado por conducción pero debido a sus peculiaridades el secado por sublimación se destaca como un grupo especial.

3.6.1. Movimientos de la humedad dentro del material

Según PERRY, citado por CERQUERA (2006), cuando se produce la evaporación superficial debe haber un movimiento de humedad desde las profundidades del material hacia la superficie. La naturaleza de este movimiento influye en el secado en los períodos de caída del régimen (disminución de la tasa de secado).

A continuación se presentan algunas teorías que intentan explicar el movimiento de la humedad y la relación de ésta con las curvas de régimen.

- **Difusión líquida:** se puede producir la difusión de la humedad líquida debido a los gradientes de concentración entre las profundidades del material, donde la concentración es alta y la superficie donde ésta es baja.
- **Movimiento capilar:** la humedad no-límite en sólidos granulares y porosos tales como arcillas, pigmentos de pinturas y otros semejantes, se traslada a través de capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial. Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos de humedad dentro del sólido hasta la superficie de secado a medida que se lleva a cabo el secado; al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado.
- **Difusión de vapor:** especialmente si se suministra calor a una superficie de un material mientras en otra el secado continúa, se puede lograr la evaporación de la humedad debajo de la superficie difundiéndola hacia afuera como vapor.
- **Presión:** durante el secado, debido al cambio en la concentración de la humedad en las capas externas del material, se puede compeler la humedad hacia la superficie.

Usualmente solo se puede conjeturar sobre cuál de los mecanismos de transferencia de masa es el apropiado para cada material en particular, requiriéndose del apoyo del trabajo más o menos empírico de los regímenes experimentales de secado.

3.6.2. Determinación del contenido de Humedad

Según la guía de laboratorio USCO (2013), la humedad en los productos agrícolas es uno de los parámetros más importantes a controlar en los diferentes procesos a que son sometidos en la postrecolección, por esta razón es importante conocer los métodos empleados para su determinación.

El contenido de humedad de un producto es usualmente expresado en base húmeda o en base seca. El contenido de humedad en base húmeda (%Hbh) indica el porcentaje que representa el peso del agua en relación con el peso total del producto, que incluye el peso de la materia seca más el peso del agua. Este método tiende a conceder una incorrecta expresión cuando es aplicado al producto en caliente, pues la humedad no es uniforme. Para facilitar los cálculos en los experimentos de laboratorio es frecuente expresar la humedad en base seca (%Hbs), la cual indica el contenido del agua en relación al peso de la materia seca, de tal manera que su valor indica directamente el contenido de humedad.

$$\%Hbh = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad (10)$$

$$\%Hbs = \frac{P_i - P_f}{P_f} * 100 \quad (11)$$

Dónde:

P_i = Peso inicial de la muestra, gr.

P_f = Peso final de la muestra, gr.

H_{bh} = Humedad en base húmeda, %

H_{bs} = Humedad en base seca, %

Los valores de humedad en base seca y base húmeda pueden ser convertidos de una a otra forma con las siguientes expresiones:

$$\%Hbs = \frac{\%Hbh}{100 - \%Hbh} * 100 \quad (12)$$

$$\%Hbh = \frac{\%Hbs}{100 + \%Hbs} * 100 \quad (13)$$

Los procedimientos para la determinación del contenido de humedad están clasificados como primarios o directos y secundarios o indirectos.

En los métodos directos la humedad es removida del grano y la cantidad se determina por diferencias de peso o por medición del volumen. En el método del "horno o estufa" la humedad es removida por convección forzada, utilizando un ventilador incorporado al horno para hacer circular aire caliente (horno-aire).

3.6.3. Curva de secado

Según TREYBAL, citado por CERQUERA (2006), la cinética de secado de un material se refiere a la dependencia de la humedad (x) del material y de la intensidad de su evaporación con respecto al tiempo, o variables relacionadas con ésta, como la propia humedad o las condiciones de operación del equipo (flujo de aire, temperatura del aire de secado).

La intensidad de evaporación se determina a través de la velocidad de secado, que es el cambio de la humedad, en base seca, en el tiempo. A partir de las curvas de cinética de secado (x vs t , dx/dt vs x), que deben ser obtenidas a nivel de laboratorio, puede tenerse una idea del tiempo de secado, del consumo de energía, del mecanismo de migración de humedad, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables del proceso tales como: temperatura (del aire de secado y del producto), humedad de entrada (del aire de secado y del producto), velocidad del aire y otras.

Según MENON AND MUJUNDAR, citados por CERQUERA (2006), con los datos obtenidos durante la prueba de secado o sea de la variación de la humedad del producto con el tiempo, puede hacerse un gráfico de contenido de humedad en función del tiempo. Este será útil para la determinación directa del tiempo necesario en el secado discontinuo de grandes partidas bajo las mismas condiciones de secado.

3.6.4. Tasa de secado

Según OLIVEIRA (2005) citado por Henao (2007), llegó a la conclusión de que las características específicas de cada producto, junto con las propiedades del aire de secado y el medio de transferencia de calor adoptaron determinar diferentes condiciones de secado. Sin embargo, la transferencia de masa y calor entre el aire de secado y el producto es un fenómeno común a cualquier condición de secado. El proceso de secado sobre la base de la transferencia de calor y masa se puede dividir en tres períodos”.

El primer periodo representa el inicio del secado. Durante este periodo hay un aumento gradual de la temperatura y la presión de vapor del producto debido a que el material era inicialmente por debajo de la temperatura de secado. Estas elevaciones

han continuado hasta el punto de que la transferencia de calor es la transferencia de masa equivalente (agua).

El segundo período se caracteriza por una constante de velocidad de secado. El agua evaporada es agua libre. La transferencia de calor y de masa es equivalente y por lo tanto la velocidad de secado es constante. Mientras que cualquier cantidad de agua en la superficie del producto lo suficiente como para mantener la evaporación, la velocidad de secado es constante.

En el tercer período, la velocidad de secado disminuye. La cantidad de agua presente en la superficie del producto es más pequeña, reduciendo de este modo la transferencia de masa. Transferir calor no es compensada por la transferencia de masa, el factor limitante en esta fase es la reducción de migración de la humedad desde el interior a la superficie del producto. Los aumentos de la temperatura de productos, llegar a la temperatura del aire de secado. Cuando el producto llega al punto de la humedad equilibrio en comparación con el secado al aire, se termina el proceso.

Según Daudin (1983) citado por Henao (2007), los métodos para calcular la cinética de secado se aplican de manera diferente dependiendo del período de secado considerado. En el período de velocidad constante de secado, la transferencia de calor y la interfaz de masa de aire gobiernan producto secado y la fijación de la velocidad de secado, mientras que en el período de disminución de la tasa, limita las transferencias internas.

3.6.5. Período de disminución de la velocidad de secado

Según CRANK (1975) citado por Henao (2007), el periodo de velocidad decreciente de secado casi siempre se observa sólo para el secado de productos agrícolas y alimenticios. La complejidad de los fenómenos de secado conduce a muchos investigadores a proponer teorías y muchas fórmulas empíricas para predecir la velocidad de secado. Según Chirife (1981) citado por Henao (2007), los principales mecanismos de transporte durante la tasa decreciente son: la difusión de líquido, el flujo capilar y la difusión del vapor. Según Rey (1968) citado por Henao (2007), la difusión de vapor es el mecanismo predominante en la segunda fase de este periodo. La teoría de la difusión descansa exclusivamente en la ley de Fick, que establece que el flujo de masa por unidad de área es proporcional al gradiente de concentración de agua. Usando la ley de Fick, la ecuación de balance de masas de agua en el interior del producto, uno tiene:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla * (Def * \nabla X) \tag{14}$$

Según CRANK (1975) citado por Henao (2007), independientemente del trabajo en el secado, presenta una serie de soluciones de la ecuación de difusión para las condiciones iniciales y de contorno variaron. Sin embargo, estas soluciones se aplican a formas geométricas simples (cuerpos sólidos semi-infinitos, placas, cilindros y esferas.) y cuando la difusividad es constante o varía linealmente o exponencialmente con la concentración de agua para el caso de secado unidireccional en forma de sólido grueso de la placa usos $2L$ el sistema de coordenadas cartesianas, la ecuación se puede escribir como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (15)$$

Comúnmente utilizados son las siguientes condiciones iniciales y de contorno para el secado de los problemas:

$$X(z, t) = X(z, 0) = X_o \quad (16)$$

Humedad inicial Uniforme:

$$\frac{\partial X}{\partial z} = 0 ; z = 0 \quad (17)$$

Condición de simetría:

Humedad de equilibrio en la superficie:

$$X(z, t) = X(L, t) = X_{eq} \quad (18)$$

La solución de la ecuación (11) teniendo en cuenta las condiciones iniciales y de contorno y la aplicación de la siguiente fórmula para calcular el promedio de humedad en el tiempo:

$$\bar{X} = \frac{1}{L} * \int_0^L X(z, t) dz \quad (19)$$

Se puede expresar como:

$$RH = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} * \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i + 1)^2} \exp[-(2i + 1)^2 * \pi^2 * Def * \frac{t}{4L^2}]$$

(20)

Dónde:

- RH:** es la relación de humedad,
- L:** es el semi espesor de la capa (m),
- Def:** es la difusividad efectiva (m²/s),
- X:** es el contenido de humedad del producto en cada momento (gr de agua/ gr de materia seca),
- X₀:** es el contenido de humedad inicial,
- X_{eq}:** es el contenido de humedad de equilibrio
- t:** es el tiempo de secado (s).

Según Oliveira (2005) citado por Henao (2007), algunos supuestos deben cumplirse para la aplicación de este modelo:

- * La difusividad del agua se considera constante;
- * El producto se considera homogéneo;
- * El tamaño del producto permanece constante en el tiempo;
- * El movimiento del agua resulta en un gradiente de contenido de humedad en la partícula;
- * La superficie del producto inmediatamente entra en equilibrio con el aire de secado;
- * El límite de contenido de humedad es el contenido de humedad de equilibrio del producto.

Según OLIVEIRA (2005) citado por Henao (2007), el coeficiente de difusión (Def) es una difusividad efectiva, que incluye los efectos de todos los fenómenos pueden intervenir en la migración de agua, y su valor es siempre obtenido mediante el ajuste de las curvas experimentales. La solución de la ecuación de difusión utilizada es uno de los más simples y parece ser la principal razón de su empleo. Podemos entender la difusividad como la facilidad con la que el agua se elimina a partir del material. La difusividad varía cambiando las condiciones de secado (temperatura y velocidad del aire), es decir, no es una propiedad intrínseca del material, por lo que se acordó llamar a la difusividad efectiva.

3.6.6. Modelos empíricos de secado

Según Jaramillo (1990) citado por Henao (2007), en las aplicaciones de secado han desarrollado modelos teóricos, empíricos o semiempíricos, de acuerdo con los requisitos de las aplicaciones. Sin embargo, dado el gran número de variables que

intervienen en las ecuaciones teóricas y la complejidad de las soluciones analíticas, la gran mayoría de la investigación en el secado de capa fina considera expresiones de tipo empírico o, en el mejor de los casos, semi-empírica.

Sin embargo, ninguna de las ecuaciones de secado puede representar con precisión toda la gama de secado de un producto, que se divide en dos o tres regiones, o constante de velocidad de disminución de la tasa.

En general, las ecuaciones empíricas propuestas son del tipo mostrado por Lewis (1921) citado por Henao (2007):

$$\frac{\partial X}{\partial T} = -K(X - X_{eq}) \quad (21)$$

Integrando resulta;

$$RH = \exp(-kt) \quad (22)$$

Según López, et al., (1993), esta ecuación resulta de utilizar el primer término de la serie ($i = 0$) de la ecuación (20), para tiempos largos y geometrías planas. En este caso una constante o coeficiente de ajuste $\alpha = 1$, por lo que se le llama exponencial simple y ha sido propuesta para cereales como el trigo, arroz, cebada, maíz grano y para productos granulares, y en otros casos como en la ecuación de Henderson & Pabis donde $\alpha \neq 1$ o exponencial paramétrica:

$$RH = a \exp(-kt) \quad (23)$$

Siendo k la denominada constante de secado, de esta expresión es posible obtener el coeficiente de difusión efectiva D_{ef} , mediante linealización de los datos de RH aplicando el logaritmo natural, se obtiene una recta cuya pendiente representa el valor de k y de la cual mediante la ecuación (20) se despeja D_{ef} . El intercepto corresponde al coeficiente a .

$$K = \frac{\pi^2 D_{ef} * t}{4L^2} \quad (24)$$

Montes, Torres et al., 2008. Utilizaron en el “Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada”, un modelo de tipo cuadrático al que nombraron Modelo de Thomson:

$$RH = 1 + at + bt^2 \quad (25)$$

$$t = a \ln(RH) + b(\ln(RH))^2 \quad (26)$$

De igual forma López, Ita et al. (2007), En su trabajo “modelado de la cinética de secado del nopal (*Opuntia ficus indica*) con energía solar” utiliza dentro de sus ajustes de datos el modelo de la ecuación 26, pero lo nombra como Modelo de Wang y Singh.

Según Okos et al. (1992) citado por López Raymundo (1993), la influencia de la temperatura sobre el coeficiente de Difusividad efectiva (**Def**) puede establecerse mediante la relación de Arrhenius:

$$Def = Do \exp(-Ea/RT) \quad (27)$$

Dónde:

- Ea:** es la energía de activación de la difusión (kJ/mol),
- R:** es la constante de los gases ($8,314 \times 10^{-3}$ (kJ/mol*K)),
- T:** la temperatura absoluta (K),
- Do:** es la difusividad para contenidos elevados de humedad.

Según Askeland (1998), Cuando se incrementa la temperatura, también se incrementa el coeficiente de difusión y el flujo de átomos. A temperaturas más altas la energía térmica suministrada a los átomos en difusión permite que estos venzan la barrera de energía de activación y se muevan con mayor facilidad a nuevos sitios de la red.

La ecuación 27 se deduce a partir del análisis estadístico sobre la probabilidad de que los átomos tengan al energía adicional (**Ea**) necesaria para moverse. Un átomo que se difunde debe oprimir a los átomos circundantes para llegar a su nuevo sitio. El átomo originalmente está en una ubicación de baja energía y relativamente estable. A fin de pasar a un nuevo sitio el átomo debe vencer esta barrera energética.

Normalmente se requiere menos energía para hacer pasar un átomo intersticial entre los átomos circundantes, en consecuencia, en la difusión intersticial las energías de activación son menores que en la difusión por vacancias.

Para obtener los valores de energía de activación (**Ea**) se hace Ln (**Def**) y se grafica vs el inverso de la temperatura absoluta ($1/T(K)$), y de la pendiente obtenida se despeja:

$$Pendiente = \frac{Ea}{R} \quad (28)$$

3.7. Análisis estadístico de los modelos

Según Browne e Cudeck, (1993) citado por Michalewicz, et al. (2011), para la evaluación cuantitativa de la relación entre los datos obtenidos de las curvas ajustadas y los datos experimentales, es necesario el uso de parámetros estadísticos como el coeficiente de determinación r^2 , el chi-cuadrado y el error cuadrático medio (RMSE).

El Coeficiente de determinación (r^2), la cual indica que tan exactos son los valores simulados de los reales en función de la línea recta, esto es, la proximidad de todos los valores tener el mismo valor para cada condición en el tiempo, temperatura y velocidad del aire. A pesar de esto, no siempre se puede afirmar que para valores de (r^2) próximos de la unidad, representan un buen ajuste, ya que es posible obtener valores elevados de (r^2) cuando la relación entre los datos reales y simulados no representa un comportamiento lineal.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (RHpred, i - RHexp, i)^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{RHpred} - RHexp, i)^2} \quad (29)$$

Según Browne e Cudeck, (1993) citado por Michalewicz, et al. (2011), el chi-cuadrado reducido (χ^2), es otro parámetro que compara las variaciones entre resultados experimentales y previstos. Este parámetro permite determinar realmente se es posible representar un conjunto de valores como distribución normal, y verificar se este conjunto se encuentra dentro de los valores de probabilidad que permiten definir el mismo.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (RHexp, i - RHpred, i)^2}{N - n} \quad (30)$$

Según Browne e Cudeck, (1993) citado por Michalewicz, et al. (2011), el error cuadrático medio (**RMSE**), es la variabilidad media de la distancia entre el valor previsto y el observado. Este índice da idea de la diferencia existente entre la matriz de variancia y la de covariancia de la muestra y la matriz del modelo obtenido, partiendo del presupuesto que el modelo es adecuado. Los valores superiores a 0,10 evidencian un ajuste débil, cuando oscilan entre 0,08 y 0,10 reflejan un ajuste mediocre, entre 0,08 y 0,06 un ajuste razonable y cuando son inferiores a 0,06 indican un buen ajuste, cuando el modelo es perfecto el RMSE es igual a cero, en este sentido, cuanto más próximo de 0 (cero) sea el valor, mayor es la proximidad entre la matriz de variancias y covariancias estimada y la matriz de los datos.

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RH_{pred,i} - RH_{exp,i})^2 \right)^{1/2} \quad (31)$$

3.8. Análisis sensorial de alimentos

Según El Instituto de Alimentos de EEUU (IFT) citado por Hernández (2005), define la evaluación sensorial como “la disciplina científica utilizada para evocar, medir analizar e interpretar las reacciones a aquellas características de alimentos y otras sustancias, que son percibidas por los sentidos de la vista, olfato, gusto, tacto y oído” .

3.8.1. Los cinco sentidos y las propiedades sensoriales

Según FERNANDEZ (2005), el sistema sensitivo del ser humano es una gran herramienta para el control de calidad de los productos de diversas industrias. En la industria alimentaria la vista, el olfato, el gusto y el oído son elementos idóneos para determinar el color, olor, aroma, gusto, sabor y la textura quienes aportan al buen aspecto y calidad al alimento y sean aceptados por el consumidor.

3.8.1.1. El olor

Es la percepción por medio de la nariz de sustancias volátiles liberadas en los alimentos; dicha propiedad en la mayoría de las sustancias olorosas es diferente para cada una. En la evaluación de olor es muy importante que no haya contaminación de un olor con otro, por tanto los alimentos que van a ser evaluados deberán mantenerse en recipientes herméticamente cerrados.

3.8.1.2. El aroma

Consiste en la percepción de las sustancias olorosas y aromáticas de un alimento después de haberse puesto en la boca. Dichas sustancias se disuelven en la mucosa del paladar y la faringe, llegando a través del eustaquio a los centros sensores del olfato. El aroma es el principal componente del sabor de los alimentos, es por eso que cuando tenemos gripe o resfriado el aroma no es detectado y algunos alimentos sabrán a lo mismo. El uso y abuso del tabaco, drogas o alimentos picantes y muy condimentados, insensibilizan la boca y por ende la detección de aromas y sabores.

3.8.1.3. El gusto

El gusto o sabor básico de un alimento puede ser ácido, dulce, salado, amargo, o bien puede haber una combinación de dos o más de estos. Esta propiedad es detectada por la lengua. Hay personas que pueden percibir con mucha agudeza un determinado gusto, pero para otros su percepción es pobre o nula; por lo cual es necesario

determinar que sabores básicos puede detectar cada juez para poder participar en la prueba.

3.8.1.4. El sabor

Esta propiedad de los alimentos es muy compleja, ya que combina tres propiedades: olor, aroma, y gusto; por lo tanto su medición y apreciación son más complejas que las de cada propiedad por separado.

El sabor es lo que diferencia un alimento de otro, ya que si se prueba un alimento con los ojos cerrados y la nariz tapada, solamente se podrá juzgar si es dulce, salado, amargo o ácido. En cambio, en cuanto se perciba el olor, se podrá decir de qué alimento se trata. El sabor es una propiedad química, ya que involucra la detección de estímulos disueltos en agua aceite o saliva por las papilas gustativas, localizadas en la superficie de la lengua, así como en la mucosa del paladar y el área de la garganta. Estas papilas se dividen en 4 grupos, cada uno sensible a los cuatro sabores o gustos:

Papilasiformes: Localizadas en la punta de la lengua sensible al sabor dulce.

Fungiformes: Localizada en los laterales inferiores de la lengua, detectan el sabor salado.

Coraliformes: Localizadas en los laterales posteriores de la lengua, sensible al sabor ácido.

Caliciformes: Localizadas en la parte posterior de la cavidad bucal detectan sabor amargo.

Por ello es importante en la evaluación de sabor la lengua del juez esté en buenas condiciones, además que no tenga problemas con su nariz y garganta. Los jueces no deben ponerse perfume antes de participar en las degustaciones, ya que el olor del perfume puede inferir con el sabor de las muestras.

3.8.1.5. La textura

Es la propiedad de los alimentos apreciada por los sentidos del tacto, la vista y el oído; se manifiesta cuando el alimento sufre una deformación. La textura no puede ser percibida si el alimento no ha sido deformado; es decir, por medio del tacto podemos decir, por ejemplo si el alimento está duro o blando al hacer presión sobre él. Al morderse una fruta, más atributos de textura empezarán a manifestarse como el crujido, detectado por el oído y al masticarse, el contacto de la parte interna con las mejillas, así como con la lengua, las encías y el paladar nos permitirán decir de la fruta si presenta fibrosidad, granulosidad, etc.

4. MATERIALES Y METODO

4.1. Materiales

- ✓ Materia prima
 - 3 kilos de cacao tipo hibrido (*Theobroma cacao L.*) por ensayo.
- ✓ Determinación de humedad del grano
 - Horno (horno universal 30-220°C ; 400 *320 *250 mm ; marca MERMET ; referencia UM 200)
 - Higrómetro de marca Kett referencia PM-600
 - Balanza semi-analítica (Lexus Electronic Scales – capacidad 6 kg-precisión 0,1 gr)
 - Cajas de Petri
- ✓ Determinación características del aire
 - Termo-Higrómetro digital modelo 303C (rango de temperatura de -50 a 70°C; rango de humedad de 10 % - 95 %.)
- ✓ Determinación de características físicas del grano
 - Calibrador de vernier (escala métrica 1,50 mm – precisión 0,1 mm)
 - Probetas (Determinación de densidad aparente y real)
- ✓ Proceso de fermentación
 - Caja de madera de (16 x 25 x 22) cm libres, levantadas a 5 cm del suelo, con orificios en la parte inferior
- ✓ Determinación de la cinética de secado
 - Secador eléctrico por convección forzada (INGESEC, modelo Laboratorio 40)
 - Secador solar parabólico

4.2. Método

Se procedió a la caracterización física de granos de cacao provenientes de frutos híbridos del “Complejo Agroindustrial y Turístico Cacaotero Villa Stefany” ubicado en La Vereda Termopilas del Municipio de Rivera-Huila.

4.2.1. Selección y desgrane de las mazorcas

Se realizó una selección cuidadosa de las mazorcas, con el fin de trabajar solamente con mazorcas en buen estado. El desgrane consiste en partir las mazorcas, lo que por regla general se hace a mano, extraer los granos separados de la placenta para colocarlos luego a fermentar. Ver fig.5.



Figura 5. Selección y desgrane de mazorcas.

4.2.2. Caracterización física

Para la caracterización física del **cacao tipo híbrido** se tuvieron en cuenta las siguientes variables:

- * Peso promedio de 15 mazorcas completas
- * Peso promedio de grano en baba de 15 mazorcas
- * Peso promedio del grano en baba de 35 granos
- * Peso promedio del grano en seco de 35 granos
- * Índice de mazorca (número de mazorcas/kg)
- * Densidad aparente (kg/m^3)
- * Densidad real (kg/m^3)

4.2.3. Determinación del diámetro - Espesor (ϵ)

Para la determinación del espesor, se tomaron 35 granos de cacao tipo híbrido, a los cuales se les midió el diámetro horizontal y vertical con el pie de rey, con el fin de obtener el espesor promedio inicial del grano. Ver fig.6.



Figura 6. Medición de diámetro.

4.2.4. Determinación de la densidad aparente y real del grano

Para la determinación de la densidad aparente y real del producto, se tomó la cantidad de grano contenida dentro de una mazorca. Para la densidad aparente se colocó el

grano extraído en una probeta de 500 ml y se tomó la medida del volumen aparente; por ultimo para la densidad real se tomaron 200 ml de agua en una probeta de 500 ml y se introdujo el grano para determinar su volumen real. Ver fig. 7.

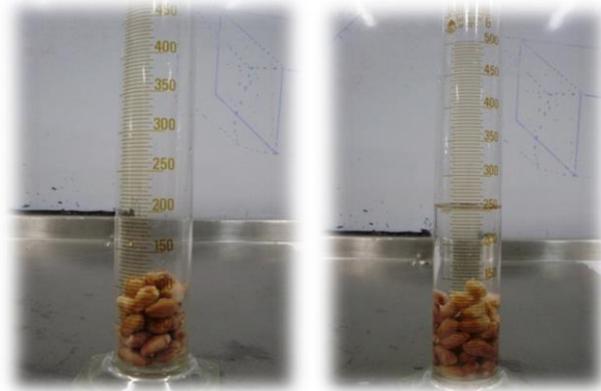


Figura 7. Determinación de la densidad aparente y real del grano.

Los datos obtenidos para la caracterización física del grano de cacao se relacionan en el ítem de resultados. Ver tabla 3.

4.2.5. Proceso de fermentación



Figura 8. Proceso de fermentación.

El grano de cacao en fresco se depositó en cajones de madera de (16 x 25 x 22) cm libres, levantadas a 5 cm del suelo, y con orificios que permiten la salida de los lixiviados que se desprenden durante el proceso. La masa de grano se cubrió con hojas de plátano y una bolsa de plástico negra para proteger y garantizar que inicie la fermentación, la cual tuvo una duración de 6 días, contados desde el momento en que

se colocó la masa de grano fresco dentro del fermentador. Posteriormente se dejó sin revolver el grano durante los 2 primeros días y luego a partir del día 3 se removió diariamente hasta el sexto día en que termina el proceso. Ver fig.8.

4.2.6. Proceso de secado

4.2.6.1. Secado al sol

Del proceso de fermentación se obtuvo aproximadamente 2000 gr de cacao que se extendió en una fina capa de 1 cm de espesor aproximadamente, sobre una bandeja de malla plástica con un área de (42 x 45) cm, elevado a 10 cm del suelo, los granos se mezclaron cada hora para asegurar la uniformidad. La temperatura y la humedad del ambiente se midieron usando el termo-higrómetro digital modelo 303C. El secado se llevó a cabo durante 4 días: en el primero, dejando al sol durante 2 horas, el segundo 4 horas, el tercer día 6 horas y cuarto día completo. Ver fig.9.



Figura 9. Secado al sol.

4.2.6.2. Secado por convección forzada

Para una capa delgada de cacao fermentado de 1 cm de espesor aproximadamente, las temperaturas empleadas en el secado del grano de cacao fueron de 40, 50 y 60°C, con oscilaciones de $\pm 3^\circ\text{C}$ y una velocidad del aire de secado de (0,26 m/s), esta velocidad se calculó teniendo en cuenta que por limitación del equipo solo se podía alcanzar la temperatura de 60°C con una apertura del ventilador al 25%.

Se registraron los datos cada hora con un tiempo inicial de secado en el primer día de 5 horas, un reposo de 12 horas, en el segundo día 6 horas y un reposo de 24 horas (a excepción del tratamiento a 60 °C, que en el segundo día se alcanzó la humedad de equilibrio a las 8 horas de tratamiento), en el tercer día para los tratamientos de 50 y 40 °C, se le dio 6 horas de secado, siendo suficiente para el tratamiento a 50°C y luego de otro reposo de 12 horas se completó el secado para tratamiento a 40 °C hasta diferencia de pesos mínima (H_{eq}). Ver fig.10.



Figura 10. Secado por convección forzada.

4.2.7. Determinación de la humedad

Según la NTC 1252, para determinar la humedad inicial ($t=0$) de los granos se tomaron 3 muestras, cada una de 10 gr de cacao tipo híbrido, las cuales fueron representativas de la cantidad de cacao con que se trabajó. Luego fueron pesadas en la balanza para determinar su peso inicial. Ver fig.11.



Figura 11. Determinación de humedad inicial.

- Para realizar este procedimiento se utilizó el método de la estufa, a una temperatura de 103 °C, durante un tiempo de 24 horas.
- Pasado este tiempo se pesó cada una de las muestras y se obtuvo el valor del peso final.
- Luego de obtenidos los datos en el laboratorio se hizo el cálculo para la determinación del %Hbh (contenido de humedad en base húmeda) del grano de cacao de trabajó.

A partir de la ecuación (10) se calculó el porcentaje de humedad inicial en base humedad:

$$\%Hbh = \frac{10 \text{ gr} - 4,7 \text{ gr}}{10 \text{ gr}} * 100$$

$$\%Hbh = 53\%$$

4.2.7.1. Determinación de la humedad durante el secado

Para la determinar la humedad de los granos a partir del (t = 1), se utilizó el porcentaje de humedad inicial de la muestra para obtener el peso del agua (Wa) en todo el material (t = 0);

$$Wa = 53,3 \times 2115 \text{ gr} = 1127,3 \text{ gr de agua} \quad (32)$$

Luego, con este resultado y la diferencia de pesos entre el total del grano a secar y el primer registro del ensayo se calculó el Wa para el t= 1;

$$Wa1 = 1127,23 - (2115 \text{ gr} - 1613 \text{ gr}) = 625,3 \text{ gr de agua} \quad (33)$$

Con este dato y el primer peso registrado se calculó el porcentaje de humedad;

$$\%H = \frac{625,3 \text{ gr}}{1613 \text{ gr}} * 100 = 38,76\% \quad (34)$$

El procedimiento se repitió así para cada tiempo y tomando como base los datos del tiempo anterior. Se hizo uso de la herramienta Excel de Microsoft Office 2010, ordenando los datos de peso (gr) en columnas correspondientes a cada tiempo y hasta alcanzar humedad de equilibrio.

Al finalizar los ensayos se comprobaron los porcentajes de humedad del producto resultante con la colaboración del humidímetro de marca Kett referencia PM-600 facilitado por **Casa Luker**. Ver fig.12.



Figura 12. Determinación de humedad final.

Muestra de cálculos para relación de humedad (RH), secado al sol, tiempo 2, a partir de la ecuación (20):

$$RH = \frac{(42,4 - 5,96)}{(42,8 - 5,96)} = 0,988$$

Para determinar la tasa de secado se aplicó el logaritmo natural a cada relación de humedad obtenida, con los cuales se realizó la gráfica de Ln (RH) vs Tiempo (Hr). Ver fig.17.

$$\ln(RH) = \ln(0,988) = -0,0111$$

La difusividad efectiva **Def** (m²/s), se despejó de la ecuación (24), teniendo como base la constante de secado **k** para cada periodo y tratamiento, junto con el espesor de la capa de cacao promedio de 1 cm. Muestra de cálculo para el primer periodo en el secador parabólico.

$$Def = \frac{(k * 4L^2)}{t * \pi^2}$$

$$Def = \frac{(0,334 * 4 * (0,01 m)^2)}{82800 seg * \pi^2} = 1,6348 \times 10^{-11} (m^2/seg)$$

Basados en lo expuesto por Askeland 1998, el aumento de la temperatura en el material incrementa el coeficiente de Difusividad y el flujo de átomos. Se relacionaron los valores de difusividad obtenidos para las temperaturas de 40, 50 y 60 °C del secado artificial por convección forzada. El cálculo de la energía de activación se obtuvo de la pendiente de la recta obtenida en la relación de Arrhenius (fig.18), cuyos

datos se adjuntan en la tabla 17 de los anexos. Despejando de la ecuación 28, se obtuvo:

$$Ea = \frac{8106,6}{8,314 \times 10^{-3}} = 67,4 \left(\frac{kJ}{mol} \right)$$

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Parámetros de diseño de un secador solar en madera

* Declinación solar (δ)

$$\delta = 23,45 \times \text{sen}\left[\frac{360}{365}(dn + 284)\right]$$

dn= 212= 30 Julio de 2012

$$\delta = 23,45 \times \text{sen}\left[\frac{360}{365}(212 + 284)\right]$$

$$\delta = 18,2^\circ$$

* Altura solar (α)

$$\alpha = \text{sen}^{-1}[(\cos\varphi)(\cos\delta)(\cos Wd) + (\text{sen}\varphi)(\text{sen}\delta)]$$

φ = Latitud del lugar del estudio (Neiva= 2° 59' 55")

Wd= (12 - Hr deseada)*15= (hora deseada 10 Hr; Wd= 30°)

Δ = declinación solar en grados ($\delta= 18,2^\circ$)

$$\alpha = \text{sen}^{-1}[(\cos 2^\circ 59' 55'')(\cos 18,2^\circ)(\cos 30^\circ) + (\text{sen}2^\circ 59' 55'')(\text{sen}18,2^\circ)]$$

$$\alpha = 56,90^\circ \simeq 57^\circ$$

* Angulo de inclinación

$$\beta_c = 180 - (90 + \alpha)$$

$$\beta_c = 180 - (90 + 57^\circ)$$

$$\beta_c = 33^\circ$$

Aplicando la tabla 1, para una época de verano el ángulo de inclinación del secador parabólico es:

Preferentemente en verano $(\beta - 10)^\circ$

$$\beta c = (33 - 10)^\circ$$

$$\beta c = 23^\circ$$

5.2. Aforo del ventilador

Los datos de aforo obtenidos mediante la utilización del tubo de Pitot del ventilador centrífugo adjunto al secador INGESEC, se presentan en la **tabla 2**. A partir de los cuales se calculó para un porcentaje de apertura de 25% y un caudal de aire de 0,058 m³/s, la velocidad de trabajo durante el proceso de secado.

Tabla 2. Datos de aforo ventilador centrífugo.

%Abertura	Pt (mmca)	Pe (mmca)	Pv (mmca)	Pv corregido	pf	V(m/s)	A	Q(m ³ /s)	n
100	18	3	15	15,01916	0,01916	15,7	0,0081	0,127	0,030
75	27	13	14	14,02053	0,02053	15,1	0,0081	0,123	0,044
50	38	29	9	9,03194	0,03194	12,2	0,0081	0,099	0,049
25	40	37	3	3,09581	0,09581	7,1	0,0081	0,058	0,030
15	41	39	2	2,14371	0,14371	5,9	0,0081	0,048	0,025
Cerrado	45	45	0	0,00000	0,00000	0,0	0,0081	0,000	0,000

Teniendo en cuenta el área del lecho sobre el cual se extendieron los granos de cacao, cuyas dimensiones son de 0,6 m de largo x 0,37 m de ancho, arrojó un área de 0,22 m², despejando y sustituyendo en la ecuación (5) se obtuvo:

$$V = \frac{0,058 \text{ m}^3/\text{s}}{0,22 \text{ m}^2} = 0,26 \text{ m/s}$$

5.3. Caracterización física

En la **tabla 3** se agrupan los resultados medidos y calculados para la caracterización física de cacao tipo híbrido que se trabajó.

Tabla 3. Caracterización física de Cacao tipo Híbrido.

	Peso mazorca (gr)	Peso grano (gr)	Peso cascara (gr)	Peso en baba (35 granos)	Peso en seco (35 granos)	Volumen (ml)	Densidad aparente (gr/ml)	Volumen con agua (ml)	densidad real (gr/ml)
1	488,5	104,5	383,5	96	38	190	0,55	105	1,00
	611	118,5	492			195		115	
	838,5	121,5	716			200		120	
2	746	145	599	103	47,5	180	0,81	140	1,04
	588	180,5	404,5			215		170	
	621	126,5	493			170		125	
3	374	84	289	101	49	145	0,58	85	0,99
	488	105	382,5			175		110	
	400,5	115,5	285			190		115	
4	931,5	242,5	682,5	139	45,5	260	0,93	240	1,01
	792,5	177,5	613,5			245		180	
	974,5	162,5	811			210		165	
5	470,5	120,5	350	95,5	43	190	0,63	120	1,00
	518	86,5	430			195		90	
	607,5	102,5	504			195		100	
\bar{x}	630	133	495,7	106,9	44,6		0,70		1,01
CV	29,8	31,9	32	17	9,7		23,3		1,8

5.4. Condiciones ambientales

En la fig.13, Se representan las variables Temperatura ambiente T (°C) y Humedad Relativa (HR), para 12 horas promedio entre las 7:00 am a las 7:00 pm de los día en la ciudad de Neiva (Huila). (Ver 11 de los anexos), en las cuales es realizaron los ensayos de secado.

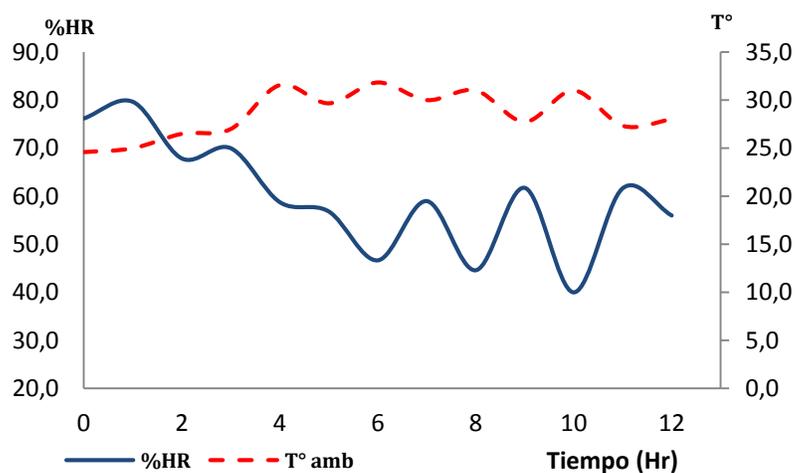


Figura 13. Condiciones ambientales para el secado.

Como se observa, el rango de temperatura ambiente varió aproximadamente entre 25 y 30 °C, con rangos de humedad relativa entre 40 y 80 %. La tendencia mostrada coincide con la temperatura inicial más baja y la humedad relativa más alta al inicio del día, pero que a medida que avanzan las horas y se eleva gradualmente la temperatura hasta un promedio de 28°C, la humedad relativa desciende y oscila entre el 50% a partir del mediodía.

5.5. Fermentación

En el proceso de fermentación se registraron y tuvieron en cuenta como parámetro de análisis los datos de temperatura de la masa de granos de cacao y de referencia la temperatura ambiente. Se realizaron gráficas de Temperatura (°C) vs Tiempo (Hr) fig.14, de las cuales se evaluó su comportamiento.

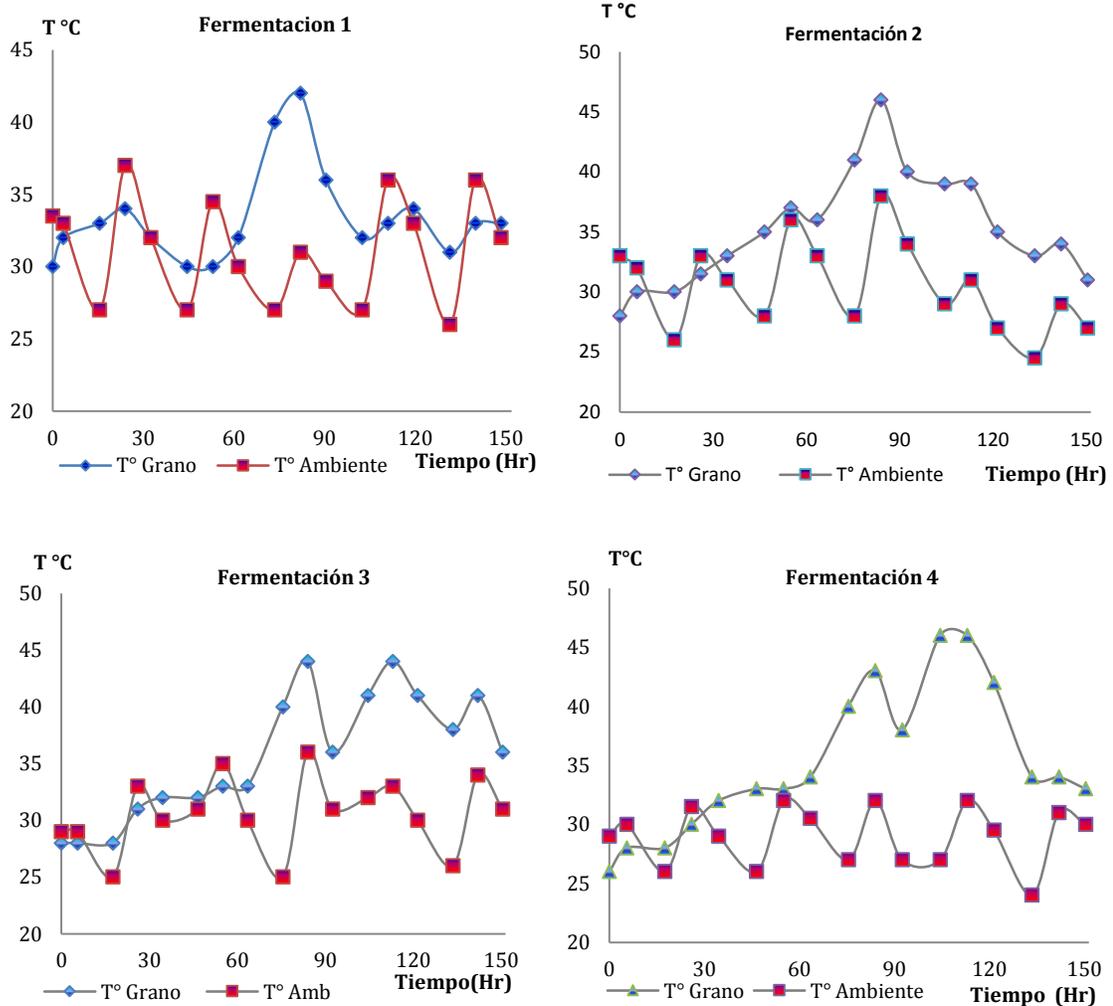


Figura 14. Gráficas de fermentación teniendo como parámetro la temperatura ambiente y de la masa de granos.

Independientemente del tiempo (entre 82 y 84 horas) que tardó el aumento de la temperatura en todas las muestras, llegando a 42, 46, 44 y 43 °C respectivamente. Se presentó un descenso muy rápido de la temperatura en todas las muestras y que en particular para la muestra 1 fue de 10°C y después fluctuó entre las temperaturas ambiente hasta el final, y para la muestra 2 fue de 6°C pero siguió bajando aún por encima de la temperatura ambiente. Contrario a lo anterior las muestras 3 y 4, después del descenso de 8 y 5 °C respectivamente, aumentaron sus temperaturas nuevamente para luego disminuir hasta el final del proceso.

Lo que se evidencia en todos y cada uno de los procesos de fermentación es la poca o nula uniformidad en el comportamiento de las temperaturas de la masa de grano, principal parámetro a cuidar para lograr un óptimo proceso. La causa más probable en la deficiencia de este se debió quizás, a la poca masa de cacao a fermentar, pues en los tiempos de remoción se pudo perder gran parte del calor evitando que se distribuyera de igual forma a todos los granos de la masa.

5.6. Curvas de secado

De los datos promedio obtenidos durante los ensayos de secado se graficaron las correspondientes curvas de secado RH (relación de humedad) vs tiempo (h), para el tratamiento al sol en secador parabólico y los tratamientos en el secador por convección forzada INGESEC a temperaturas de 40, 50 y 60 °C (fig.15 y 16), adicional a estos se contrastaron con los modelos de Lewis, Henderson & Pabis y Thompson, escogidos para evaluar el que mejor se ajuste con los datos experimentales mediante los parámetros estadísticos anteriormente mencionados.

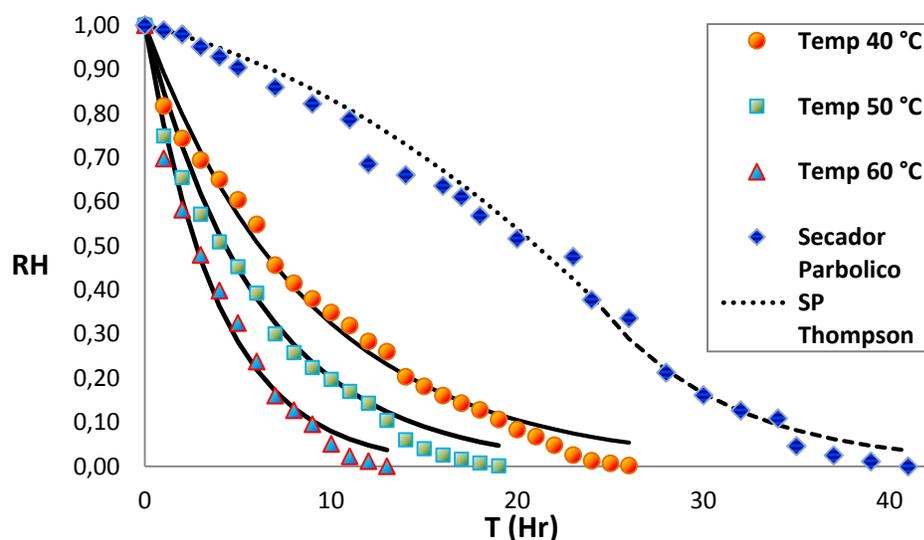


Figura 15. Curvas de secado y modelos de Lewis (convección forzada) y modelos de Thompson y Henderson & Pabis (Secador parabólico).

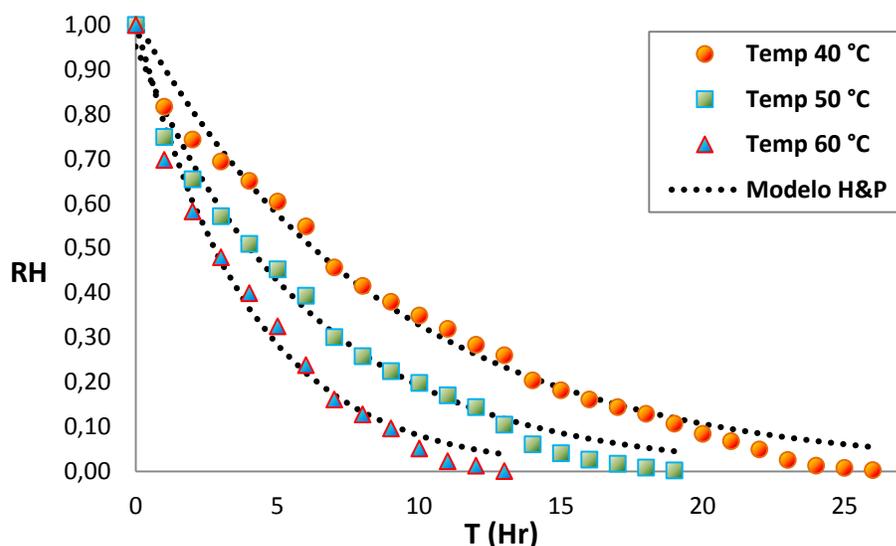


Figura 16. Curvas de secado datos experimentales y modelos de Henderson & Pabis (Secador parabólico).

De las fig. 15 y 16, en general, se puede concluir que se tienen descensos muy pronunciados en las primeras horas de secado se removi6 gran cantidad de humedad presente en la superficie de los granos, los tratamientos que se colocaron en el secador por convecci6n forzada, presentaron curvas de tipo exponencial, con tiempos finales de 26, 19 y 13 horas para 40, 50 y 60°C respectivamente, estando muy por debajo de lo expuesto por (UNIVERSIDAD DE NARIÑO VIRTUAL, 2013) para temperaturas de secado de 60 y 50°C.

A diferencia del secador parab6lico donde la puesta en marcha del proceso es lenta y se ve representado desde su etapa inicial hasta su punto de inflexi6n a las 24 horas, por una curva de tipo polin6mica, y a partir de la cual cambia a una tendencia exponencial hasta el final del secado a las 41 horas, el cual tambi6n est6 muy por debajo de lo alcanzado por Baham6n y Torres (2013), entre 80 y 106 horas, en secadores similares, aunque para mayor masa, capas de 2,5 cm de espesor y condiciones ambientales diferentes.

Cabe resaltar, adem6s de las evidentes diferencias de tiempo entre los tratamientos, las marcadas variaciones presentadas durante las etapas de secado diario, pues en ellas se observa los niveles de agotamiento de la humedad y el efecto importante que tienen los tiempos de reposo para lograr mantener una constante en la gran mayor6a del secado hasta su culminaci6n.

Los modelos propuestos para intentar simular el comportamiento real de los tratamientos, demuestran cierta deficiencia, principalmente en las primeras 2 a 3 horas y 5 a 7 horas del final del secado por convecci6n forzada, tanto para el modelo de Lewis como para el de Henderson & Pabis. Sin embargo, el resto de los datos se ven mucho m6s ajustados a su tendencia. Si se tiene en cuenta que los modelos hacen uso

de la constante de secado k promedio obtenida por regresión para la gran mayoría de datos y que pertenecen al primer periodo de régimen de secado, es posible que algunos no se ajusten a la tendencia obtenida y en especial si se presentan hasta tres periodos de secado.

En el secador parabólico el modelo de Thompson presenta un mejor ajuste al inicio de las primeras 3 horas a partir de la cual los datos se dispersan, describiendo una subtendencia exponencial que se evidencia en cada día del tratamiento, hasta el punto de inflexión a la hora 24, y de donde parte el modelo de Handerson & Pabis, cuya tendencia hasta el final del proceso es totalmente exponencial, sin embargo, debido a que en este tratamiento se presentaron 3 periodos de secado este modelo se obtuvo a partir de la constante k del segundo lo que demuestra la falta de ajuste con los últimos datos de secado.

5.7. Análisis estadísticos de los modelos

En la tabla 4 se registran los resultados obtenidos de la evaluación cuantitativa entre los datos de las curvas de los diferentes modelos y los datos experimentales, en base a parámetros estadísticos establecidos. Para su cálculo se hizo uso de la herramienta Microsoft Excel.

Tabla 4. Parámetros estadísticos de los modelos propuestos para todos los tratamientos.

Modelos	40 °C		50 °C		60 °C		Sol
	Lewis	H&P	Lewis	H&P	Lewis	H&P	Thompson , H&P
R²	0,9908	0,9922	0,9785	0,9846	0,9869	0,9867	0,9896
X²	0,9987	0,9988	0,9981	0,9988	0,9987	0,9987	0,9992
RMSE	0,0360	0,0338	0,0407	0,0328	0,0330	0,0334	0,0280

El resultado que arroja la tabla anterior demuestra un buen ajuste a los datos experimentales para todos los modelos en los correspondientes tratamientos (r^2 y χ^2 muy cercanos a 1 y RMSE inferiores a 0,06), sin embargo para el secado artificial existen diferencias pequeñas que evidencian mejor ajuste entre los dos modelos usados. Este es el caso en el modelo de Henderson & Pabis para los tratamientos a 40°C y 50°C y del modelo de Lewis en el tratamiento a 60°C.

5.8. Tasa de secado

Mediante regresión lineal de la relación de humedad (RH) se realizaron las gráficas del Ln (RH) vs Tiempo (Hr), fig.17, de las cuales se obtuvo las constantes de secado k , las constantes α para el modelo de Henderson & Pabis y se describen los diferentes periodos durante las etapas de secado.

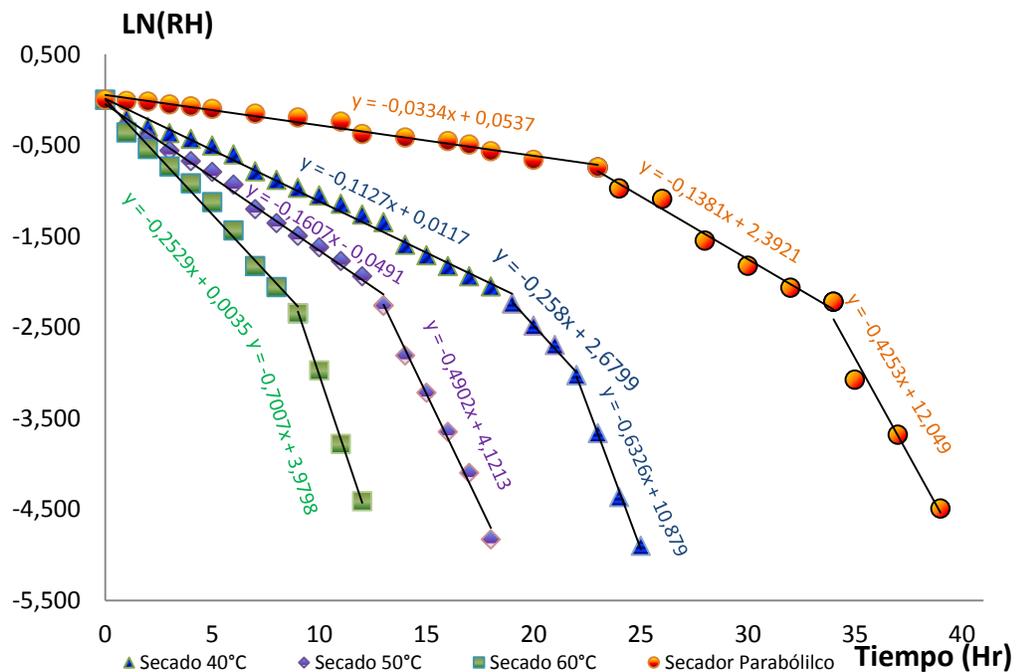


Figura 17. Logaritmo natural de la relación de humedad Ln (RH) vs tiempo (Hr) de cada uno de los tratamientos.

Iniciando por los resultados en el secador parabólico, se observa que se presentaron los 3 periodos mencionados por Oliveira (2005) citado por Henao (2007). El primero, producto de la alta humedad inicial del grano en especial en su superficie y la baja incidencia de energía prolongaron la tasa de secado hasta la hora 23 culminado con una humedad del 23,8% (ver Anexos, tabla 12), a partir del cual disminuyó y se presentó el segundo periodo donde la transferencia de calor y de masa del interior del grano es equivalente hasta la hora 34 y con humedad del 10%, en este punto la humedad del grano se hizo crítica para sostener la tasa de secado, la temperatura del grano empieza a igualar a la del aire de secado y la poca humedad restante se difunde principalmente a través de vapor (según Rey (1968) citado por Henao 2007) hasta alcanzar humedad de equilibrio alrededor del 6% a las 41 horas. Comparado con los resultados obtenidos por Bahamón y Torres 2013, en los cuales la tasa de secado se mantuvo muy constante hasta el punto de inflexión casi al final del secado, por lo que no se presentó marcada diferencia entre periodo 1 y 2.

Siguiendo con los resultados del secado por convección forzada, como fue de esperarse, a mayor temperatura mayor fue la tasa de secado al inicio de los 3 tratamientos. A diferencia de los obtenidos por el secador parabólico, se dirá para no generar confusión que solo se presentaron “2 etapas” de secado en todos los tratamientos, aclarando, que dentro de la primera etapa se encuentran los periodos 1 y 2, y la segunda etapa corresponde al periodo 3, en lo descritos por Oliveira (2005) citado por Henao (2007). Basados en esto, en los puntos de inflexión, y junto con los

resultados en el secador parabólico, es posible que el primer periodo se hubiera dado en los tres tratamientos en las primeras 3 a 4 horas de secado, lo que en teoría no afectó mucho la tasa de secado general correspondiente al segundo periodo.

Particularmente en el tratamiento a 40°C después de la primera etapa finalizada en la hora 19, se presentó un subperiodo de transición de 3 horas dentro del tercer periodo, posiblemente sujeto a las características del grano y la baja temperatura, permitieron el intercambio de humedad suficiente para sostener la corta tasa mientras el grano igualaba por completo la temperatura del aire de secado y la tasa se hiciera mínima. Diferente a lo que no ocurrió con los tratamientos a 50 y 60 °C, después de terminada la primera etapa de secado, 13 y 9 horas respectivamente, el tercer periodo de secado se presentó inmediatamente en su primera hora.

Es de importancia resaltar lo cercano del rango en que se obtuvieron los puntos promedio de inflexión en los tratamientos a 40, 50, 60 °C y al sol, con un % humedad de 10,8, 10,3, 9,5 y 10 % respectivamente, y comparados también con lo obtenido por Bahamón y Torres (2013), coinciden dentro de sus resultados obtenidos en los tratamientos usados (entre 9,5 y 12% de humedad).

Comparando la poca diferencia en la tasa de secado que se presenta a partir de los puntos de humedad críticos, se podría decir que el tercer periodo en los tratamientos es prácticamente independiente de ellos, esto querría decir por ejemplo que se podría obtener casi el mismo resultado si al llegar a la humedad crítica (9,5%) del secado forzado a 60°C, se terminara secando con el secador parabólico o viceversa y al igual con las demás temperaturas, con tiempos cortos que oscilan muy cercanos para culminar el proceso y en especial si se quiere alcanzar humedad comercial. Esto sugiere que se podrían realizar procesos de secado combinados que puedan disminuir y optimizar el uso de energía.

Además de guía para intentar describir el comportamiento del proceso de secado, obtener los valores de pendiente o constantes de secado de las ecuaciones de las gráficas de cada periodo, la principal razón es calcular los valores de Difusividad efectiva, expuestos en la tabla 5.

Los valores de Difusividad efectiva son consecuentes con la tasa de secado presentada para cada uno de los tratamientos, siendo de mayor valor a medida que se empleó temperaturas mayores y a su vez cuando el proceso presentó cambio en la tasa de secado hacia el final del proceso.

Comparando los valores calculados con los encontrados para otros productos biológicos y obtenidos para secado de cacao en otros tratamientos de la tabla 16 de los anexos, se puede concluir que están dentro del rango encontrado por D. Marinos-Kouris (2006) citado por Hernández et al. (2010), señala que la difusividad de los

alimentos normalmente se ubica en un rango de 10^{-13} a 10^{-6} (m^2/s), y la mayoría de ellos (82%) están acumulados en la región de 10^{-11} a 10^{-8} .

Tabla 5. Constantes y valores de difusividad para todos los tratamientos y energía de activación para secado artificial.

Ensayos	t (s)	k	Deff (m^2/s)
Sol	82800	0,0334	1,63484E-11
	39600	0,1381	1,41338E-10
	18000	0,4253	9,57598E-10
40°C	68400	0,1127	6,67772E-11
	10800	0,258	9,6818E-10
	10800	0,6326	2,37392E-09
50°C	46800	0,1607	1,39165E-10
	18000	0,4902	1,10373E-09
60°C	32400	0,2529	3,16347E-10
	10800	0,7007	2,62947E-09

Una forma de comprobar la relación que tuvo las temperaturas de los tratamientos de 40, 50 y 60 °C, sobre las difusividades efectivas calculadas para la tasa de secado constante por convección forzada, es mediante la relación de Arrhenius. Los datos para la fig.18 se encuentran en la tabla 17 de los anexos.

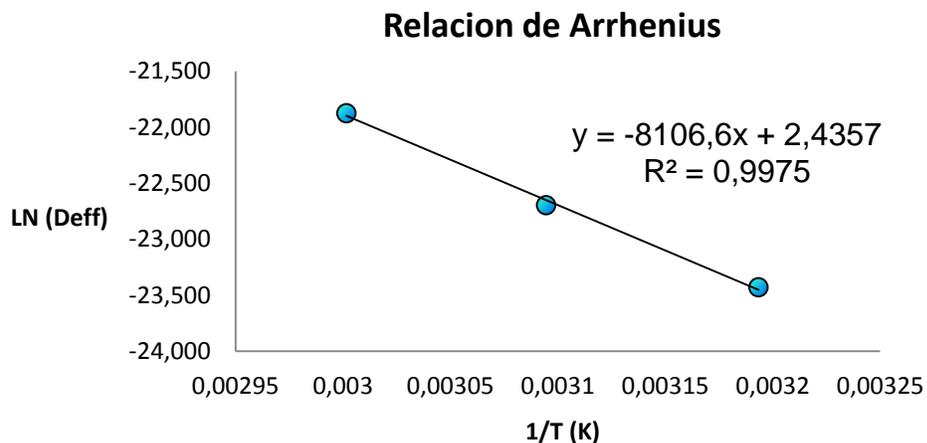


Figura 18. Relación de Arrhenius para secado artificial.

El coeficiente de determinación muestra un buen ajuste para los datos de regresión lineal, por lo cual es posible calcular la energía de activación (E_a), a partir de la pendiente, despejando de la ecuación 28. El valor de la energía de activación (E_a) fue

de 67,39 (Kj/mol). Comparado con los valores para cacao y otros productos adjuntos en la tabla 18 de los anexos, se encuentra muy por encima de todos y en especial para el valor encontrado para cacao. Sin embargo esto se puede deber a las diferencias en los tratamientos y el manejo de los datos.

5.9. Resultados análisis físico y perfil sensorial muestras de cacao del departamento del Huila

Fecha: Enero 14 de 2013

Lugar: Bucaramanga, Santander

MUESTRAS

Se recibieron 4 muestras provenientes del departamento del Huila, de la finca Villa Stefany, vereda Termópilas, Municipio de Rivera, con diferentes días de fermentación y temperaturas de secado. Las muestras se enumeraron según el tratamiento en: secador parabólico (muestra 1), secado por convección forzada a temperaturas de 40 °C (muestra 2), 50°C (muestra 3) y 60°C (muestra 4).

ANÁLISIS FÍSICO

La evaluación física de las muestras se realizó tomando una muestra de 100 almendras, en las cuales se evaluó el porcentaje de almendras bien fermentadas, insuficientemente fermentadas, granos violeta, pizarrosos y moho (contaminado), además el índice de grano. Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del análisis físico de cada muestra.

MUESTRA	% Bien Fermentados	% Granos Violeta	% Sobre Fermentados	% Cascarilla	Índice de Grano
1	69	29	2	15	1,25
2	66	29	5	18	1,35
3	53	45	2	18	1,27
4	93	0	7	19	1,16

Según los resultados, se observa que la muestra 3 presentó un porcentaje bajo de fermentación, el cual puede afectar directamente el perfil sensorial de la muestra. La muestra 4 presentó alto porcentaje de granos fermentados y sobre-fermentados, lo cual es percibido en el perfil sensorial con tonos de frutos en descomposición y sobre-maduro.

El índice de grano de la muestra 4 fue muy bajo, menor a 1,2 según la norma NTC 1252.

ANÁLISIS SENSORIAL

Las muestras se identificaron por medio de un código que se utiliza para medir el contenido o intensidad del sabor en cada una de ellas, siendo de 0 a 10 puntos:

- 0 Ausente
- 1 - 2 Bajo
- 3 - 5 Medio
- 6 - 8 Alto
- 9 - 10 Muy alto - Fuerte

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la evaluación de un panel de cata.

Los resultados del perfil sensorial se presentan por medio de un diagrama radial, en el que se contemplan los valores promedio de las características básicas y específicas, junto con comentarios acerca de la percepción de cada uno de los atributos encontrados en cada muestra

El análisis sensorial se realizó procesando cada una de las muestras para obtener licor de cacao, que posteriormente fue evaluado por el panel de cata.

Tabla 7. Análisis sensorial de la muestra 1 (Secado al sol).

CACAO	ACIDEZ	ASTRIN	AMARG	FRUTA	FLORAL	NUEZ	VERDE	SOBRE MAD	VIOLET	TIERRA
1	0,5	2	2	0	0	0	1,5	2	2	2

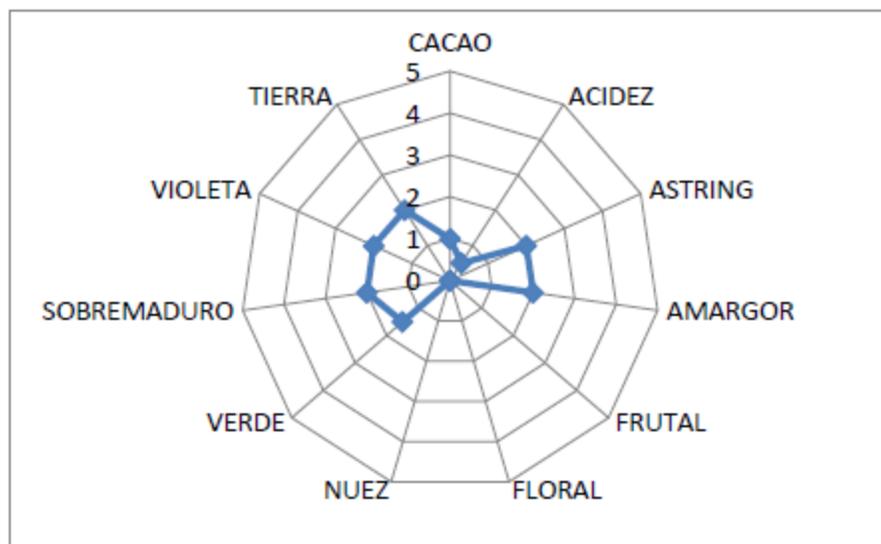


Figura 19. Muestra 1 (Secado al sol).

Se observó en la muestra color café oscuro y una textura fluida y pegajosa en boca. Se percibió aroma ácido y bajo sabor a cacao, y un profundo olor a cacao violeta. Se destaca el sabor a frutos sobremaduros, y notas verdes. Se percibió un bajo sabor a cacao al final con notas de tierra y almendra violeta. La muestra se calificó como desagradable.

Tabla 8. Análisis sensorial de la muestra 2 (Secado de 40°).

CACAO	ACIDEZ	ASTRIN	AMARG	FRUTA	FLORAL	NUEZ	VERDE	VIOLET	TIERRA	PICANT
1	0,5	2,5	2,5	0	0	0,5	2	3	1	1

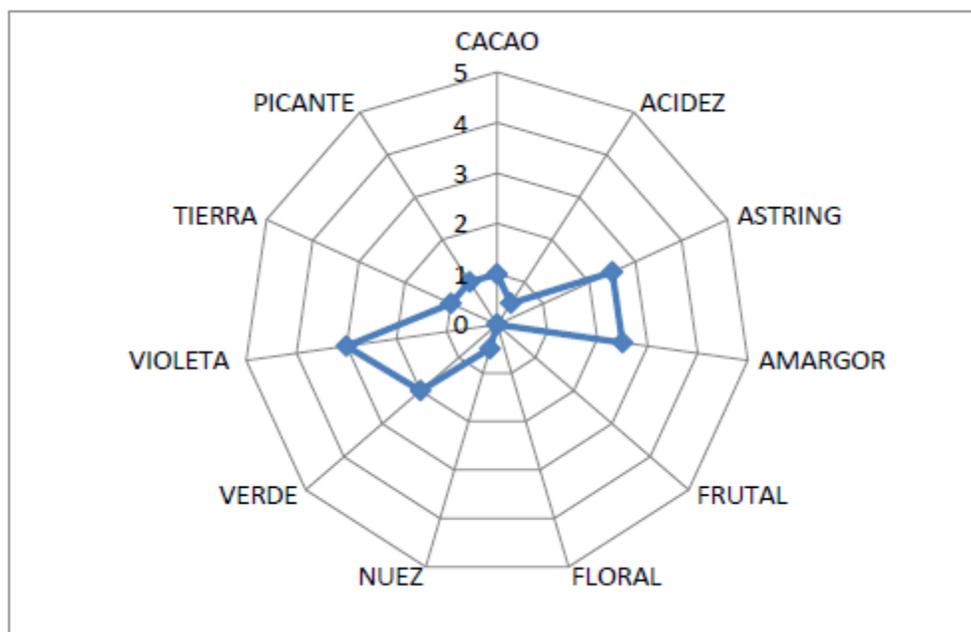


Figura 20. Muestra 2 (Secado de 40°).

La muestra presentó un color café rojizo y textura fluida y pegajosa. Se percibe aroma bajo a cacao y a frutos sobremaduros. Se destacó el sabor de almendras violeta opacando las notas a cacao, se percibieron astringencia, amargor y acidez bajo. Al final resaltan notas verdes medias y tonos bajos de tierra y picante. Muestra calificada como desagradable.

Tabla 9. Análisis sensorial de la muestra 3 (Secado de 50°).

CACAO	ACIDEZ	ASTRIN	AMARG	FRUTA	FLORAL	NUEZ	VERDE	VIOLET	TIERRA	PICANT
0,5	1	3,5	3,5	0	0	0,5	3	4	2	

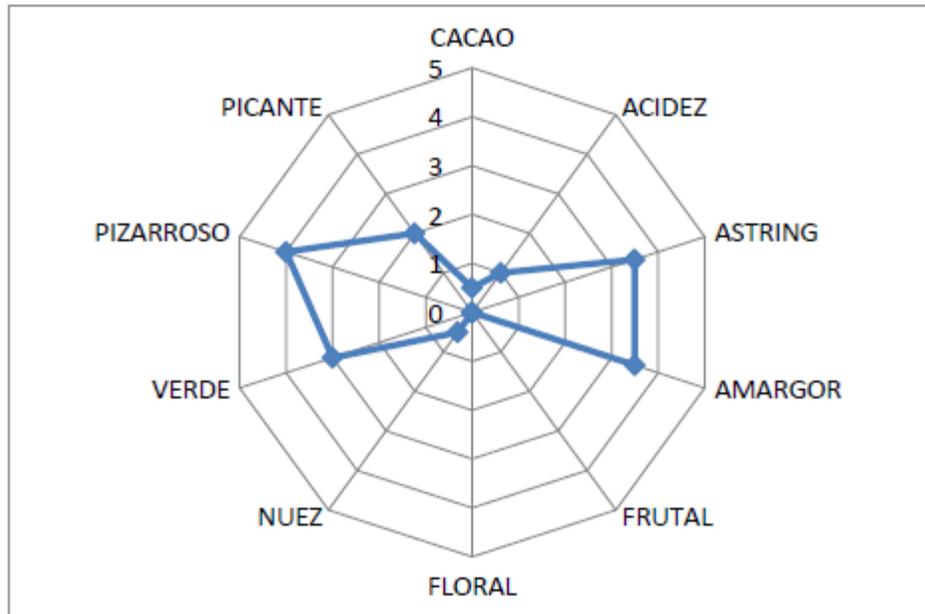


Figura 21. Muestra 3 (Secado de 50°).

La muestra presentó color café rojizo con buena fluidez y textura pegajosa. Se percibieron aromas de humedad, tierra, almendra violeta y un profundo caramelo. En boca se destacó un sabor a almendra verde, con notas picantes bajas durante la cata. Se encontró un sabor amargo y sensación astringente que perduran, se percibe tonos verdes, de almendra pizarrosa y un final muy bajo de cacao. La muestra se considera desagradable.

Tabla 10. Análisis de la muestra 4 (Secado de 60°).

CACAO	ACIDEZ	ASTRING	AMARGO	FRUTAL	FLORAL	NUEZ	VERDE	PIZARRO	SOBREM
1	0,5	3	2,5	0	0	1	2	1	1

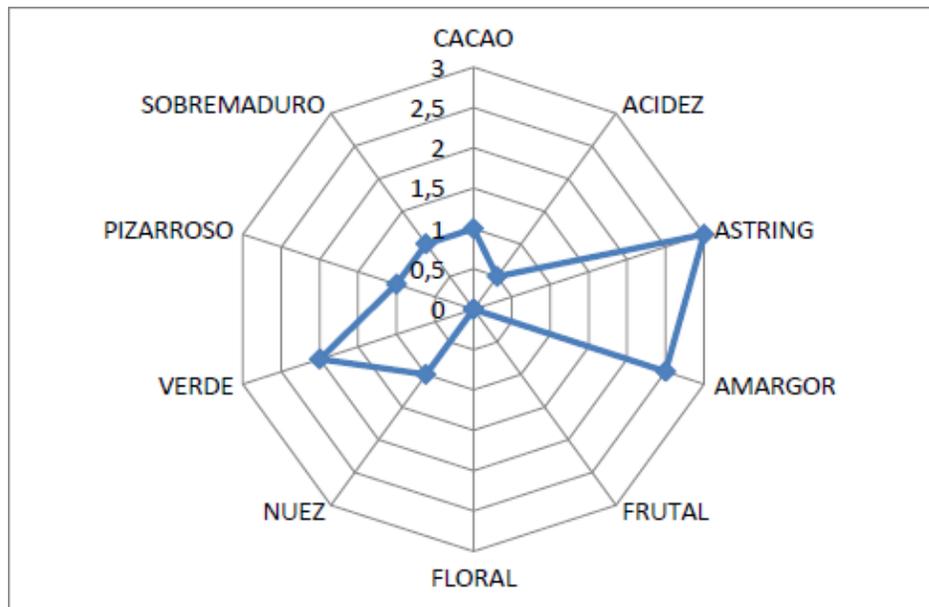


Figura 22. Muestra 4 (Secado de 60°).

La muestra presentó coloración café oscuro y buena fluidez.
 Se percibió aroma a cacao medio y profundo olor a verde y frutos sobremaduros.
 Se destaca el sabor a almendras pizarrosas y verdes durante la catación, el sabor a cacao es muy bajo, con acidez y astringencia media - baja, se percibieron tonos bajos de verde y humedad (tierra).
 La muestra fue calificada como desagradable.

6. CONCLUSIONES

En el proceso de fermentación de los granos de cacao no se realizó correctamente, la remoción de los granos, así como el manejo de la temperatura de fermentación, lo que dio como resultado falta de uniformidad en la fermentación de los granos, generando sabores de almendras violeta, tonos verdes y de fruta sobre-fermentada.

Los factores más importantes en la fermentación son la temperatura y uniformidad de esta en todas las almendras. Por lo cual es importante revisar la fermentación constante con: medidores de temperatura y prueba de corte, para asegurar que el borde de la almendra cortada este de color café.

En todas las muestras se percibieron notas de almendra violeta, lo que indica una interrupción de la fermentación. Las almendras pizarrosas se deben a la ausencia de fermentación dejando un sabor desagradable y prolongado, que fue lo que más se encontró en las cataciones.

Los tiempos de secado alcanzados por los tratamientos del secado artificial a 40, 50 60°C y secador solar parabólico, fueron en promedio de 26, 19, 13 y 41 horas respectivamente, hasta humedades de equilibrio promedio de entre 5 y 6 %.

Al haber secado en horno las almendras se encontraron muy compactas y semi-compactas, no disminuyó el amargo ni la astringencia, lo que quiere decir que el secado en horno fue acelerado y no permitió eliminar sustancias volátiles que enmascaran los atributos de un buen cacao. Se recomienda secar directamente con el sol, hay varias alternativas como: marquesina solar, patios de secado, secadoras y tendales.

Los modelos de Lewis, Thompson y Henderson & Pabis (H&P), en general tuvieron un buen ajuste cuantitativo con los datos experimentales, sin embargo, particularmente el modelo de H&P se ajustó más a los tratamientos de 40 y 50°C y el de Lewis lo hizo mejor con el de 60°C. Por otra parte el modelo combinado entre Thompson y H& P tuvo un mejor resultado que si se hubieran utilizado de manera singular.

La tasa constante de secado en cada uno de los tratamientos tuvo relación directa con las temperaturas, siendo mayor con el aumento de energía. En general los valores de difusividad efectiva calculados los tratamientos de secado al sol, 40,50 y 60°C, fueron de $(1,63484E^{-11} - 1,41338E^{-10})$, $6,67772E^{-11}$, $1,39165E^{-10}$ y $3,16347E^{-10}$ (m^2/s) respectivamente.

Los puntos promedios de inflexión en el tratamiento de secado al sol, se dieron en los tiempos 23 y 34 con % humedad de 23,8 y 10 % respectivamente.

El punto promedio de inflexión en los tratamientos de 40,50 y 60°C, se dio en el tiempo 19,13 y 9 con un % de humedad de 10.8, 10.3 y 9,5%, respectivamente.

La energía de activación (Ea) en los tratamientos de 40,50 y 60°C, obtenida a partir de la relación de Arrhenius se calculó en 67,4 (kJ/mol).

Los resultados del análisis físico y perfil sensorial de muestras de cacao del Departamento del Huila lo realizaron las siguientes personas:

Monica Liliana Gómez López
CATADORA
ADM. EMPRESAS AGROPECUARIAS

MÓNICA GÓMEZ LOPEZ
Adm. Empresas Agropecuarias
Mariana Cocoa Export LTDA



NUBIA MARTÍNEZ GUERRERO
I.A. Investigador

7. RECOMENDACIONES

Modificar el proceso de fermentación realizado, utilizando una mayor cantidad de masa.

Se puede pensar en hacer un secado combinado: secado al sol y secado mecánico, teniendo en cuenta los tiempos en los que se presentaron los puntos de inflexión.

8. BIBLIOGRAFIA

ASKELAND, Donald R. 1998. Ciencia e Ingeniería de los materiales. Capítulo 5. Movimiento de los átomos en los materiales. Pág. 105-125. Consultado el 18 de junio de 2013.

http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/Lnavea/metalurgia_fisica/Ciencia%20E%20Ingenieria%20De%20Los%20Materiales%20Askeland%20Chapter%201-18.pdf

BAHAMON, María C., TORRES, Juan C. 2013. Construcción y evaluación de un secador solar parabólico en material no higroscópico. Universidad Surcolombiana. Ingeniería agrícola. Pág. 73.

CERQUERA, Peña Néstor Enrique. 2006. Determinación de la temperatura y la velocidad del aire de secado para la deshidratación de pulpas de banano y maracuyá en lámina. pág.117. consultado el 27 de enero de 2013. <http://es.scribd.com/doc/62944150/DETERMINACION-DE-LA-TEMPERATURA-Y-LA-VELOCIDAD-DEL-AIRE-DE-S>.

CONTRERAS, Carmen, et al. 2002. Fermentadores para cacao usados por los productores de la localidad de Cumboto, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Instituto de Química y Tecnología e Instituto de Botánica. Estado Aragua-Venezuela. Consultado el 27 de Octubre de 2011. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0002-92X2004000200006&script=sci_arttext.

ESLAVA, Maryluz. 2011. 5. Huila: Cacao fino y de aroma. Informe técnico y de gestión. Secretaria técnica cadena cacao. Pág. 15. Consultado el 16 de junio de 2013. <http://www.huila.gov.co/documentos/agricultura/CADENAS%20PRODUCTIVAS/INFORME%20DE%20GESTION%20CACAO%202011.pdf>

FAO. Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural. 1993. Consultado el 12 de noviembre de 2012. <<http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S05.HTM#III>. Secado de los granos >.

FEDECACAO. El beneficio y características físico químicas del cacao (*Theobroma cacao L.*).2004. Consultado el 28 de enero de 2013. <http://www.fedecacao.com.co/cw/ca/doctecnicos/fedecacao-dt-beneficio-caracteristicas-fisicoquimicas-cacao.pdf>.

FERNANDEZ, Martínez Diana Fernanda. Análisis sensorial de alimentos. 2005. Consultado el 06 de febrero de 2013. <http://dcfernandezmudc.tripod.com/>.

FARIÑAS, Lucía Graziani, et al. 2003. Fermentación del cacao en dos diseños de cajas de madera. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Instituto de Agronomía. (Artículo internet). http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0002-192X2003000200005&script=sci_arttext.

FINAGRO. Cacao. 2009. Consultado el 28 de enero de 2013. http://www.finagro.com.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-194&p_options=.

GOBERNACION DEL HUILA et al. 2009. Convenio de Concertación para una Producción más Limpia en el Subsector Cacaotero - Cacao Orgánico. Consultado el 11 de agosto de 2012. http://www.cam.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=45166a64-341b-4564-9323-ed2d2b43bab&groupId=10128.

HENAO, José Duban. 2007. Mucilagem residual em café cereja descascado e seus efeitos na qualidade da bebida e na produção de cafés especiais. universidade estadual de campinas facultade de engenharia agrícola. campinas. pag. 155.

HERNANDEZ, Joaquin, et al. 2001. La radiación solar en invernaderos mediterráneos. Junta de Andalucía. Caja Rural de Granada. Gabinete Técnico. Pág. 36. Consultado el 15 de Junio de 2013. <http://www.ecofisiohort.com.ar/wp-content/uploads/2008/10/radiacion-solar-invernadero.pdf>

HERNANDEZ, Elizabeth. 2005. Evaluación sensorial. Universidad abierta y a distancia UNAD. Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería. Pág. 128. Consultado el 15 de Junio de 2013. <http://www.pymeslacteas.com.ar/userfiles/image/4902Evaluacion%20sensorial.PDF>

HERNANDEZ, José, et al. 2011. Estudio de la cinética de secado de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*). pág. 6. (Artículo de Internet). Consultado el 03 Febrero de 2013. <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=61420811004>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. 2003. Cacao en Grano. NTC-1252, Bogotá D.C: El instituto. Pág. 9.

MICHALEWICZ, Jacek S., et al. 2011. Secado de Cajuil (*Anacardium occidentale L.*): Estudio Experimental y Modelado de la Cinética de Secado. Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM, Cidade Universitária s/n, Recife-Pernambuco-Brasil. Vol. 22(6), 63-74 (2011). Pág. 12.

MINISTERIO DE AGRICULTURA. PERU. 2004. Programa para el desarrollo de la amazonia proamazonia. Pág. 83. Consultado el 11 de agosto de 2012. http://webmail.radiomaranon.org.pe/redmaranon/archivos/cacao_manual_cultivo.pdf.

MONTERO, Irene. 2005. Modelado y construcción de un secador solar hibrido para residuos biomásicos. Tesis doctoral. Badajo. Universidad de Extremadura. Pág. 286. Consultado el Marzo 24 de 2013. (Artículo de Internet): dialnet.unirioja.es/descarga/tesis/576.pdf.

MONTES M, Joaquín E. et al. 2008. Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea rotundata*) en capa delgada. Revista Ingeniería e Investigación vol. 28 N° 2. Pág. 45-52.

MORENO, Luis J., SANCHEZ, Jesús A. 1989. Beneficio del cacao. Consultado el 4 de febrero de 2013. http://books.google.com.co/books?id=JGYqAAAAYAAJ&pg=PA16&lpg=PA16&dq=secado+artificial+del+cacao&source=bl&ots=7x8gV49JtN&sig=XgAwA4M0mqYL6v6FH5e228ACT24&hl=es&sa=X&ei=YTQQUZ_IHqWLOQHm24GADw&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=secado%20artificial%20del%20cacao&f=false.

NDUKWU, MacManus Chinenye, et al. 2010, Cocoa bean (*Theobroma cacao* L.) drying kinetics. Consultado el 15 de marzo de 2013. Pág. 7. <http://www.agrifoodgateway.com/es/articles/cocoa-bean-theobroma-cacao-l-drying-kinetics>.

LOPEZ, A. et al. 1993. Modelación de la cinética de secado de patata cortada en láminas. Departamento de Ingeniería de Alimentos. Universidad pública de Navarra. Campus arrosadia, s/n. 31006. Pamplona. Pág. 6. Consultado el marzo 13 de 2013. http://acyja.com/documentos/Publicaciones/Revistas_pepe/Alimentaria%20268.pdf

LOPEZ, C. Raymundo, et al. 2007. Modelado de la cinética de secado del nopal (*Opuntia ficus indica*) con energía solar. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco Departamento de Energía, Área de Termofluidos. México D. F. Pág. 6. Consultado el 12 de mayo de 2013. http://materiales.azc.uam.mx/area/Ciencia_Materiales/2260212/trabajos%20F%C3%ADsica/RL-CIIF-069-FINAL.pdf.

OCAMPO, Aquiles. 2006. Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. Consultado el 02 de mayo de 2013. Pág. 128. <http://revista.eia.edu.co/articulos5/art105.pdf>

PROEXPORT COLOMBIA. 2012. Cacao colombiano fino y de aroma. Consultado el 28 de enero de 2013. <http://www.inviertaencolombia.com.co/images/Perfil%20Cacao%202012.pdf>.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO VIRTUAL. 2013. Etapa secado. Secado artificial. Consultado el 06 de febrero de 2013.

http://www.virtualplant.net/cacao/complejo_detalle.php?sec=16&id=30.

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA. 2013. Guía práctica de laboratorio. Aforo de un ventilador. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Agrícola. Pág. 10.

-----, 2012. Guía práctica de Laboratorio. Determinación del contenido de humedad en productos agrícolas. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Agrícola. Pág. 6.

VILLAMIZAR, Fanny. H. Determinación de parámetros del proceso de secado del cacao (*Theobroma cacao* L). Consultado el 13 de Febrero de 2013. Pág. 7. (Artículo de internet).<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/viewFile/24483/25074> Colombia.

ANEXOS

Tabla 11. Datos de condiciones ambientales.

T° = T°amb		Días																					
H = %HR		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		promedio	
horas	Horario	T°	H	T°	H	T°	H	T°	H	T°	H	T°	H	T°	H	T°	H	T°	H	T°	H	T°	H
0	07:00:00 a.m.	25	71	25	75	24	76	25	89	25	73	24	73	24	70	25	89	25	73	24	73	24,6	76,2
1	08:00:00 a.m.	25	71					25	84							25	84					25,0	79,7
2	09:00:00 a.m.	26	68					26	76	27	66	27	63	26	65	26	76	27	66	27	63	26,5	67,9
3	10:00:00 a.m.	23	61	26	66	26	69	30	77							30	77					27,0	70,0
4	11:00:00 a.m.	28	59	28	55			29	65	38	60	32	57	30	51	29	65	38	60	32	57	31,6	58,8
5	12:00:00 p.m.	28	59	34	50			30	61	28	55					30	61	28	55			29,7	56,8
6	01:00:00 p.m.			36	45	27	65			31	45	33	40					31	45	33	40	31,8	46,7
7	02:00:00 p.m.	31	50	33	50			28	68							28	68					30,0	59,0
8	03:00:00 p.m.			31	51					30	49	32	37					30	49	32	37	31,0	44,6
9	04:00:00 p.m.	26	68			29	53	28	63							28	63					27,8	61,8
10	05:00:00 p.m.											31	40							31	40	31,0	40,0
11	06:00:00 p.m.	29	51	29	55			26	65	27	67					26	65	27	67			27,3	61,7
12	07:00:00 p.m.					28	56															28,0	56,0

Tabla 12. Datos secador parabólico y modelos de Thompson y Henderson & Pabis.

Tiempo (Hr)	%H	RH	LN(RH)	Thompson	H & P
0	43,47	1,0000	0,000	1,000	
1	43,05	0,9889	-0,011	0,989	
2	42,69	0,9793	-0,021	0,977	
3	41,66	0,9515	-0,050	0,963	
4	40,82	0,9288	-0,074	0,948	
5	39,92	0,9047	-0,100	0,932	
7	38,22	0,8596	-0,151	0,896	
9	36,79	0,8220	-0,196	0,855	
11	35,46	0,7867	-0,240	0,809	
12	31,68	0,6860	-0,377	0,784	
14	30,73	0,6607	-0,414	0,730	
16	29,78	0,6357	-0,453	0,671	
17	28,85	0,6108	-0,493	0,640	
18	27,26	0,5682	-0,565	0,607	
20	25,34	0,5167	-0,660	0,538	
23	23,80	0,4754	-0,744	0,425	
24	20,17	0,3776	-0,974	0,385	0,382
26	18,60	0,3359	-1,091		0,289

28	13,95	0,2125	-1,549	0,218
30	12,07	0,1615	-1,823	0,165
32	10,77	0,1269	-2,064	0,125
34	10,00	0,1086	-2,220	0,094
35	7,74	0,0462	-3,075	0,082
37	6,95	0,0252	-3,681	0,062
39	6,44	0,0112	-4,491	0,047
41	5,96	0,0001	-9,748	0,035

Tabla 13. Datos secado artificial por convección forzada a Temperatura de 40°C y modelos de Lewis y Henderson & Pabis.

<i>Tiempo (Hr)</i>	<i>%H</i>	<i>RH</i>	<i>LN(RH)</i>	<i>Lewis</i>	<i>H & P</i>
0	50,73	1,000	0,000	1,000	1,012
1	42,50	0,817	-0,202	0,893	0,904
2	39,19	0,743	-0,297	0,798	0,808
3	36,99	0,694	-0,365	0,713	0,721
4	35,02	0,651	-0,430	0,637	0,645
5	32,94	0,604	-0,504	0,569	0,576
6	30,45	0,549	-0,600	0,509	0,514
7	26,32	0,457	-0,784	0,454	0,460
8	24,47	0,415	-0,879	0,406	0,411
9	22,88	0,380	-0,968	0,363	0,367
10	21,50	0,349	-1,052	0,324	0,328
11	20,16	0,319	-1,142	0,289	0,293
12	18,95	0,283	-1,261	0,259	0,262
13	17,88	0,260	-1,346	0,231	0,234
14	15,23	0,203	-1,593	0,206	0,209
15	14,23	0,181	-1,707	0,184	0,187
16	13,29	0,161	-1,826	0,165	0,167
17	12,49	0,144	-1,941	0,147	0,149
18	11,80	0,128	-2,052	0,132	0,133
19	10,81	0,107	-2,236	0,118	0,119
20	9,74	0,084	-2,482	0,105	0,106
21	9,00	0,068	-2,694	0,094	0,095
22	8,13	0,049	-3,025	0,084	0,085
23	7,08	0,026	-3,664	0,075	0,076
24	6,48	0,013	-4,366	0,067	0,068
25	6,24	0,007	-4,900	0,060	0,060
26	6,00	0,002	-6,136	0,053	0,054

Tabla 14. Datos secado artificial por convección forzada a Temperatura de 50°C y modelos de Lewis y Henderson & Pabis.

Tiempo (Hr)	%H	Prom (RH)	LN(RH)	Lewis	H & P
0	52,43	1,000	0,000	1,000	0,952
1	40,63	0,749	-0,289	0,852	0,811
2	36,13	0,654	-0,424	0,725	0,690
3	32,21	0,572	-0,559	0,617	0,588
4	29,30	0,509	-0,675	0,526	0,501
5	26,64	0,453	-0,793	0,448	0,426
6	23,85	0,393	-0,933	0,381	0,363
7	19,50	0,300	-1,203	0,325	0,309
8	17,53	0,258	-1,355	0,276	0,263
9	15,98	0,225	-1,494	0,235	0,224
10	14,74	0,198	-1,620	0,200	0,191
11	13,44	0,170	-1,771	0,171	0,163
12	11,71	0,144	-1,939	0,145	0,138
13	10,33	0,104	-2,259	0,124	0,118
14	8,97	0,060	-2,809	0,105	0,100
15	7,98	0,040	-3,218	0,090	0,085
16	7,14	0,026	-3,649	0,076	0,073
17	6,43	0,017	-4,100	0,065	0,062
18	5,79	0,008	-4,830	0,055	0,053
19	5,49	0,002	-6,408	0,047	0,045

Tabla 15. Datos secado artificial por convección forzada a Temperatura de 60°C y modelos de Lewis y Henderson & Pabis.

Tiempo (Hr)	%H	(RH)	LN(RH)	Lewis	H & P
0	52,60	1,000	0,000	1,000	1,004
1	38,23	0,698	-0,360	0,777	0,779
2	32,70	0,582	-0,541	0,603	0,605
3	27,83	0,480	-0,735	0,468	0,470
4	23,98	0,399	-0,920	0,364	0,365
5	20,46	0,325	-1,124	0,282	0,283
6	16,32	0,238	-1,436	0,219	0,220
7	12,64	0,161	-1,827	0,170	0,171
8	11,05	0,128	-2,059	0,132	0,133
9	9,55	0,096	-2,344	0,103	0,103
10	7,42	0,051	-2,974	0,080	0,080
11	6,06	0,023	-3,783	0,062	0,062
12	5,54	0,012	-4,409	0,048	0,048
13	4,98	0,001	-7,471	0,037	0,037

Tabla 16. Valores de Difusividad efectiva para Cacao y otros productos biológicos.

Cultivos	Difusividad efectiva (m ² /s)	Referencias
		* citado por MacManus et al.,2010
Menta (Mentha sp.)	7,04x10 ⁻¹²	Akpinar (2006) *
Albahaca (Ocimum basilicum L.)	6,44x10 ⁻¹²	Akpinar (2006)*
Albaricoque (armeniaca vulgaris L.)	8,90x10 ⁻¹⁰	Mahmutoglu et al. (1995)*
Uva (Coccoloba uvifera (L) L)	7,91x10 ⁻¹⁰	Doymaz y Pala (2002)*
Perejil	4,53x10 ⁻¹²	Akpinar (2006)*
Cacao (Theobroma cacao L.)		
60°C (horno)	7,46x10 ⁻¹¹	Hii et al. (2009)*
70°C (horno)	1,25x10 ⁻¹⁰	Hii et al. (2009)*
80°C (horno)	1,87x10 ⁻¹⁰	Hii et al. (2009)*
55°C (secador por lotes climatizada)	3,62x10 ⁻¹⁰	MacManus et al.,2010
70°C (secador por lotes climatizada)	8,98x10 ⁻¹⁰	MacManus et al.,2010
81°C (secador por lotes climatizada)	9,98x10 ⁻¹⁰	MacManus et al.,2010
Secador parabólico Guadua-Madera	3,3422x10 ⁻⁹ - 4,7846x10 ⁻⁹	Bahamon y Torres 2013
Secador parabólico Aluminio	4,1021x10 ⁻⁹ - 6,5788x10 ⁻⁹	Bahamon y Torres 2014
Pasera	3,5251x10 ⁻⁹ - 6,5788x10 ⁻⁹	Bahamon y Torres 2015

Tabla 17. Parámetros relación de Arrhenius.

T(°C)	T° (K)	1/T	Ln(Dff)
40	313,15	0,00319336	-23,430
50	323,15	0,003095	-22,695
60	333,15	0,003002	-21,874

Tabla 18. Valores de Energía de activación para cacao y otros productos.

Cultivos	Energía de activación (kJ/mol)	Referencias
		* citado por Montes et al.,2008
Cacao (Theobroma cacao L.)	39,94	MacManus et al.,2010
Cajuil (anacardium occidentale l.) Marañón	24,88	Michalewicz et al., 2011
Zanahoria	28,39	Doymaz, 2004 *
Papa	20	Rosello et al.,1997*
Pulpa de mango	46,459	Ocampo. 2006.
Patata en laminas	8,2538	Lopez, 1993