

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**Análisis del secado, el equilibrio higroscópico y la
torrefacción de los granos de cacao (*Theobroma cacao*)**

Trabajo Final de Graduación a presentar ante la Escuela de
Biosistemas como requisito para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Rebeca Vargas Fernández

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2019

Análisis del secado, el equilibrio higroscópico y la torrefacción de los granos de cacao (*Theobroma cacao*)

Trabajo Final de Graduación a presentar ante la Escuela de Biosistemas como requisito para optar por el grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

Rebeca Vargas F.

Rebeca Vargas Fernández
Sustentante

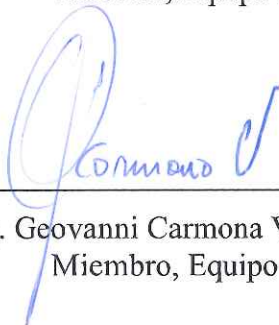
Aprobado por el Tribunal Examinador:



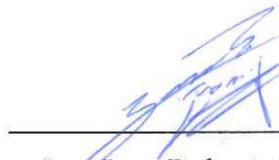
Ing. Guillermo A. Vargas Elías. D. Sc.
Director, Equipo Asesor



Ing. Kattia Solís Ramírez. D. Sc.
Presidente, Equipo examinador



Ing. Geovanni Carmona Villalobos. Lic.
Miembro, Equipo Asesor



Ing. Juan Roberto Mora Chaves. Lic.
Miembro, Equipo Examinador

Alberto Coto F.

Ing. Alberto Coto Fonseca. Lic.
Miembro, Equipo Asesor

DEDICATORIA

A mis papás por ser mi apoyo incondicional durante todos estos años, por obsequiarme un regalo tan grande como es el estudio y demostrarme siempre que “querer es poder”.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Jose y Marlene, un agradecimiento infinito por sus enseñanzas, paciencia y sacrificios para lograr llegar hasta el día de hoy.

A mi hermana, Ivana, por ser mi amiga y compañera de vida.

A mi director, Guillermo Vargas Elías, por la confianza depositada en mí para el desarrollo de este proyecto, así como también por toda la guía y preocupación demostrada en este proceso, sin duda alguna disfruté sin medida y me encontré con una nueva pasión, el cacao; y me reencontré con otra, el buen café.

A los miembros de mi comité asesor, especialmente a Geovanni Carmona Villalobos por cultivar en mí el amor hacia nuestra profesión y por buscar siempre como motivarnos en el camino.

Al personal del proyecto ED-3391, especialmente a Vanessa Villalobos por su apoyo.

Al personal administrativo y técnico del Centro de Investigaciones en Granos y Semillas, por ser tan serviciales y apoyarme durante este proceso.

A mis compañeros de carrera, que sin duda alguna nos apoyamos durante todo el proceso universitario para que fuera más llevadero y en especial a Karina por no solo ser mi compañera, sino también mi amiga.

A mis amigos, esta etapa sin duda alguna no hubiera sido tan llena de aventura sin ellos, gracias infinitas por el apoyo.

Por último y no menos importante, un agradecimiento especial a Javier y Adriana, por apoyarme sin medida en esta etapa final, mil gracias.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	vii
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. OBJETIVOS	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Generalidades.....	5
2.2 Cultivo y desarrollo de los cacaoteros en Costa Rica	7
2.2.1 Fermentación	8
2.2.2 Secado.....	9
2.2.3. Almacenamiento.....	11
2.2.4. Torrefacción	13
3. METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	16
3.1 Determinación del efecto de la temperatura en la rapidez del secado en una capa delgada de granos de cacao.....	16
3.2. Establecimiento de relación de equilibrio entre el contenido de humedad del cacao y la humedad relativa del aire.	22
3.3. Determinación de la cinética de la pérdida de masa asociada al calentamiento de los granos de cacao durante la torrefacción.	24

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1. Determinación del efecto de la temperatura en la rapidez del secado en una capa delgada de granos de cacao.....	31
4.2. Establecimiento de una relación de equilibrio entre el contenido de humedad del cacao y la humedad relativa del aire.	51
4.3. Determinación de la cinética de la pérdida de masa asociada al calentamiento de los granos de cacao durante la torrefacción.	58
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
Conclusiones	87
Recomendaciones.....	88
6. REFERENCIAS.....	89
7. ANEXOS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un grano de cacao fresco (5).	7
Figura 2. Proceso de beneficiado de cacao.	7
Figura 3. Tipos de curva de equilibrio clasificados por la forma (10).	12
Figura 4. Secadora y sistema de monitoreo en tres puntos para registro de las condiciones del aire (28).	17
Figura 5. Arduino UNO R3, utilizado para la programación del sistema de monitoreo y control de la secadora.	17
Figura 6. Balanza marca BOECO.	18
Figura 7. Desecador de vidrio con material desecante sólido CaCl ₂	22
Figura 8. Sensor de humedad y temperatura (Data logger modelo U12-013).	23
Figura 9. Sensor de humedad y temperatura (Data logger modelo UX100-003).	23
Figura 10. Muestras colocadas a temperatura ambiente.	25
Figura 11. Tostador BENDIG ECO-2000.	25
Figura 12. Termómetro infrarrojo General®.	26
Figura 13. Escáner de recolección de datos Cole-Parmer Instrument Company.	26
Figura 14. Densímetro, equipo para determinación de densidad aparente.	27
Figura 15. Estufa MMM Group modelo VENTICELL.	28
Figura 16. Curva de contenido de humedad (%b.h.) para cacao a cinco temperaturas.	33
Figura 17. Cinética de secado del modelo de Verma para las temperaturas de estudio.	36
Figura 18. Cinética de secado para las temperaturas de estudio, modelo de Verma.	37
Figura 19. Análisis de Residuos, modelo de Verma.	38
Figura 20. Relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura.- Modelo Verma.	41
Figura 21. Relación proporcional entre la variable g y la temperatura.- Modelo Verma.	42
Figura 22. Cinética de secado para las temperaturas de estudio, modelo de Midilli.	42
Figura 23. Relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura-Modelo de Midilli.	44

Figura 24. Relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura-Modelo de Page.....	45
Figura 25. Relación proporcional entre las constantes y la temperatura-Modelos de Midilli y Page.....	47
Figura 26. Relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura-Nuevo Modelo.....	50
Figura 27. Ajuste de los modelos de matemáticos para representar el equilibrio higroscópico en granos de cacao en desorción.....	54
Figura 28. Ajuste del modelo de GAB para representar el equilibrio higroscópico en granos de cacao en desorción.....	55
Figura 29. Análisis de residuos de los modelos de matemáticos de equilibrio higroscópico en desorción para cacao.....	57
Figura 30. Temperatura interna del tostador en dos condiciones de operación.....	58
Figura 31. Efecto de la masa sobre la temperatura del tostador en dos condiciones del tostador.....	59
Figura 32. Cinética de calentamiento de los granos para 750 g a 5 diferentes temperaturas de tueste-Modelo Vargas-Elías.....	62
Figura 33. Cinética de calentamiento de los granos para diferentes masas -Modelo Vargas-Elías.....	63
Figura 34. Análisis de residuos- Modelo Vargas-Elías. (Primera y segunda repetición)....	67
Figura 35. Cinética de calentamiento de los granos para 750 g a 5 diferentes temperaturas de tueste-Modelo Abarca.....	68
Figura 36. Modelo de calentamiento de los granos según su masa inicial- Modelo Abarca.....	69
Figura 37. Análisis de residuos- Modelo Abarca. (Primera y segunda repetición).....	73
Figura 38. Temperatura de la masa de granos a cinco temperaturas.....	74
Figura 39. Cinética de pérdida de masa, para las masas evaluadas.....	78

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de los granos de cacao; forastero, criollo y trinitario (5).	6
Cuadro 2. Modelos matemáticos utilizados para el secado de productos agrícolas.	21
Cuadro 3. Modelos empíricos de equilibrio en granos.	24
Cuadro 4. Modelos para el calentamiento de granos.	30
Cuadro 5. Condiciones promedios ambientales de entrada y salida de los tratamientos estudiados.	31
Cuadro 6. Pérdida de masa por prueba.	32
Cuadro 7. Comparación entre contenidos de humedad final (b.h.)	32
Cuadro 8. Valores obtenidos en el ajuste estadístico para los modelos de secado de capa delgada.	34
Cuadro 9. Constantes de secado para modelos de mejor ajuste.	40
Cuadro 10. Constantes de temperatura y secado para los modelos de Midilli y Page.	43
Cuadro 11. Parámetros obtenidos al linealizar constantes de los modelos.	46
Cuadro 12. Valores obtenidos para el nuevo modelo de ajuste.	49
Cuadro 13. Constantes de secado para nuevo modelo de ajuste.	49
Cuadro 14. Parámetros obtenidos al linealizar constantes del nuevo modelo.	50
Cuadro 15. Contenido de humedad final de los granos de cacao por medio del método estático y dinámico.	51
Cuadro 16. Parámetros estadísticos para los modelos de ajuste.	52
Cuadro 17. Parámetros estadísticos - modelo de GAB.	55
Cuadro 18. Tiempo de torrefacción por temperatura y masa.	59
Cuadro 19. Parámetros estadísticos del modelo de ajuste para la temperatura interna del tostador por efecto de masas. (Repeticiones 1 y 2).....	60
Cuadro 20. Parámetros estadísticos para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de granos durante el tueste de cacao-Modelo Vargas-Elías. (Primera y segunda repetición)	65

Cuadro 21. Parámetros estadísticos para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de granos durante el tueste de cacao-Modelo Vargas-Elías. (Tercera repetición).....	66
Cuadro 22. Parámetros estadísticos para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de granos durante el tueste de cacao-Modelo Abarca. (Primera y segunda repetición)	71
Cuadro 23. Parámetros estadísticos para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de granos durante el tueste de cacao-Modelo Abarca. (n=1).....	72
Cuadro 24. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.	75
Cuadro 25. Pérdida de masa por temperatura y masa.	77
Cuadro 26. Análisis estadístico del modelo lineal de la cinética de pérdida de masa. (R=1)	79
Cuadro 27. Densidad aparente del cacao tostado por efecto de la masa y temperatura.	81
Cuadro 28. Contenido de humedad final del cacao tostado por efecto de la masa y temperatura.	83
Cuadro 29. Pérdida de masa seca del cacao tostado por efecto de la masa y temperatura.	84
Cuadro 30. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.	85

RESUMEN

El cultivo del cacao en Costa Rica, se concentra en las provincias de Limón, Alajuela y Puntarenas, sumando aproximadamente 3.169,6 ha sembradas. El presente trabajo tiene como objetivo general desarrollar un modelo matemático para representar la cinética de secado y la pérdida de masa del cacao durante el tostado. Específicamente se determinó el efecto de la temperatura en la rapidez del secado en una capa delgada de granos de cacao a 5 temperaturas (35,45, 55, 65 y 75 °C). Posteriormente, se estableció una relación de equilibrio entre el contenido de humedad del cacao y la humedad relativa del aire. Se evaluaron los métodos estático y dinámico con el fin de disminuir el contenido de humedad de los granos y su efecto en la menor humedad relativa. Por último, se determinó la cinética de la pérdida de masa asociada al calentamiento de los granos de cacao durante la torrefacción, donde se evaluaron los modelos estadísticos de Vargas –Elías y Abarca; utilizados para describir originalmente el tueste en granos de café. Se comprobó que el modelo que mejor describe el comportamiento de los datos es el de Midilli, determinándose el efecto de la temperatura del aire en la rapidez de secado donde la ecuación de Arrhenius describe adecuadamente la dependencia de la temperatura. Se determinó que el contenido de humedad en equilibrio disminuye conforme se aumenta la temperatura del aire de secado para las muestras obtenidas por el método dinámico; además, se evaluaron varios modelos propuestos y se estableció que el modelo de GAB es el que representa adecuadamente el equilibrio higroscópico de los granos de cacao en desorción. Quedó demostrado que los granos de cacao tienen un comportamiento similar a los granos de café durante la torrefacción.

1. INTRODUCCIÓN

El cacao, similar al café o al té, contiene una alta concentración de alcaloides que actúan como agentes estimulantes para los humanos. A pesar de esto, el cacao no se considera un estimulante natural, sino más bien un alimento, ya que contiene un alto valor nutricional (1).

Este producto tuvo un papel fundamental en la vida económica, social, religiosa y política de los prehispánicos mayas. De esto se deduce que el cacao no era accesible para la sociedad en general, solo estaba disponible para aquellos con poder e influencia (2). La distribución de la producción del cacao a escala mundial, de acuerdo con la Organización Internacional del Cacao (ICCO) en el período 2017-2018 fue de 76,1% para África, 16,3% América y Asia; y Oceanía con 7,6% (3).

El mercado mundial de cacao distingue entre dos categorías amplias: de grano “fino o de aroma” y el de grano “ordinario”; encontrándose Costa Rica dentro del primer caso donde este estatus fue otorgado la ICCO. De acuerdo con esta organización, países como Bolivia, Costa Rica, México y Colombia, tienen una participación de variedades de cacao fino entre 95% y el 100% del total de exportación (4).

Con respecto a Costa Rica, el cultivo del cacao se concentra en las provincias de Limón, Alajuela y Puntarenas, sumando aproximadamente 3.169,6 ha sembradas. Las regiones y cantones donde se desarrollan las plantaciones son las regiones Huetar Caribe (Talamanca, Limón, Matina, Siquirres, Guácimo y Pococí), Huetar Norte (Upala y Guatuso); y la Brunca (Buenos Aires, Corredores, Golfito y Pérez Zeledón) (4).

La competitividad del cacao en Costa Rica, está sustentada por las condiciones climáticas, abundantes suelos aptos, ubicación geográfica con cercanías a grandes consumidores y tránsito directo a Europa y Estados Unidos de América (EE.UU.), así como por la mano de obra típicamente familiar que reduce los costos de operación. La producción nacional no es significativa para las necesidades de la industria nacional ni para la producción mundial. El

rendimiento nacional se estima en 273 kg/ha de mazorcas con mucha variabilidad entre las zonas productoras (4).

La producción nacional de chocolate y demás preparaciones alimenticias que contengan cacao, de acuerdo a la información del Banco Central de Costa Rica (BCCR) se dirige a 46 destinos, sin embargo en 29 países se exportó al menos una tonelada de producto terminado en el periodo comprendido del 2011 al 2015 (4).

Para evitar el efecto de la variabilidad de la calidad del cacao, debido a la zona de producción y a las diversas prácticas de poscosecha, se recomienda el secado artificial como complemento al secado natural, por lo tanto; se busca con este trabajo establecer parámetros técnicos que intervienen en la eficacia del secado y del tueste de los granos de cacao.

A su vez, el tostado de granos de cacao es un tema que hoy en día se realiza de forma rudimentaria y no existen parámetros para establecer los niveles de tueste del mismo, en ningún sistema implementado. Es por ello que al desarrollar este trabajo se pretende establecer un sistema que pueda ser utilizado a nivel nacional, con el fin de ayudar a los pequeños productores y con ello determinar las temperaturas y tiempos requeridos para alcanzar los niveles de tostado deseados.

1.1. OBJETIVOS

1.1.2. Objetivo General: Desarrollar un modelo matemático para representar la cinética de secado y la pérdida de masa del cacao durante el tostado.

1.1.3. Objetivos Específicos:

1. Determinar el efecto de la temperatura en la rapidez del secado en una capa delgada de granos de cacao y establecimiento de un nuevo modelo.
2. Establecer una relación de equilibrio entre el contenido de humedad del cacao y la humedad relativa del aire y desarrollo de un nuevo modelo.
3. Determinar la cinética de la pérdida de masa asociada al calentamiento de los granos de cacao durante la torrefacción.

2.1 Generalidades

El árbol de cacao (*Theobroma cacao*, L.) se originó en América Central y Sur donde se cultivó; y las semillas de su fruto fueron consumidas por la civilización maya del preclásico desde el año 600 aC (2). El cacao fue introducido en Europa por los conquistadores españoles, después de la conquista española de México, este cultivo se extendió a las islas del Caribe, partes de América del Sur y más tarde a través del Pacífico. Hacia el final del siglo XIX, el cacao fue llevado desde Brasil a través del Atlántico hasta Ghana, donde formó la base para la producción de cacao en el oeste de África (1).

La expansión geográfica del cacao significa que los atributos distintivos del grano, como el tamaño, sabor, color y composición química varían considerablemente en las semillas de diferentes orígenes. Históricamente, los dos tipos principales de cacao se conocen como Criollo (*T. cacao* var. *Cacao*) y Forastero (*T. cacao* var. *Sphaerocarpum*) que se dividen en diversas variedades (1); además existe la variedad Trinitario, el cuál es un híbrido de las dos variedades mencionadas anteriormente (5). En el mercado actual, la mayoría de los granos que se comercializan son del árbol forastero y comúnmente se les conoce como cacao “a granel”, mientras que los granos criollos se conocen como cacao “fino” o “de sabor” que se asocia con su sabor único (5).

Actualmente, el cacao se cultiva a temperatura promedio de 20°C al norte y al sur del ecuador, la temperatura mínima en la mayoría de las regiones de cultivo de cacao es de 18°C, y la temperatura máxima promedio es de 32°C. El cultivo requiere una alta precipitación de 1000-4000 mm/año y la estación seca preferiblemente debe ser más corta, aproximadamente 3 meses y no totalmente seca (1). Antes de madurar, el color de los frutos de cacao varían de verde a rojo o morado; eventualmente se tornan amarillos o anaranjados conforme se maduran, en este punto los frutos están cubiertos con una pulpa mucilaginosa dulce de color

blanco, comúnmente cada fruto contiene de 30 a 50 granos frescos, más los criollos usualmente contienen menos de 30 (5).

En el Cuadro 1, se observan los tipos de cacao con sus principales características.

Cuadro 1. Características de los granos de cacao; forastero, criollo y trinitario (5).

	Forastero	Criollo	Trinitario
Tipo	A granel	Fino/de sabor	Principalmente fino/de sabor
Color del cotiledón fresco	Morado	Morado claro o blanco	Varios rangos
Sabor	Fuerte	Suave y a nuez	Más fuerte que el forastero, con perfiles frutales a florales
Color del fruto	Verde/Amarillo	Rojo, amarillo/Anaranjado	Varios rangos

Con respecto al proceso de producción de cacao, las vainas se cosechan cuando cambian de color y estas miden entre 15 y 25 cm de largo, se cosechan dos veces al año, ya que el ciclo de polinización hasta la maduración demora alrededor de seis meses. En África occidental esto generalmente se lleva a cabo en el cuarto trimestre del año, más en Costa Rica algunos cosechan durante todo el año y otros lo realizan solamente en los periodos de mayor producción, dos picos en el año (6).

Inicialmente los granos de cacao fresco son procesados y secados en una planta luego de la cosecha. Los pasos a seguir en el proceso son importantes no solo porque preservan las características del material, sino que también se desarrolla el sabor el cuál es sumamente importante en el proceso de tueste. En la Figura 1, se muestra la estructura de un grano de cacao fresco el cual contiene una capa externa de mucílago que cubre la testa y el cotiledón del grano (5).

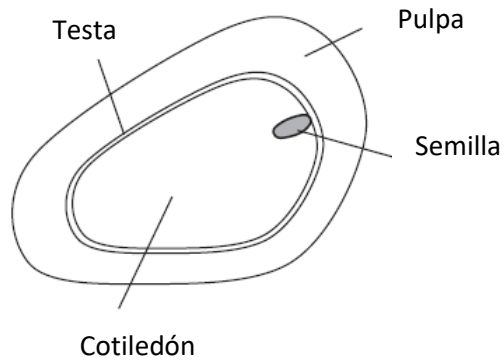


Figura 1. Estructura de un grano de cacao fresco (5).

2.2 Cultivo y desarrollo de los cacaoteros en Costa Rica

Los productos agrícolas requieren varios procesos poscosecha para prevenir y minimizar las posibles pérdidas de granos de cacao hasta su comercialización, estos procesos comprenden la ruptura del grano, la fermentación, el secado, la selección y el almacenamiento. La fermentación y el secado son las operaciones principales donde se resaltan las propiedades de los granos (7). En la Figura 2 se muestra el proceso de beneficiado de cacao.



Figura 2. Proceso de beneficiado de cacao.

2.2.1 Fermentación

El proceso de fermentación de los granos de cacao se puede dividir en dos eventos importantes; primero, se generan ácidos orgánicos, etanol y calor como resultado de actividades microbianas y segundo, se inician reacciones bioquímicas complejas por la difusión de productos de metabolismo microbiano dentro de los cotiledones. Este tiene como objetivo eliminar la pulpa residual, matar el embrión y mejorar el aroma, el sabor y el color del grano. La remoción de la pulpa mucilaginoso durante la fermentación es muy importante, ya que esta inhibiría el secado de los granos a un contenido de agua microbiológicamente estable (1). Este proceso tiene una duración de 3 a 13 días, dentro de los cuales es necesario mezclar los granos una o dos veces al día para obtener una fermentación uniforme, proporcionar aireación suficiente y mantener las temperaturas por debajo de 45 a 50°C. El proceso más utilizado actualmente es la fermentación en pilas que se lleva a cabo en hojas de plátano o en lona alquitranada; así como otros métodos como la fermentación en caja (1).

Guehi et al. (6) mencionan en su trabajo que utilizan la fermentación en cajas, donde colocan muestras de 25 kg de granos aproximadamente, en cajas de madera con hojas de plátano durante 6 días. La masa de granos de cacao húmedos fue cubierta con hojas frescas para aislar el material. La mezcla inicial se realizó después de 48 horas y posteriormente se volvió a las siguientes 48 horas para facilitar la aireación adecuada de la masa de fermentación y con ello garantizar que los granos de la parte superior e inferior se mezclaran bien. Se añadió una capa nueva de hojas de plátano a las hojas originales después de cada vuelta para garantizar un aislamiento adecuado.

La fermentación adecuada es importante porque detiene la germinación y da un buen sabor a los granos a la hora del tueste. Este paso es necesario para comenzar el proceso de desarrollo del sabor del cacao que necesitan los fabricantes de chocolate (8).

2.2.2 Secado

Posteriormente, los granos se deben secar inmediatamente para evitar la fermentación excesiva, lo que podría conducir al deterioro del producto. Al final de este proceso, los granos tienen un contenido de humedad de aproximadamente 60% b.h.; esto debe reducirse idealmente al 7,5% b.h. mediante secado al sol o secado artificial.

El secado al sol se realiza en aquellas regiones que están libres de lluvia durante el período de cosecha. Si bien no es imposible producir cacao de buena calidad a partir de granos secados artificialmente, es un proceso más costoso y requiere más cuidado (9). Similarmente lo mencionan Schillinger et al (1); el contenido de humedad de los granos inicialmente oscila entre 40-60% b.h y debe disminuirse hasta 6-7% b.h.

El secado al sol de los granos de cacao es el más común, consiste en exponer los granos de cacao al sol desde la mañana hasta la tarde. Normalmente los granos se extienden en bandejas de madera con un área de aproximadamente 30-90 cm y se secan al sol hasta alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente 7% b.h., estos se mezclan cada hora para garantizar la uniformidad (6).

El secado se puede llevar a cabo utilizando métodos de aire caliente naturales o artificiales. El proceso de desarrollo del sabor continúa durante este proceso, el cual generalmente termina cuando el contenido de humedad de los granos secos alcanza el 7,5 % b.h. (10) y entre 7-8 % b.h. según lo indican Simplicio et al (6).

Según lo exponen Simplicio et al (6), los granos de cacao en crudo se secaron artificialmente empleando un horno ventilado a temperatura de 60°C hasta un contenido de humedad del 7%, estos se extendieron en una sola capa de 2 cm de grosor en una bandeja con malla. El calor fue generado por el calentador integrado en las paredes laterales del horno y el aire caliente fluyó a través de las muestras. Los granos se mezclaron cada 2 horas para garantizar la uniformidad. El secado se realizó durante 8 horas al día, y las muestras se dejaron a temperatura ambiente durante la noche.

En el caso de Koua et al., se utilizó un túnel de secado, donde los granos de cacao se secaron por medio de convección forzada, se realizaron pruebas a temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C a una velocidad de 0,6 m/s y con una velocidad de 1 m/s a 60 °C. La masa de los granos se midió con una frecuencia de 20 min con el fin de que la diferencia entre dos mediciones de masa sucesivas fueran inferior a 0,002 g. Dependiendo de la temperatura del aire de secado, los experimentos de secado duraron entre 20 y 40 h (11).

El clima húmedo que predomina en las zonas productoras durante la cosecha no permite realizar el secado natural al sol, siendo uno de los principales problemas que enfrentan los productores de Costa Rica. La fermentación de la semilla genera un alto contenido de humedad del cacao, por lo tanto; el secado debe realizarse artificialmente en secadoras utilizando aire caliente en condiciones controladas de flujos de aire, temperatura y masa (12). Para facilitar esta operación se deben adaptar secadoras utilizadas para otros granos y realizar estudios técnicos que faciliten las decisiones de operación en relación a la temperatura, velocidad, contenido de humedad y tiempo de proceso.

El secado de los granos requiere de las condiciones límites de humedad que son establecidas en una curva de equilibrio higroscópico desarrollada específicamente para semillas de cacao; sin embargo, en Costa Rica aún no ha sido realizado un estudio conducente a establecer esta relación de equilibrio higroscópico con nuestras variedades y el último estudio técnico de secado en cacao fue realizado hace 20 años en capa gruesa (12).

El secado es indispensable para el control y mantenimiento de la calidad de los productos, este proceso reduce el contenido de humedad y la actividad del agua (a_w) a niveles seguros. Los valores altos de estos dos parámetros pueden conducir al crecimiento de microorganismos y al deterioro del producto; por otro lado, los valores bajos pueden llevar al uso excesivo de energía consumida durante el secado y causar alteraciones no deseadas de la materia prima (13).

El uso adecuado de la energía se basa en determinar el final del secado, relacionado con el equilibrio de la humedad de los granos con la humedad relativa del aire utilizado en un

secador convectivo. Otra forma de optimizar el secado es variando la temperatura y la velocidad del aire asociado a las etapas de secado a tasa constante y a tasa decreciente (14).

2.2.3. Almacenamiento

El último proceso del cacao es la evaluación de calidad, para lo que se debe realizar muestreos al azar del lote a analizar, a un máximo del 30% de los sacos. Estos se realizarán con el fin de controlar el porcentaje de humedad interna del grano. El cacao beneficiado debe estar regulado por las normas establecidas FAO/OMS en cuanto a plaguicidas, aflatoxinas y metales pesados; así como no debe estar infestado, con olores a moho, ácido butírico, agroquímicos o cualquier otro olor y debe estar libre de impurezas y materias extrañas. Dentro del porcentaje de cacao beneficiado, los granos defectuosos no deben exceder el 1% de granos partidos (15).

El almacenamiento de granos de cacao en las fincas tiene serios inconvenientes: generalmente no se dispone de bodegas adecuadas y seguras, por lo tanto cuando los granos no se han secado apropiadamente, están propensos a invasión de mohos y a infestarse de insectos. El cacao en el clima tropical húmedo soporta períodos de almacenamiento de 2 a 3 meses sin asumir riesgos en su calidad. Lo más aconsejable es comercializar el grano inmediatamente después de su empaque (16).

Los granos almacenados responden a las isotermas de absorción de agua que proporcionan información sobre el mecanismo de equilibrio y las interacciones entre los componentes de los alimentos y el agua. El conocimiento y la comprensión de estas, son necesarios para el diseño y la optimización de los equipos de secado, el diseño de empaques, la estimación de la estabilidad durante el almacenamiento y para calcular los cambios de humedad que pueden ocurrir durante el acopio como mencionan Gabas et al (17) y Hassini et al (18).

Las isotermas de desorción describen la relación entre el contenido de humedad y la humedad relativa (HR) del entorno que rodea al fruto; esta HR es igual a la actividad del agua del producto cuando el aire y el material utilizado están en equilibrio. Estas isotermas son únicas

para cada producto y son necesarias para comprender las variaciones de humedad durante el almacenamiento y el preprocesamiento (19).

Los tipos de curvas de equilibrio dependen desde la variedad hasta del proceso a que fueron sometidos los granos. En la Figura 3 se muestra una clasificación según la forma de la curva así como el fenómeno de histéresis.

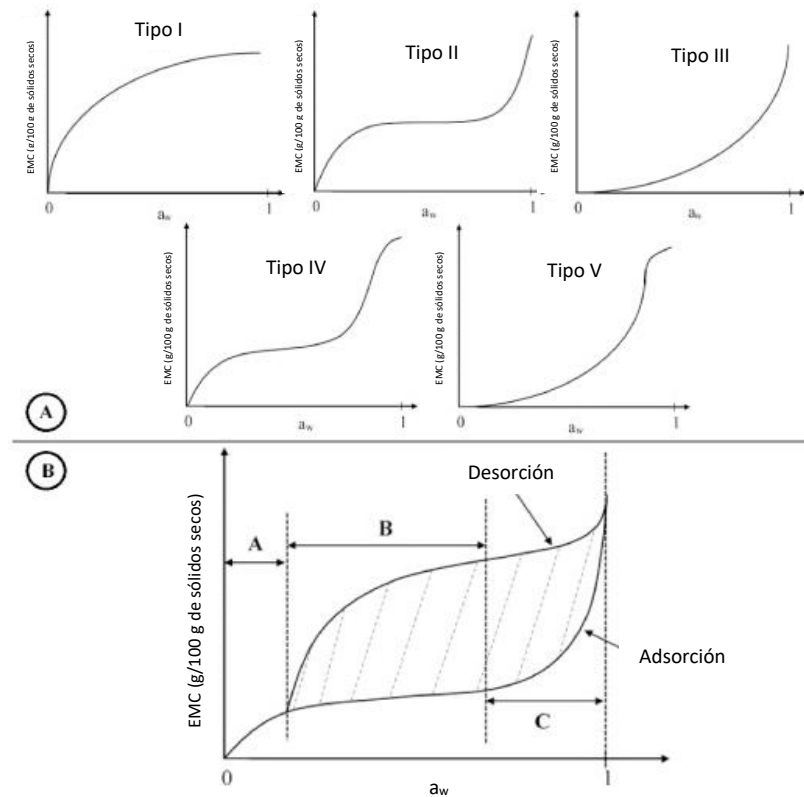


Figura 3. Tipos de curva de equilibrio clasificados por la forma (10).

En este sistema de clasificación, la forma de la curva de equilibrio difiere entre sí, algunas investigaciones indica que para el grano de cacao seco (sin tostar) es semejante al tipo II (19), mientras que otros del tipo III (20).

Muchos de los problemas de la estabilidad de los granos de cacao en el almacenamiento y transporte se relacionan al contenido de humedad y la actividad de agua dentro del grano. Dentro de estos, también es importante la estabilidad microbiológica y el fenómeno de

transporte de agua que puede tomar lugar durante el trasiego o almacenamiento por las variaciones de temperatura externas, esto puede llevar a la migración del agua generando condensación como resultado induciendo a un rápido deterioro de los granos, por ello es importante el uso de una curva para el almacenamiento correcto de los alimentos (15).

Además, es de gran importancia realizar un correcto almacenamiento ya que puede existir el desarrollo de hongos como las ocratoxinas (OTA); esta es una toxina producida principalmente por hongos del género *Aspergillus* y *Penicillium*, la cual posee propiedades nefrotóxicas, inmunotóxicas, teratogénicas y carcinogénicas; y ataca diversos cultivos, entre ellos el cacao, por lo que es recomendable mantener los granos en almacenamiento seguro a menos de 67% de humedad relativa en el espacio intergranular (21).

2.2.4. Torrefacción

La operación de tueste resalta el sabor y color del cacao; la temperatura, el tiempo y la cantidad de humedad involucrada en el proceso de tostado dependen no sólo del origen del cacao, sino también del tipo de chocolate o productos requeridos en el proceso. Los cacaos finos y delicados necesitan un tueste ligero, bajas temperaturas, en el rango de 95-110 °C, durante un período de tiempo más corto; este proceso se aplica a cacao destinados al chocolate con leche, ya que produce algunos polvos de cacao o una manteca delicada. Las temperaturas más altas inducen aún más un sabor amargo en la manteca de cacao resultante. Los rangos de tostado van desde los mencionados anteriormente hasta 149 °C (9).

En la actualidad no existe una escala para la determinar el grado de intensidad de color en los granos de cacao tostados, pero Krysiak et al. (22) menciona que en el campo de la torrefacción de estos se demuestra que el cambio en el color de los granos se observa principalmente como la relación de parámetros que interactúan en el proceso como lo son la temperatura y la rapidez de tueste.

El tostado también facilita la conservación de los alimentos al destruir los microorganismos, degradar las enzimas y reducir la actividad del agua que podría prevenir el crecimiento

microbiano posterior al tostado. Este ayuda a reducir el número de microorganismos durante el proceso de calentamiento, especialmente cuando los granos de cacao se obtienen de diversas fuentes que podrían tener un contenido de microorganismos diverso. Debido a la creciente preocupación por la contaminación por micotoxinas en los granos de cacao, particularmente la ocratoxina A (OTA), este proceso ofrece una ventaja significativa en la reducción del contenido de OTA en los granos de cacao, donde el tueste a 140°C durante 15 minutos podría reducir el 85,7% de la OTA (5).

Dentro de los trabajos desarrollados en este tema se observó la utilización de 200 g de semilla la cual fue tostada usando un horno convectivo de aire caliente durante 40 minutos a temperatura 120, 130 y 140°C bajo una configuración de flujo de aire medio (23). Además, Rocha et al. (22) estudiaron este proceso mediante una tostadora giratoria, con dispositivos de control de temperatura. Al iniciar el proceso, la temperatura de la cubierta de calentamiento se estabilizó a 80°C.

Ramli et al. (24), realizaron pruebas con muestras de 500 g de granos de cacao de tamaño uniforme vertido y asado en un horno de secado de flujo de aire forzado. Los parámetros de temperaturas utilizados fueron 120, 130, 140, 150, 160 y 170 °C durante 20, 30, 40 y 50 min, con un flujo de aire de 1,0 m/s, que se consideró como la velocidad de flujo óptima basada en resultados obtenidos por Krysiak et al. (25). El tostado de los granos de cacao se terminó cuando el contenido de agua fue de ± 5 % b.h.

Los tostadores de tipo tambor (cilíndrico) sigue siendo la opción preferida para tostar granos de cacao a pequeña escala. Estos utilizan calentamiento indirecto por medio de convección/vapor o calentamiento directo con gas, carbón o placas de calefacción eléctrica se han convertido en una opción popular debido a su capacidad para producir un tostado uniforme y flexibilidad para controlar el proceso. Actualmente, los tostadores de pequeña capacidad que normalmente se usan para café (300 g - 50 kg por lote) se han convertido en una opción popular entre los productores de chocolate en Indonesia, ya que son atractivos y asequibles (5).

Al realizar estudios a alta temperatura de procesamiento se debe considerar que estas pueden promover la oxidación de los lípidos y la coloración no enzimática, que tienen la propiedad de disminuir el valor nutricional de los alimentos al causar una pérdida de ácidos grasos esenciales, aminoácidos esenciales y carbohidratos digeribles. También conducen a la destrucción de vitaminas y la reducción de la digestibilidad de las proteínas (26).

3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

El desarrollo del presente proyecto se llevó a cabo en conjunto con la Vicerrectoría de Acción Social para el desarrollo del proyecto ED-3391 *Acompañamiento al desarrollo de prácticas de Economía Social Solidaria, Seguridad Alimentaria y Nutricional y Agricultura Familiar en comunidades de Upala*.

Este estudio se desarrolló en el Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica. El material utilizado fue de la variedad Pacari adquirido de la planta procesadora de chocolate *Philio* en la zona de Upala, Alajuela, Costa Rica.

Contenido de Humedad

La determinación del contenido de humedad en los granos de cacao se realizó mediante la norma ISO 2451:2017 *Cocoa beans-Determination of moisture content (Routine method)* (27), esta consiste en secar 5 g del producto por 16 horas en un horno de convección a una temperatura de 103 °C, en muestra molida.

3.1 Determinación del efecto de la temperatura en la rapidez del secado en una capa delgada de granos de cacao.

Materia Prima

Se utilizaron aproximadamente 5 kg de cacao fermentado con un contenido de humedad inicial de 51,9% en base húmeda (b.h.).

Proceso de Secado

El proceso de secado se realizó en una secadora construida experimentalmente provista con un sistema de monitoreo en tres puntos, con 3 sensores de humedad relativa y temperatura del aire (DHT-22 modelo AM2303), como se muestra en la Figura 4. Los sensores trabajan en rangos de humedad con valores de 0 a 100% ($\pm 2\%$) y con temperaturas desde -40 a 125

°C ($\pm 0,2$ °C). Los sensores se colocaron con el objetivo de registrar las condiciones del aire de entrada en el ventilador (punto 1), después de pasar la resistencia eléctrica (punto 4) y a la salida de la secadora (punto 6).

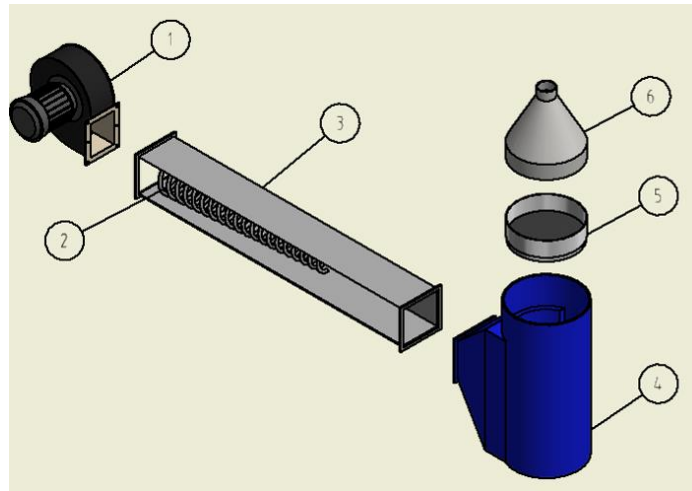


Figura 4. Secadora y sistema de monitoreo en tres puntos para registro de las condiciones del aire (28).

1. Ventilador centrífugo. 2. Resistencia eléctrica. 3. Ducto de aire. 4. Homogenizador. 5. Tamiz. 6. Salida de aire.

El sensor ubicado en el punto 4 permitió controlar las condiciones del aire de secado a través de un comando en el microcontrolador. Se utilizó un microcontrolador Arduino UNO R3 como el que se muestra en la Figura 5 y mediante el código que rige el sistema se realizó la toma de datos y el control de la operación de la resistencia eléctrica para generar diferencias en la temperatura del aire de secado, esta se controló mediante un relé donde se manejó un rango de trabajo de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ de las temperaturas de trabajo estipulada en el código principal.



Figura 5. Arduino UNO R3, utilizado para la programación del sistema de monitoreo y control de la secadora.

El secado del cacao se realizó mediante el método de capa delgada de material con la altura de un grano de cacao, donde se utilizó aproximadamente 265 g de semillas por medición. Estas se colocaron sobre un tamiz N° 4, para permitir el paso del aire por la capa de granos.

Las temperaturas de secado fueron de 35, 45, 55, 65 y 75 °C, a una velocidad constante del aire de 1 m/s. La masa de las semillas se midió por medio de una balanza de precisión marca BOECO modelo BPS 51 plus ($\pm 0,5$) como la que se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Balanza marca BOECO.

Los registros de masa se realizaron en intervalos de 5 minutos durante las primeras 3 horas y después cada 20 min hasta completar un total de 12,5 horas. El tiempo se determinó por medio de pruebas preliminares donde se observó que 12 horas fueron suficientes para observar el comportamiento general de las curvas, además esto se respaldó mediante estudios similares sobre secado de granos de cacao mediante métodos convectivos. Los ensayos en cada temperatura se realizaron por triplicado.

Determinación del modelo matemático para el secado

Pérdida de masa

Mediante la ecuación 1 se determinó la pérdida de masa de los granos de cacao por medio de la diferencia de masa antes y después del proceso.

$$X_o = 100 \cdot \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \quad (1)$$

Donde

X_o : Pérdida de masa de la semilla [%]

m_i : Masa inicial de los granos antes de la prueba [g]

m_f : Masa final de los granos después de la prueba [g]

Contenido de Humedad

Se calculó el contenido de humedad durante la prueba de secado de los granos fermentados de cacao, por medio de la ecuación 2, con muestras de alrededor de 5 g y la masa total utilizada en cada prueba de aproximadamente 265 g se determinó la masa de agua para observar la variación de humedad en el tiempo de secado.

$$X_n = \left[1 + (X_o - 1) \cdot \left(\frac{M_o}{M_n} \right) \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Donde

X_n : Contenido de humedad en base húmeda (b.h.) en el tiempo t de secado [%]

X_o : Contenido de humedad en base húmeda (b.h.) en condición inicial [*decimal*]

M_o : Pérdida de masa de la semilla [g]

M_n : Masa final de la semilla en el tiempo n de secado [g]

Con el fin de determinar la razón de humedad (ecuación 4), se determinó por medio de la ecuación 3 inicialmente el contenido de humedad en base seca (b.s.) para posteriormente establecer el modelo de mejor ajuste.

$$X_s = \frac{100 \cdot X_n}{(100 - X_n)} \quad (3)$$

Donde

X_s : Contenido de humedad en base seca (b.s.) en el tiempo t de secado [%]

X_n : Contenido de humedad en base húmeda (b.h.) en el tiempo t de secado [%]

Razón de Humedad

$$RX = \frac{(X_s - X_f)}{(X_i - X_f)} \quad (4)$$

Donde

RX : Razón de humedad en base seca en el tiempo n de secado [*decimal*]

X_s : Contenido de humedad en base seca (b.s.) en el tiempo t de secado [%]

X_e : Contenido de humedad en base húmeda en el tiempo final de secado (12,5 h) [%]

X_i : Contenido de humedad en base seca en el tiempo inicial de secado [%]

Para analizar la cinética de secado, se ajustaron los datos experimentales a los modelos matemáticos que se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Modelos matemáticos utilizados para el secado de productos agrícolas.

Nombre del Modelo	Modelo
Page (29)	$MR = \exp(-kt^n)$
Midilli (30)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Lewis (31)	$MR = \exp(-kt)$
Henderson & Pabis (32)	$MR = a \exp(-kt)$
Logarítmico (33)	$MR = a \exp(-kt) + b$
Wang & Singh (31)	$MR = 1 + at + bt^2$
Difusión Aproximada (34)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kgt)$
Verma (35)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-gt)$
Hii et al. (10)	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$

MR es la razón de humedad en base seca, t es el tiempo, los parámetros a, b, n, g y k son coeficientes que describen los modelos.

El efecto de la rapidez de secado (k) se determinó mediante la ecuación de Arrhenius (ecuación 5).

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (5)$$

Donde

k: Constante de secado [min^{-1}]

k_0 : Factor preexponencial o factor de frecuencia [min^{-1}]

E_a : Energía de activación [$J \ mol^{-1}$]

R: Constante universal de los gases [$8,3145 \ J \ K^{-1} \ mol^{-1}$]

T: Temperatura absoluta [K]

Las variables de respuesta en los tratamientos de secados como el cambio de la masa, el contenido de humedad y la razón de humedad en función del tiempo, se analizaron con el software SigmaPlot 14.0 para determinar las constantes de los modelos matemáticos por regresión no lineal. Los criterios para la selección del modelo están basados en el mayor valor

del coeficiente de correlación, el menor error estándar y una distribución aleatoria de los residuos.

3.2. Establecimiento de relación de equilibrio entre el contenido de humedad del cacao y la humedad relativa del aire.

Para la generación de las curvas para el contenido de humedad de equilibrio se determinó inicialmente el contenido de humedad de las muestras de granos por medio de una primera etapa realizada en un túnel de secado de flujo transversal, esta etapa es conocida como método dinámico.

Las muestras obtenidas por el método dinámico fueron colocados en un desecador de vidrio como el que se muestra en la Figura 7, con un sensor marca HOBO (data logger) marca Onset modelo U12-013 (Figura 8) que trabaja en un rango de temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$) y a una humedad relativa de 5% a 95% ($\pm 2,5\%$) , con el fin de determinar la temperatura y humedad relativa del aire en el periodo de 3-7 días, dependiendo del contenido de humedad inicial del grano; con el fin de determinar un contenido de humedad menor, mediante el método estático.



Figura 7. Desecador de vidrio con material desecante sólido CaCl_2 .

El método estático se realiza utilizando soluciones de sales saturadas para producir un microambiente con humedad relativa constante y una vez la capa de granos húmedos hayan alcanzado el equilibrio con el aire. Se utilizó CaCl_2 como material desecante con el fin de disminuir el contenido de humedad de los granos y su efecto en la menor humedad relativa.



Figura 8. Sensor de humedad y temperatura (Data logger modelo U12-013)

Posteriormente, se colocaron las muestras en recipientes con un HOB0 data logger marca Onset modelo UX100-003 (Figura 9) que trabaja con rango de temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$) y a una humedad relativa de 1% a 95% ($\pm 2,5\%$); y estos en una incubadora marca INCUCELL a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, con el fin de determinar la humedad de equilibrio con el aire.



Figura 9. Sensor de humedad y temperatura (Data logger modelo UX100-003).

Modelo de mejor ajuste

Las ecuaciones empíricas empleadas fueron GAB, BET, COPACE según lo describe Afonso et al (36), la ecuación de Sánchez (37) y un nuevo modelo propuesto como se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Modelos empíricos de equilibrio en granos.

Modelo	Ecuación
Guggenheim, Anderson y Boer (GAB) (36)	$x_{we} = \frac{x_w \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot K \cdot a_w)}$
Modelo de multicapa (BET) (36)	$x_{we} = \frac{x_w \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C - 1) \cdot a_w)}$
COPACE (36)	$x_{we} = e^{(a - bt + c \cdot a_w)}$
Sánchez (2018)	$x_{we} = e^{\left(\frac{\ln\left(\ln\left(\frac{c}{c - a_w}\right)\right) + b}{a} \right)}$
Modelo propuesto	$x_{we} = e^{\left(\frac{\ln\left(\ln\left(\frac{d \cdot c}{c - a_w}\right)\right) + b}{a} \right)}$

x_{we} es el contenido de humedad, a_w es la actividad de agua, t es el tiempo y los parámetros x_w , c , k , b y d son coeficientes que describen los modelos.

Las constantes de los modelos empíricos de equilibrio en los granos de fueron determinados por regresión no lineal. La selección de los modelos se basó en el alto valor del coeficiente determinación (R^2) y la aleatoriedad en el análisis de residuos según lo describen Baptestini et al. (38) Las variables de contenido de humedad del cacao y humedad relativa del aire, se analizaron en el software SigmaPlot 14.

3.3. Determinación de la cinética de la pérdida de masa asociada al calentamiento de los granos de cacao durante la torrefacción.

Materia prima

Se utilizó un único lote de cacao seco, no se contó con una selección previa por tamaño. El contenido de humedad inicial en base húmeda de los granos fue de 7,23% (b.h.) y con una densidad aparente de 513,57 g/L. El producto se colocó en bolsas de polietileno y se almacenó en una cámara a 6 °C, con el fin de mantener las condiciones del producto hasta antes del proceso de torrefacción. Antes de realizar dicho proceso, las muestras requeridas

fueron retiradas de la cámara y colocadas durante aproximadamente 12 h a temperatura ambiente, como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Muestras colocadas a temperatura ambiente.

Proceso de torrefacción

Para la torrefacción del cacao se utilizó un tostador convencional marca BENDIG modelo ECO-2000 (Figura 11), diseñado específicamente para café. Este cuenta con un cilindro rotativo que trabaja a una velocidad constante de 60 RPM, este se calienta con quema de gas propano y cuenta con una capacidad de 2,0 kg de café crudo, según las especificaciones del fabricante. El consumo de gas del tostador, se mantuvo constante, trabajando a la capacidad mínima; su sistema funciona por medio de un regulador de presión instalado en el cilindro de alimentación y una válvula de control para garantizar un flujo constante durante el proceso de tueste. Además el dispositivo cuenta con un sistema de enfriamiento por presión negativa y velocidad constante. Se utilizaron muestras de 500, 1000 y 1500 g a cinco temperaturas con diferencias de 5 °C cada una.



Figura 11. Tostador BENDIG ECO-2000.

Para la escogencia de la temperatura inicial de tueste se utilizó el estudio realizado por Abarca (39) donde se determinó que mediante un análisis de la temperatura del interior del tostador, la temperatura inicial óptima para el tueste es de 280 °C.

Para medir la temperatura de la masa de granos se utilizó un termómetro infrarrojo portátil marca General®, con un rango de lectura desde -32 a 1650 °C, con un tiempo de respuesta de 500 ms, con precisión de 0,1 °C, como el que se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Termómetro infrarrojo General®.

La toma de datos de la temperatura del tostador se realizó mediante un escáner de temperatura marca Cole-Parmer Instrument Company y de fabricación Barnant Company, modelo 92000-00 Benchtop 115 V, como el mostrado en la Figura 13. Los datos registrados por el sistema son enviados a un puerto serial de la computadora, donde se utiliza una interface llamada ScanLink versión 2.0.



Figura 13. Escáner de recolección de datos Cole-Parmer Instrument Company.

Pérdida de masa

Finalizado el proceso de torrefacción los granos fueron enfriados mediante aire a temperatura ambiente. Luego del tueste los granos tienen una pérdida de masa, esta fue evaluada al medir la masa de la muestras antes y después del proceso, por medio de una balanza analítica marca BOECO modelo BPS 51 plus ($\pm 0,5$). Esta propiedad física fue calculada mediante la ecuación 1.

Masa específica aparente

Dado que no existe un método específico para la determinación de la masa específica aparente o densidad aparente de cacao en grano; se determinó la densidad aparente del cacao por medio de la norma INTE/ISO 6669:2009 *Café Oro - Determinación de la densidad a granel por caída libre de los granos enteros*, donde se utilizó un “densímetro”. La norma mencionada consiste en un tanque alimentador con forma de embudo por el cual fluyen los granos en caída libre a un recipiente con volumen conocido de 1000 mL (1litro); para finalizar el proceso, por medio de una espátula se nivelan los granos en el recipiente, el densímetro utilizado se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Densímetro, equipo para determinación de densidad aparente.

El cambio en la densidad aparente se calculó mediante la ecuación 6.

$$\Delta\rho = \left(\frac{\rho_0 - \rho_f}{\rho_0} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Donde

$\Delta\rho$: Cambio en la densidad aparente [%]

ρ_f : Densidad de la muestra de granos al finalizar el proceso de torrefacción $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

ρ_0 : Densidad de la muestra de granos al iniciar el proceso de torrefacción $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Determinación del contenido de humedad

Se realizaron 3 repeticiones de masa constante siguiendo la norma ISO 2451:217, a las cuales se les midió el peso inicial; las muestras se colocaron en una estufa marca MMM Group modelo VENTICELL serie 111, como la que se observa en la Figura 15; posterior al tiempo establecido se midió la masa final de las muestras con el fin de determinar el contenido de humedad en base húmeda (%b.h.).



Figura 15. Estufa MMM Group modelo VENTICELL.

Modelo de variación de la materia seca

La materia seca se obtuvo mediante la ecuación 7, esta es una relación entre el contenido de humedad (%b.h) y la masa.

$$MS = (1 - CH_{bh}) \cdot m \quad (7)$$

Donde

MS : Materia seca [kg]

CH_{bh} : Contenido de humedad en base húmeda [$decimal$]

m : Masa de la muestra [kg]

El cambio de la materia seca como una propiedad que varía en el tueste de cacao se evaluó con la ecuación 8.

$$\Delta MS = \left(\frac{MS_i - MS_f}{MS_i} \right) \cdot 100\% \quad (8)$$

Donde

ΔMS : Cambio en la materia seca [%]

MS_i : Materia seca inicial [kg]

MS_f : Materia seca final [kg]

Modelo de calentamiento de los granos

Para determinar el mejor modelo de ajuste para el calentamiento de los granos de cacao se evaluaron las ecuaciones que se muestran en el Cuadro 4.

Para el modelo de calentamiento, en la ecuación 3, para el secado de productos agrícolas propuestos por Vargas-Elías (40) y utilizado en el trabajo de Abarca (39), existen varias consideraciones:

1. La temperatura del sólido es uniforme durante todo el proceso.
2. Las condiciones de secado son constantes.

3. Todas las dimensiones del sólido son constantes.
4. Las propiedades físicas del sólido son constantes.

Cuadro 4. Modelos para el calentamiento de granos.

Nombre del modelo	Modelo
Vargas-Elías (40)	$T(t) = T_a + \frac{S}{B - K} \cdot (e^{-K \cdot t} - e^{-B \cdot t}) + (T_0 - T_a) \cdot e^{-B \cdot t}$
Abarca (39)	$T(t) = T_0 + Y_0 \cdot t + \frac{a}{b} \cdot (1 - e^{-B \cdot t})$

$T(t)$ es la temperatura de los granos en un tiempo t determinado, T_a es la temperatura ambiente de 22°C, T_0 es la temperatura inicial del tostador de 280°C y los parámetros S, B, K, Y_0, a y b son coeficientes que describen los modelos.

Ambos modelos fueron evaluados originalmente en granos de café, donde el de Vargas-Elías es una adaptación de un modelo de secado convectivo desarrollado por Pabis el cual considera fenómenos de transferencia de calor y el de Abarca es un modelo físico matemático.

Análisis Estadístico

Los datos de masa, temperatura y tiempo obtenidas como variables de respuesta en los tratamientos de tueste, se analizaron en el software SigmaPlot 14.0 para determinar las constantes por regresión no lineal del modelo de calentamiento de los granos de cacao adaptado por Vargas (40) para el tueste de los granos de café, así como el modelo matemático desarrollado por Abarca (39).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación del efecto de la temperatura en la rapidez del secado en una capa delgada de granos de cacao.

Condición de secado

La entrada del aire se caracteriza por las condiciones ambientales imperantes del clima 23,1 °C y 99,7% de humedad relativa, las condiciones del aire de secado fueron 44,7°C y 30,1%, en la salida de la secadora el aire presentó 44,3 °C y 35,2%. Además, en el Cuadro 5 se resume la temperatura de los tres sensores para las cinco condiciones de trabajo.

Cuadro 5. Condiciones promedios ambientales de entrada y salida de los tratamientos estudiados.

Temperatura (°C)	Sensores		
	Ambiente	Secado	Salida
35	23,0 ±0,5 °C; 99,7±0,6%	38,7 ±1,5 °C; 36,5±2,3%	38,1 ±2,8 °C; 42,5±3,8%
45	23,1 ±1,4 °C; 99,7±0,8%	44,7 ±1,3 °C; 30,1±1,7%	44,3 ±2,1 °C; 35,2±2,3%
55	22,7 ±1,3 °C; 99,8±0,6%	52,2 ±3,3 °C; 26,4±3,4%	51,2 ±3,6 °C; 31,7±3,6%
65	22,1 ±01,5 °C; 99,8±0,4%	64,9 ±4,1 °C; 16,8±4,0%	55,7 ±3,9 °C; 26,1±4,7%
75	21,8 ±1,2 °C; 99,9±0,3%	74,5 ±5,5 °C; 13,8±2,2%	65,1 ±5,3 °C; 22,0±2,9%

Modelo de mejor ajuste

Para la ejecución de las pruebas de secado se utilizó material de un único lote de producto del cual se determinó un contenido de humedad inicial aproximadamente de 51% b.h. (108%b.s.); se comprobó al analizar los datos de las temperaturas propuestas de 35, 45, 55, 65 y 75 °C, que la pérdida de masa promedio fue de 39,08%, 45,12%, 47,49%, 49,06% y 49,90% respectivamente para las temperaturas en mención, en el Cuadro 6 se muestran las pérdidas de masa por prueba.

Cuadro 6. Pérdida de masa por prueba.

Temperatura (°C)	Promedio (%)	Desviación Estándar
35	39,08	0,03
45	45,12	0,66
55	47,49	1,07
65	49,06	0,70
75	49,90	0,43

Los valores de humedad final obtenidos por medio del túnel de secado de flujo transversal se compararon con pruebas realizadas en el horno de convección, dando como resultado valores similares entre ambos como se observa en el Cuadro 7. Se puede observar como era de esperarse al igual que en los valores de pérdida de masa; conforme la temperatura aumenta el contenido de humedad final de las muestras es menor.

Cuadro 7. Comparación entre contenidos de humedad final (b.h.)

Temperatura (°C)	Contenido de humedad estimado en pruebas (%)	Contenido de humedad determinado en horno de convección (%)	Error (%)
35	20,84	21,05	1,02
45	12,39	13,11	5,45
55	8,43	8,23	2,48
65	5,61	7,45	24,67
75	4,05	5,49	26,30

Se observa a su vez que a menor temperatura existe una mejor aproximación en los resultados obtenidos de contenido de humedad, esto se pudo deber no solo por la pérdida de agua sino, también a la pérdida de constituyentes en los granos de cacao, durante el secado se los granos estos pasan por un proceso inicial donde se da el calor sensible que permite a los granos de cacao aumentar su temperatura; posteriormente ocurre la fase de calor latente de vaporización donde los granos logran para vaporizar la humedad contenida en el producto la cuál a medida se encuentre más baja costará más extraer el agua. En la Figura 16 se muestra el comportamiento de la humedad en los granos (%b.h.) durante el tiempo de secado.

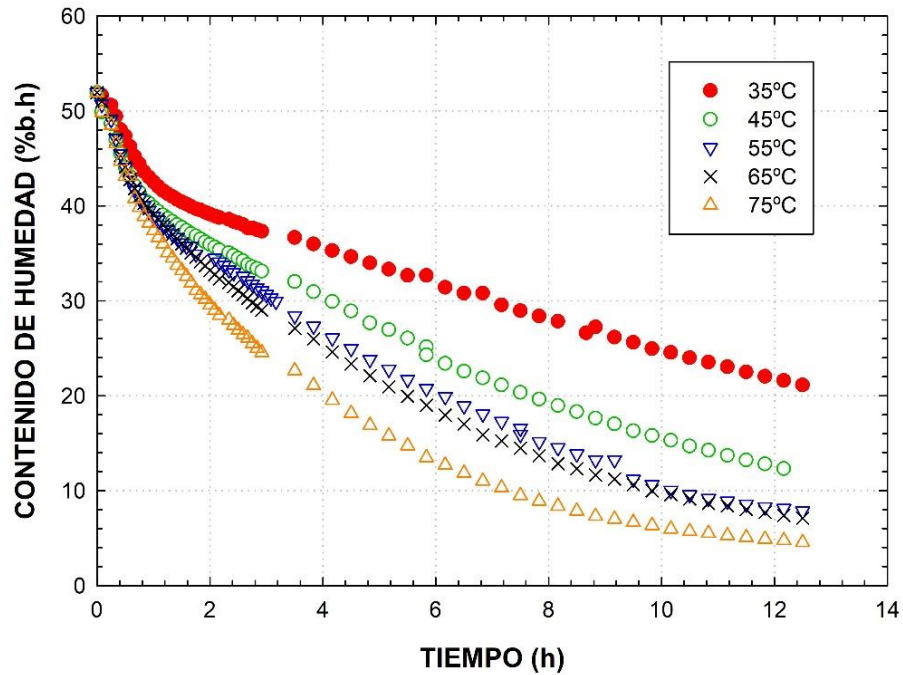


Figura 16. Curva de contenido de humedad (%b.h.) para cacao a cinco temperaturas.

La pérdida de masa al inicio de las pruebas es grande llegando a un punto donde la diferencia entre mediciones es menor a 1 g/20 min, a elevados contenidos de humedad las fuerzas que retienen las moléculas de agua son bajas; conforme la humedad del grano disminuye las fuerzas de retención de las moléculas aumenta, disminuyendo la eficiencia de la energía disponible para evaporar la humedad contenida en los granos más secos (12).

Los datos de ajuste para cada uno de los modelos estudiados se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Valores obtenidos en el ajuste estadístico para los modelos de secado de capa delgada.

Modelo	Constantes	R²	SE	Análisis de Residuos
35 °C				
PAGE	k=0,4746 n=0,6722	0,9758	0,0390	Tendencioso
MIDILLI	k=0,5352 n=0,5045 a=1,0678 b=-0,019	0,9843	0,0316	Tendencioso
VERMA	k=0,1870 g=1,8950 a=0,6681	0,9861	0,0296	Tendencioso
45 °C				
PAGE	k=0,5113 n=0,6744	0,9235	0,0320	Tendencioso
MIDILLI	k=0,5457 n=0,5161 a=1,0382 b=-0,0113	0,9928	0,0212	Tendencioso
VERMA	k=0,2191 g=2,5965 a=0,6954	0,9925	0,0217	Aleatorio
55 °C				
PAGE	k=0,5344 n=0,6904	0,9846	0,0314	Tendencioso
MIDILLI	k=0,5689 n=0,5470 a=1,0363 b=-0,0096	0,9928	0,0216	Aleatorio
VERMA	k=0,2440 g=2,7089 a=0,7005	0,9927	0,0216	Aleatorio
65 °C				
PAGE	k=0,5549 n=0,7226	0,9914	0,0239	Aleatorio
MIDILLI	k=0,5853 n=0,6246 a=1,0295 b=-0,0055	0,9949	0,0185	Aleatorio

Cuadro 8. Valores obtenidos en el ajuste estadístico para los modelos de secado de capa delgada. (continuación).

Modelo	Constantes	R²	SE	Análisis de Residuos
65 °C				
VERMA	k=0,2795 g=2,5204 a=0,7105	0,9955	0,0174	Aleatorio
75 °C				
PAGE	k=0,6129 n=0,7535	0,9963	0,0157	Aleatorio
MIDILLI	k=0,6422 n=0,6929 a=1,0278 b=-0,0025	0,9975	0,0129	Aleatorio
VERMA	k=0,3273 g= 2,074 a=0,6795	0,9983	0,0107	Aleatorio

El modelo de Verma es el que presentó mejores resultados en relación al parámetro R² con valores mayores a 0,98 para cada una de las temperaturas en estudio. La ecuación de Verma fue empleada satisfactoriamente en el secado de capa delgada no solo de cacao como el de Hii et al, sino también en otros productos agrícolas como higo (41) donde se estudió el secado bajo condiciones ambientales en un periodo de 12 horas diarias por 4 días; a su vez también existen estudios de secado en productos como melocotón, uvas, entre otros (42); en estos casos se realizó secado natural en un periodo de 8 horas diarias y secado artificial mediante horno a temperatura ambiente durante la noche hasta que el contenido de humedad en ambos fuera de 7,5% (b.h.).

Las tres repeticiones en cada tratamiento fueron semejantes a pesar de haber sido realizadas en diferentes días y donde las condiciones del ambiente no afectaron la rapidez de secado en las temperaturas estudiadas. El análisis de todos los valores observados en las tres repeticiones puede hacerse con un ajuste general, que predice un valor de contenido de humedad para cada condición de tiempo en el programa estadístico SigmaPlot. Al observar los resultados obtenidos individualmente de las repeticiones realizadas, así como del ajuste general, se observa que al igual que en investigaciones de café (39) (40) y papaya (37); que

al aumentar la temperatura la razón de humedad disminuye de forma más acelerada en el tiempo.

En la Figura 17 y 18, se muestran los valores observados con su respectivo ajuste, donde el modelo de Verma ajustó adecuadamente los datos con R^2 mayor que 98,6% en las 5 temperaturas. Se observa que el ajuste del modelo mejora conforme aumenta la temperatura de secado según el aumento proporcional del valor R^2 hasta 99,8%

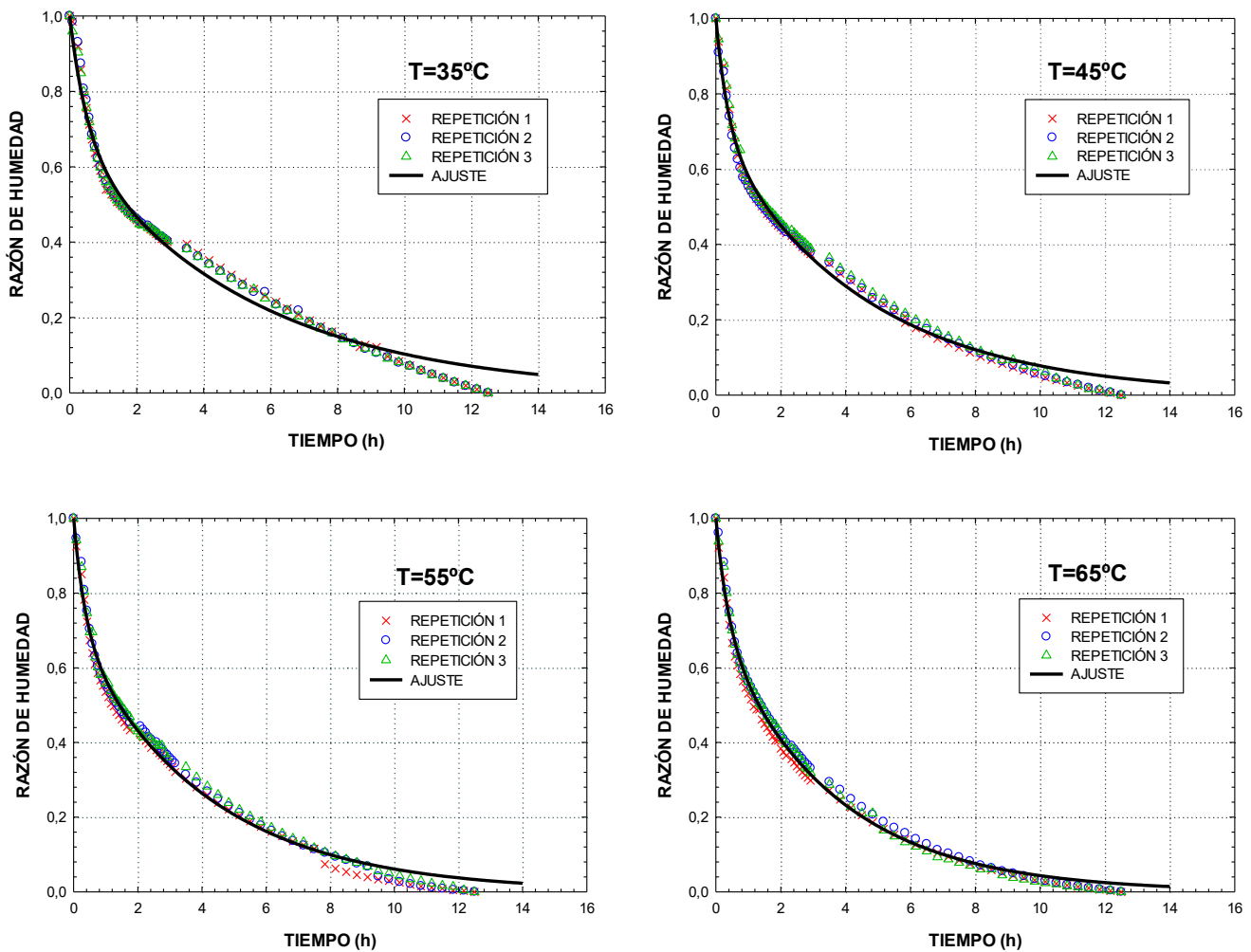


Figura 17. Cinética de secado del modelo de Verma para las temperaturas de estudio.

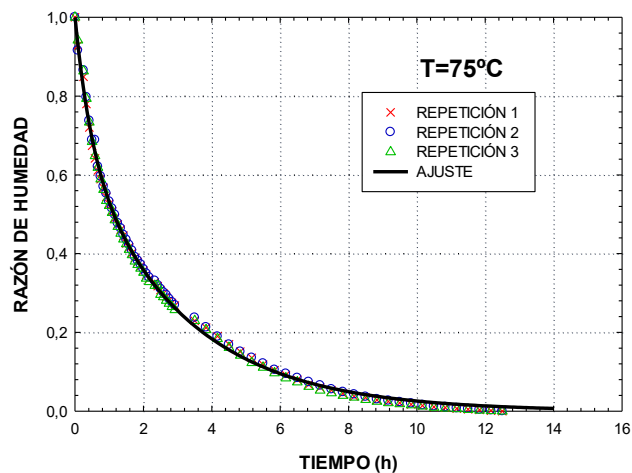


Figura 17. Cinética de secado del modelo de Verma para las temperaturas de estudio. (continuación)

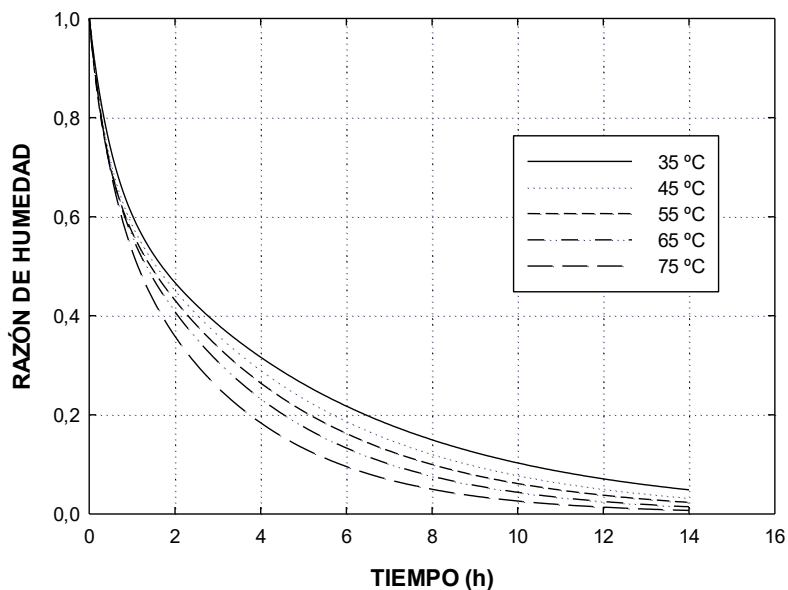


Figura 18. Cinética de secado para las temperaturas de estudio, modelo de Verma.

En la Figura 19 se presenta el análisis de residuos para cada temperatura de estudio para el modelo de Verma, en general se observa en todos los ajustes hay residuales positivos y negativos a medida que disminuyó el contenido de humedad en el grano, dándose un

comportamiento ascendente conforme aumentó el tiempo. El análisis de residuos para las temperaturas estudiadas es aleatorio, se observa que conforme aumenta la temperatura la aleatoriedad de los datos es mayor, lo cual indica que el de regresión se ajusta bien y pueden ser utilizados para describir la cinética de desorción de los granos de cacao.

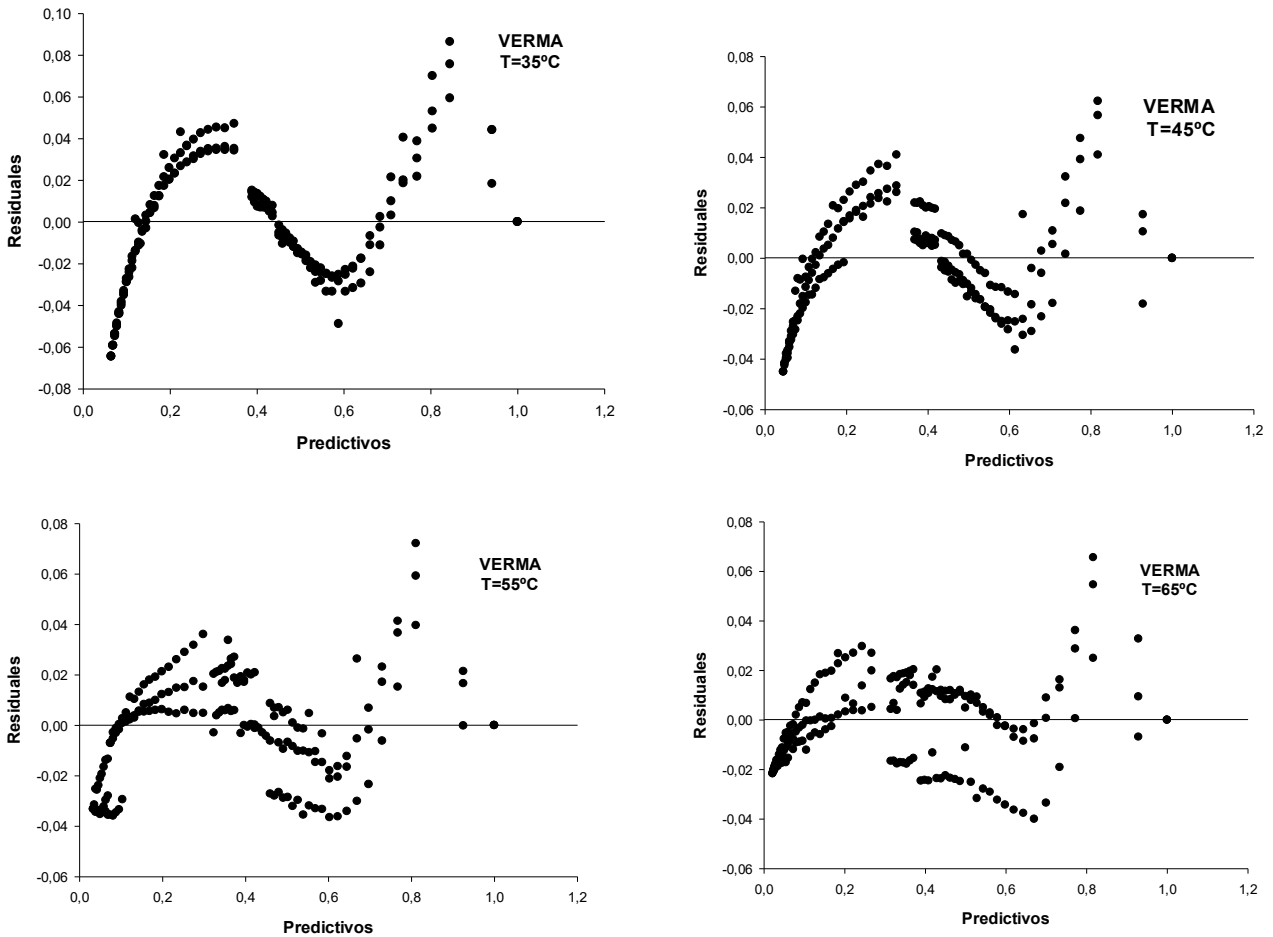


Figura 19. Análisis de Residuos, modelo de Verma.

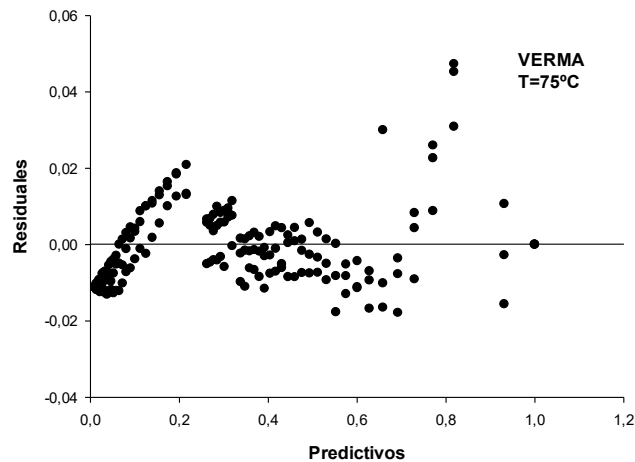


Figura19. Análisis de Residuos, modelo de Verma. (continuación)

Se observó que la constante de secado (k) de la cinética de secado de cacao, aumenta conforme aumenta la temperatura del aire, esto influye en el tiempo del proceso y la capa delgada de granos alcanza el punto de contenido de humedad de equilibrio en un menor tiempo.

Hii et al. (43) realizaron secado de granos de cacao por medio de dos métodos; al sol y secado artificial, como llaman al secado en horno de convección, en esta última técnica utilizan temperaturas de 60, 70 y 80 °C; con contenido de humedad inicial de 103,87 a 111,86% (b.s.) hasta una humedad de 25% (b.s.). Luego de llegar a esta humedad, el rango de secado entre cada temperatura de estudio es muy poca ya que el agua dentro del grano es más difícil de extraer, por lo que tardan 52, 34 y 30 h, con mediciones de 9 h diarias. A su vez, en trabajos similares (10) realizaron secado artificial mediante horno de convección únicamente a una temperatura de secado de 60 °C desde un contenido de humedad inicial de 51% (b.h.) hasta llegar a aproximadamente a 7,5% (b.h.) con una duración de 52 h, con mediciones de 8 h diarias. Comparando la información de ambos trabajos con lo obtenido en la presente investigación, se observó que aunque se obtuvieron los datos esperados de contenido de humedad final los tiempos de las pruebas fueron muy extensos en relación con las 12 h de secado del presente trabajo, donde para la temperatura de 65 °C que es similar a las utilizadas en los trabajos mencionados alcanzó una contenido de humedad final de 7,5% (b.h.), estas

diferencias se deben a la efectividad del uso de flujo de secado transversal, a la capa de producto y probablemente al espesor de la capa, relacionada a la masa.

Energía de activación

En cada uno de los modelos propuestos se observó que la constante de secado (k) aumentó conforme incrementó la temperatura, estos resultados se observan también en investigaciones como la de Ndukwu et al. (44) donde realizaron un estudio de secado en cacao en un secador vertical con varias capas, en dicha investigación se utilizaron temperaturas de 55, 70 y 81 °C, donde se obtuvieron constantes de secado de 0,2450, 0,6276, 0,9037 respectivamente. En el Cuadro 9 se muestran los valores de energía de activación calculados para los modelos de mejor ajuste.

Cuadro 9. Constantes de secado para modelos de mejor ajuste.

Modelo	Pendiente (m)	Intersección	R²	K₀	E_a (J mol⁻¹)
Verma	1 460,38	3,06	0,994	21,31	12 142,36
Midilli	461,56	0,85	0,902	2,35	3 837,63
Page	634,72	1,31	0,967	3,72	5 277,34

En el caso del modelo de Verma, se observó que la constante k mantuvo un comportamiento creciente; más para la constante de secado g , se obtuvieron resultados crecientes para las primeras tres temperaturas y se observaron resultados decrecientes para las temperaturas de 65 y 75 °C; Además, la energía de activación obtenida fue de 12,142 kJ/mol.

El logaritmo de las constantes de secado obtenidas con el modelo Verma y la inversa de la temperatura del aire según la ecuación de Arrhenius, se comporta de manera lineal, como se observa en la Figura 20.

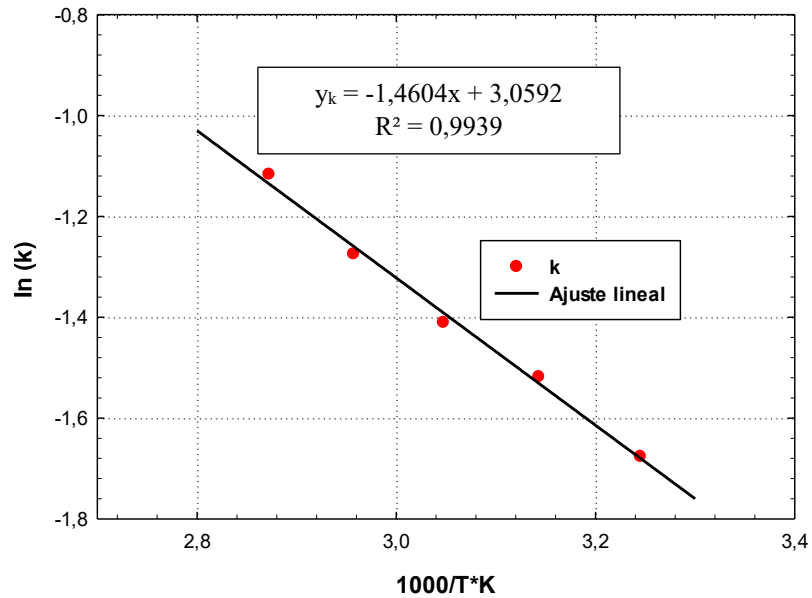


Figura 20. Relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura.- Modelo Verma

La dependencia de la cinética de secado del cacao con la temperatura es una tendencia bien definida, para seleccionar un modelo matemático se debe establecer como criterio que todas las constantes asociadas a la variable de tiempo deben presentar una tendencia determinada, a pesar que la constante g del modelo de Verma presenta una tendencia definida, al ser esta cuadrática (Figura 21) se descarta este como el mejor modelo de ajuste.

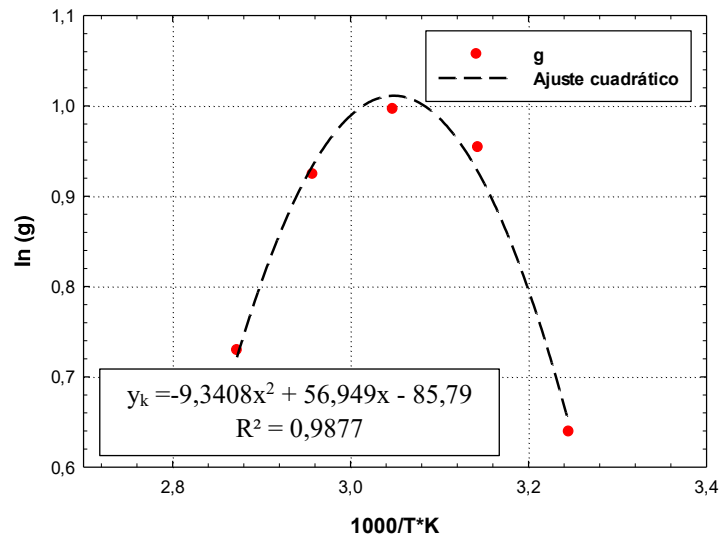


Figura 21. Relación proporcional entre la variable g y la temperatura.- Modelo Verma

El modelo de Midilli presenta una tendencia clara de sus constantes en función de la temperatura y un ajuste adecuado con R^2 0,9843 a 0,9975 para la menor y la mayor temperatura, respectivamente, como se muestra en las Figuras 22.

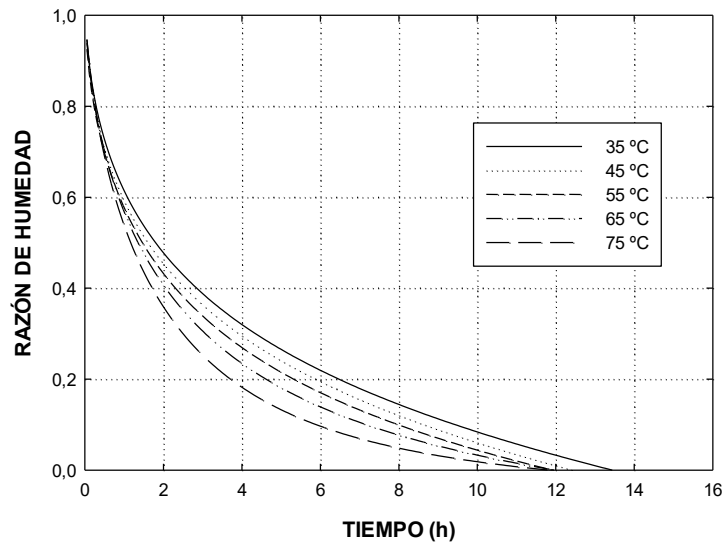


Figura 22. Cinética de secado para las temperaturas de estudio, modelo de Midilli.

Para el modelo de Midilli se realizó el análisis de la energía de activación, se observa que las constantes de secado mantuvieron una tendencia conforme aumentó la temperatura de secado, lo cual también ocurrió con el modelo de Page; los valores se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Constantes de temperatura y secado para los modelos de Midilli y Page.

Temperatura (°C)	Midilli	Page
	k (min ⁻¹)	k (min ⁻¹)
35°C	0,5352	0,4746
45°C	0,5457	0,5113
55°C	0,5470	0,5344
65°C	0,6246	0,5549
75°C	0,6929	0,6129

La Figura 23, muestra efectivamente una relación lineal entre las constantes de secado obtenidas con el modelo de Midilli y la inversa de la temperatura del aire según la ecuación de Arrhenius. Como se observó en el Cuadro 9 que para este modelo se obtiene una energía de activación con un valor de 3,84 kJ/mol.

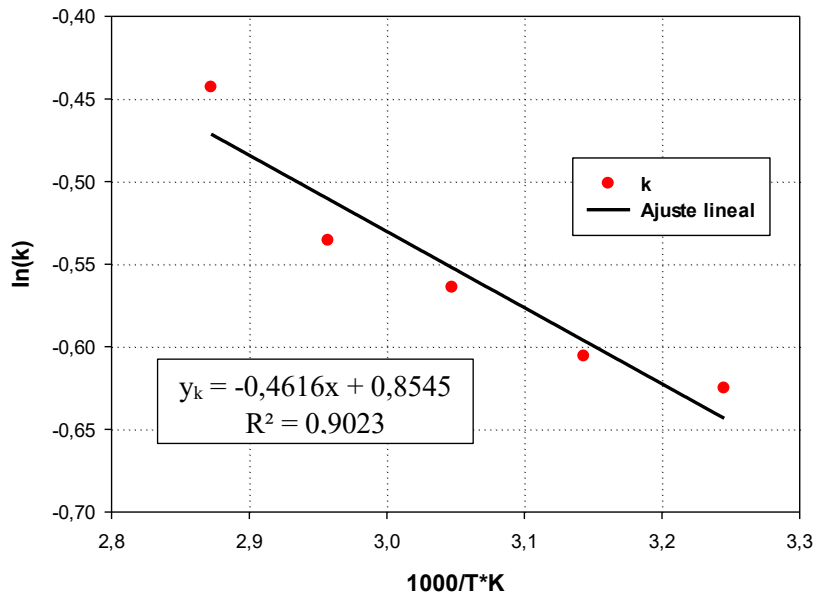


Figura 23. Relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura-Modelo de Midilli.

A pesar que el modelo de Midilli presentó el segundo mejor ajuste y al realizar el análisis de la energía de activación se observó una tendencia bien definida de todas las constantes asociadas al tiempo, el modelo de Page a pesar de obtener un valor menor de R^2 también presentó una tendencia definida, como se muestra en la Figura 24, en sus parámetros como se observó en el Cuadro 10.

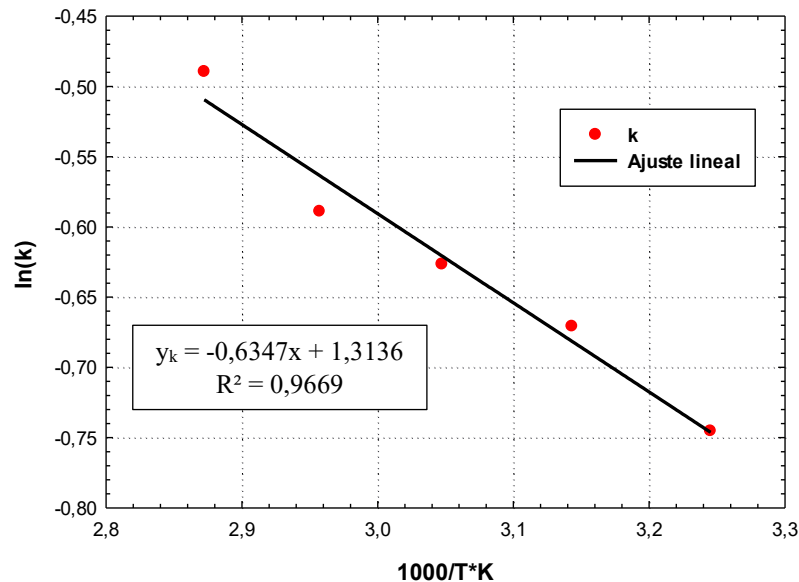


Figura 24. Relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura-Modelo de Page.

Para el modelo de Page se obtuvo una energía de activación de 5,277 kJ/mol; como se muestra en la Figura 24 el comportamiento es lineal. La pendiente de la recta está relacionada con la energía de activación y la intersección con el eje vertical de donde se calcula el factor pre-exponencial. Se determinó que la energías de activación obtenidas para iniciar el proceso de secado en los granos de cacao utilizando flujo transversal, no se encuentra dentro del rango reportado de varios productos agrícolas ya que este va desde 12,32 kJ mol⁻¹ hasta 51,26 kJ mol⁻¹ según autores como Senadeera et al (45), Carmiol (4) y Herman et al (20).

Los valores obtenidos representan la energía mínima para iniciar el proceso de secado, Kuo et al mencionan que la concentración volumétrica inicial de agua es mayor en el cascarón que en el núcleo del grano. En segundo lugar, al comienzo del secado, la tasa de secado se controla mediante fenómenos de transporte interno y externo, mientras que, en la segunda parte del secado está totalmente controlado por la difusión de agua dentro del grano (20).

En trabajos específicamente de secado en cacao mediante métodos de secado artificial, se estimó en el caso de Ndukwu et al. (44) una energía de activación de 39,94 kJ mol⁻¹; también

en el trabajo de Hii et al. (10) donde determinaron una energía de activación de 28,11 kJ mol⁻¹. Los valores altos obtenidos en los trabajos mencionados pueden relacionarse con la variedad de cacao utilizada, así como también con los métodos de secado manejados, ambos utilizan hornos de convección con periodos de tiempo diarios determinados, los cuales superan las 12 horas requeridas en el presente trabajo. Este parámetro indica la facilidad con que las moléculas de agua superan la barrera de energía durante el movimiento dentro de los productos (46).

En el estudio de Herman et al. (46) se presenta un caso, donde la energía de activación de la semilla de noni es menor (24,20 kJ mol⁻¹) a valores reportados en trabajos similares (35,04 kJ mol⁻¹), por lo que se menciona que las características biológicas y físicas de los diferentes productos agrícolas pueden influenciar la variación de valores de energía de activación, como ocurrió en este trabajo.

Se analizaron las constantes de los modelos asociadas al tiempo, donde se linealizaron en este caso las constantes n y b para el modelo de Midilli y n para el modelo de Page como se observa en el Cuadro 11. El fin de esta aplicación es poder predecir matemáticamente el comportamiento de los parámetros en los modelos y que únicamente varíe la temperatura.

Cuadro 11. Parámetros obtenidos al linealizar constantes de los modelos.

Modelo	Parámetros	Pendiente (m)	Intersección	R ²
Midilli	b	5.032,07	20,21	0,934
	n	877,09	2,12	0,918
Page	n	315,52	0,61	0,899

En la Figura 25, se observa el comportamiento de los parámetros de los modelos en función de la temperatura para el modelo de Midilli (A) y modelo de Page (B).

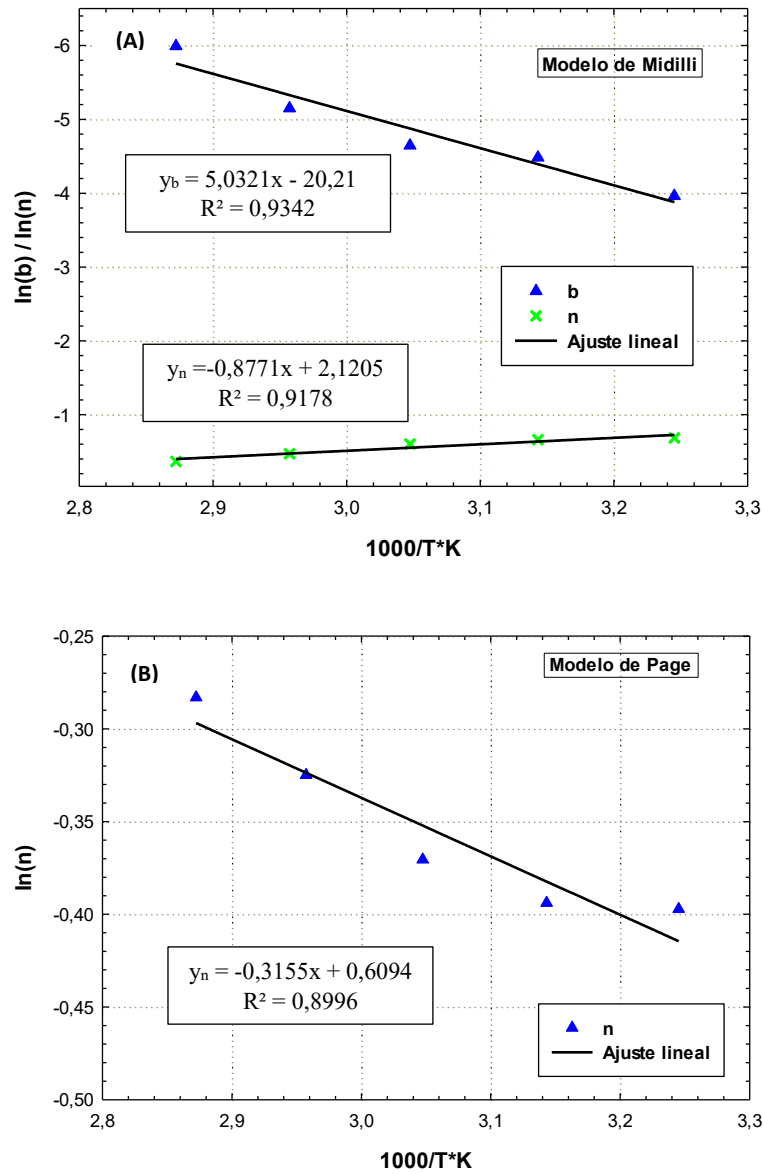


Figura 25. Relación proporcional entre las constantes y la temperatura-Modelos de Midilli y Page.

Al tener modelo de Page menor número de constantes, al ajustarse bien a los datos obtenidos y al presentar sus parámetros asociados al tiempo y la temperatura una tendencia definida se determina que es el modelo que mejor representa la cinética de secado de los granos de cacao, generando la ecuación 9.

$$MR = e^{\left(e^{b_k \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}}} \right) \cdot t^{\left(e^{\left(\frac{m}{T}\right) + b_n} \right)} \quad (9)$$

Donde

MR : Razón de humedad [*adimensional*]

E_a : Energía de activación [$J \text{ mol}^{-1}$]

R : Constante universal de los gases [$8,3145 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$]

T : Temperatura absoluta [K]

b_k y b_n : Intersección [*adimensional*]

m : Pendiende [*adimensional*]

Determinación de un nuevo modelo de ajuste

El cacao es considerado uno de los granos que requiere mayor tiempo de secado, además de sus grandes dimensiones y la forma geométrica elipsoidal es apto para resistir la pérdida de humedad durante el secado, por lo tanto, se logró obtener una nueva ecuación de ajuste en todas las temperaturas basado en el parámetro R^2 , mediante el modelo que se muestra en la ecuación 10. Esta ecuación se derivó a partir del análisis inicial con el ajuste de Midilli, se determinó que el parámetro “a” tiene valores aproximados a 1 por lo que se demuestra que este no influye en ajuste con los datos experimentales.

$$MR = \exp(-kt^n) + bt \quad (10)$$

En el Cuadro 12 se muestran los resultados obtenidos donde los coeficiente de determinación van de 0,9825 a 0,9973, esto para la menor y mayor temperatura respectivamente. Igualmente, se cumplió con el aumento de la constante de secado k conforme aumentó la temperatura como se observó con los otros modelos estudiados.

Cuadro 12. Valores obtenidos para el nuevo modelo de ajuste.

Temperatura	R ²	SE	Constantes
35 °C	0,9825/Midilli (0,9843)	0,0329	k=0,4705 n=0,5613 b=-0,0097
45 °C	0,9923/ Midilli (0,9928)	0,0218	k=0,5081 n=0,5508 b=-0,0104
55 °C	0,9923/ Midilli (0,9928)	0,0222	k=0,5325 n=0,5805 b=-0,0088
65 °C	0,9946/ Midilli (0,9949)	0,0190	k=0,5551 n=0,6543 b=-0,0049
75 °C	0,9973/ Midilli (0,9975)	0,0136	k=0,6128 n=0,7210 b=-0,0021

Se determinó la energía de activación para los tres parámetros asociados al tiempo como se muestra en el Cuadro 13; para la contante k se obtuvo una energía de activación de 5 489,49 J mol⁻¹ con coeficiente determinación de 0,973, para b y n se obtuvo una energía de activación de 33.374,03 y 5.916,10 J mol⁻¹, respetivamente.

Cuadro 13. Constantes de secado para nuevo modelo de ajuste.

Modelo	Pendiente (m)	Intersección	R ²	K ₀	E _a (J mol ⁻¹)
Nuevo Modelo	660,23	1,39	0,973	4,01	5 489,49

En Figura 26 se muestra la relación lineal entre las constantes de secado obtenidas mediante el nuevo modelo y la inversa de la temperatura del aire según la ecuación de Arrhenius. Se observa que el coeficiente determinación es menor a 0,90 para los parámetros b y n.

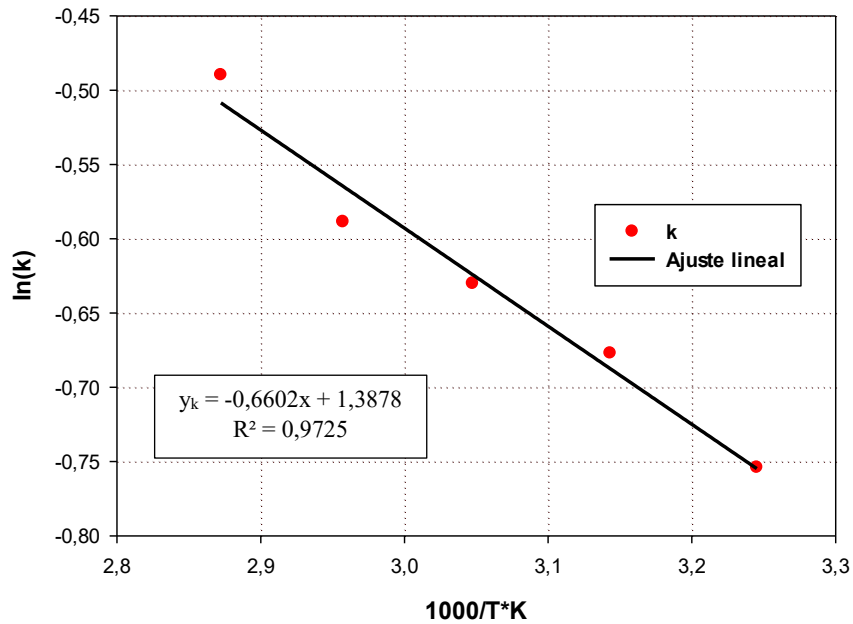


Figura 26. Relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura-Nuevo Modelo.

Similarmente, se analizaron las constantes de los modelos asociadas al tiempo, donde se linealizaron en este caso las constantes n y b como se observa en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Parámetros obtenidos al linealizar constantes del nuevo modelo.

Modelo	Parámetros	Pendiente (m)	Intersección	R ²
Nuevo	b	4 013,95	17,34	0,770
Modelo	n	711,54	1,68	0,835

No existen referencias de esta ecuación en el secado de productos agrícolas y por lo tanto es un nuevo aporte a la ciencia del secado para que sea estudiada en futuras investigaciones.

4.2. Establecimiento de una relación de equilibrio entre el contenido de humedad del cacao y la humedad relativa del aire.

El contenido inicial de los granos varió proporcionalmente la temperatura de secado y el valor al final del tratamiento osciló entre 4,4 y 7,0%b.h. como se muestra en el Cuadro 15, esto ya que los granos colocados en el desecador inicialmente contaron con una etapa inicial de secado mediante el método dinámico, donde se obtuvieron contenidos de humedad en base húmeda mayores conforme la temperatura de secado del grano fue menor.

Cuadro 15. Contenido de humedad final de los granos de cacao por medio del método estático y dinámico.

Temperatura (°C)	Método Dinámico	Método Estático
	Contenido de humedad final (%b.h.)	Contenido de humedad final (%b.h.)
35	20,84±0,43	4,42±0,11
45	12,39±1,05	4,70±0,09
55	8,43±1,86	4,84±0,16
65	5,61±1,29	5,06±0,13
75	4,04±0,82	6,99±0,07

El contenido de humedad de los granos de cacao disminuyó hasta aproximadamente 4,04% b.h. mediante secado por flujo transversal a una temperatura del aire 75 °C, conforme se aumentó la temperatura del aire, disminuyó la humedad relativa del aire y el contacto con el grano disminuyó el contenido de humedad de equilibrio; la dependencia de la temperatura del contenido de humedad en equilibrio tiene una importante relación práctica con las reacciones químicas y microbiológicas asociadas con el deterioro (47); ya que al aumentar la temperatura se disminuyen los microorganismos que puedan afectar los lotes de granos, es importante a su vez tomar en cuenta las reacciones que ocurren durante la etapa de secado los cuales determinan el sabor del cacao y con esto la calidad del producto final.

El fenómeno de histéresis se presenta en los granos de cacao, donde el proceso de desorción se analiza mediante las constantes de contenido de humedad de los granos y humedad relativa del ambiente a una temperatura de 22 °C buscando un ambiente idóneo para el

almacenamiento del producto; puede presentarse el proceso de adsorción donde ocurre un cambio en la humedad relativa del ambiente y a su vez una variación en la humedad del grano conduciendo a problemas de almacenamiento; según mencionan Hii et al. (10), para obtener un almacenamiento seguro del producto se requiere un contenido de humedad igual o inferior a 8% b.h. con el fin de evitar desarrollo de hongos, especialmente de ocratoxinas tipo A (OTA).

Ramos (21) señala en su trabajo que la contaminación por OTA puede ocurrir en diversas etapas del proceso especialmente en la fermentación por el cambio de temperatura y humedad al que se ven sometidos los granos de cacao, menciona también que en el almacenamiento se puede volver a incrementar la producción ya que la humedad y la temperatura de la zona de almacenamiento no se controlan y la proliferación se ve aumentada por el hecho de que los granos suelen almacenarse en sacos de yute, lo que genera el ambiente cerrado y oscuro necesario para la formación de los hongos productores de OTA.

En el Cuadro 16 se muestran los parámetros estadísticos obtenidos para cada uno de los modelos matemáticos de equilibrio higroscópico utilizados en productos agrícolas.

Cuadro 16. Parámetros estadísticos para los modelos de ajuste.

Modelo	Parámetros estadísticos	Coefficientes de regresión	p-valor	Análisis de Residuos
Guggenheim, Anderson y Boer (GAB)	R= 0,9945 R ² = 0,9890 Adj.= 0,9876 SE= 0,6442	C= 0,77794 x_w = -1,8963 k=0,0467	C <0,0001 x_w <0,0001 k <0,0001	Aleatorio
Modelo de multicapa (BET)	R= 0,9854 R ² =0,9711 Adj.=0,9694 SE=1,0087	C= 0,9899 x_w = -2,2387	C <0,0001 x_w <0,0001	Aleatorio

Cuadro 16. Parámetros estadísticos para los modelos de ajuste. (continuación)

Modelo	Parámetros estadísticos	Coefficientes de regresión	p-valor	Análisis de Residuos
COPACE	R= 0,9554 R ² = 0,9127 Adj.= 0,9011 SE= 1,8168	a= 1483,2206 b= 59,3563 c= 0,0412	a <0,0001 b= 0,9789 c= 1	Aleatorio
Sánchez	R= 0,9848 R ² = 0,9698 Adj.= 0,9658 SE= 1,0683	d=3,3751 a= 0,4347 b= 1,7277x10 ⁻¹⁶	d=0,5303 a= 0,0942 b= 1	Aleatorio
Modelo propuesto	R= 0,9669 R ² = 0,9350 Adj.= 0,9309 SE= 1,5187	a= 0,7174 b= 1,3745	a <0,0001 b <0,0001	Aleatorio

Se observa que de los modelos estudiados el que presentó mejores parámetros estadísticos y con esto mejor ajuste fue el modelo de Guggenheim, Anderson y Boer (GAB), se obtuvo un valor de coeficiente de correlación (R²) de 99,5%, con una desviación estándar (SE) de 0,64 y un p-valor menor a 0,0001. Este modelo también fue seleccionado como el de mejor ajuste en investigaciones como las de Oliveira et al. (19) y Koua et al. (47), donde trabajaron con isothermas de desorción a 25 °C y 30 °C, respectivamente. En la Figura 27 se observan los gráficos de los modelos de ajuste estudiados.

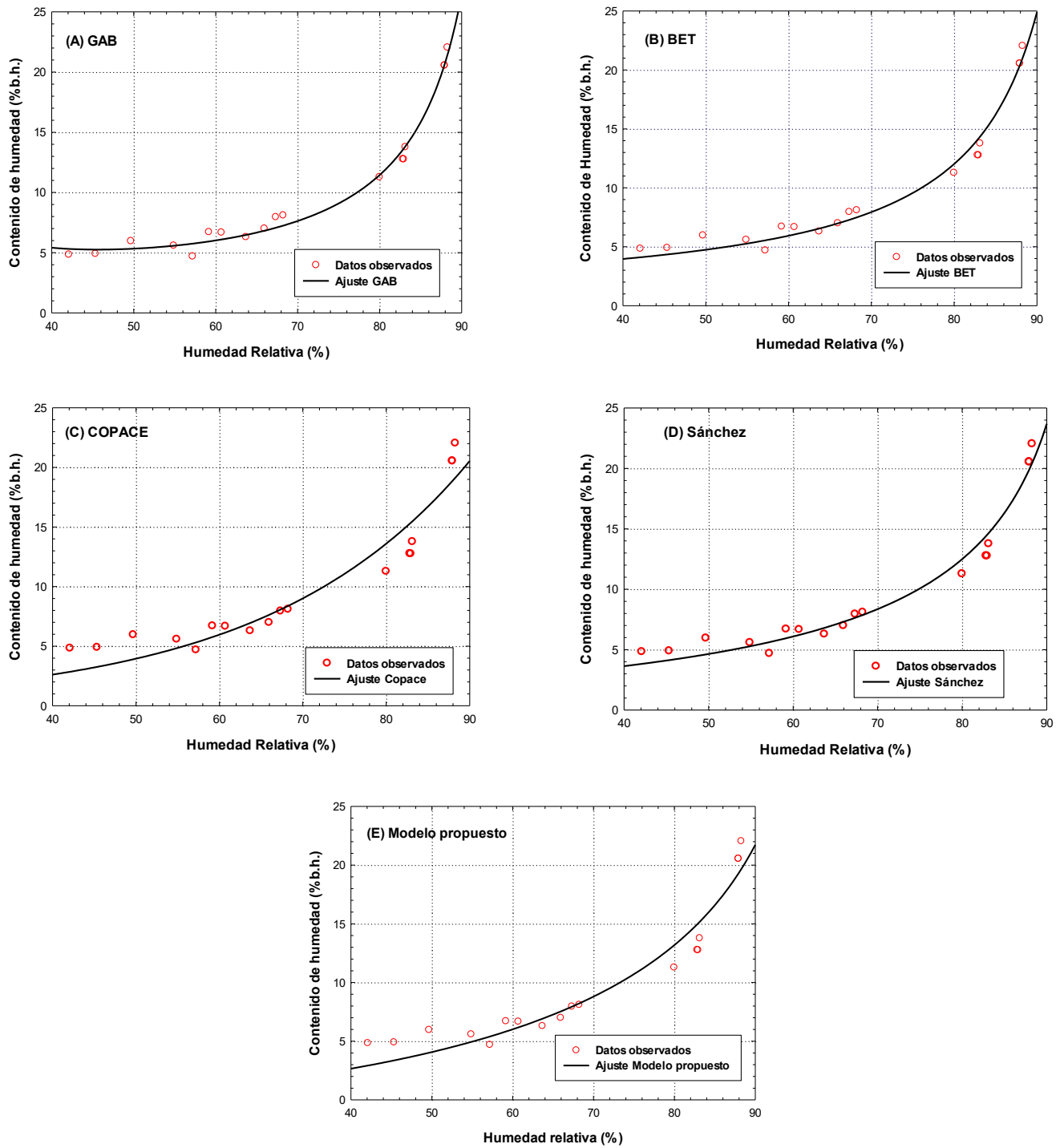


Figura 27. Ajuste de los modelos de matemáticos para representar el equilibrio higroscópico en granos de cacao en desorción.

En la Figura 28 se muestra la isoterma de desorción a 22 °C para el modelo de GAB, se realizó el análisis de los datos mediante los parámetros de contenido de humedad en base seca y la actividad de agua.

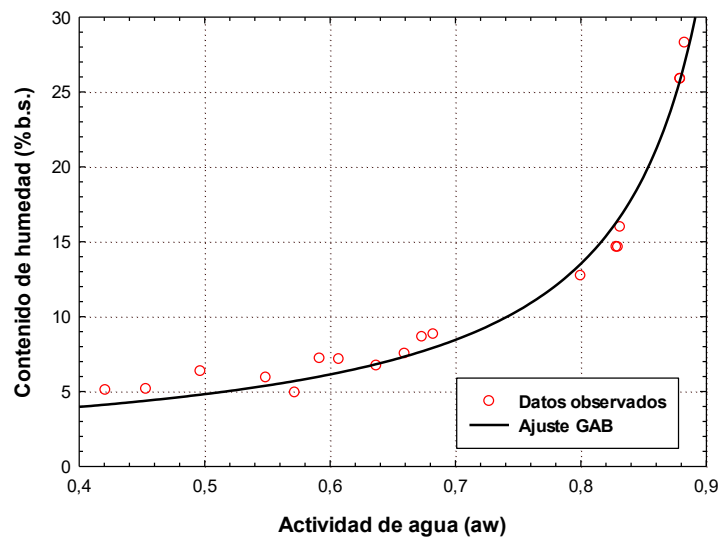


Figura 28. Ajuste del modelo de GAB para representar el equilibrio higroscópico en granos de cacao en desorción.

Se observa en el Cuadro 17 el valor de los parámetros obtenidos para este modelo de ajuste, estos fueron comparados con el trabajo de Oliveira et al. (19) donde analizaron la isoterma de desorción a 25 °C, donde se obtuvieron valores de $C= 3749,457$, $x_w= 6,681$ y $k=0,749$. Los datos obtenidos en la presente investigación son mayores para una temperatura similar de 24 °C, esto se pudo deber a la variación entre los datos ya que la desviación estándar que presentaron fue de 0,41 en comparación al presente trabajo que fue 1,08.

Cuadro 17. Parámetros estadísticos - modelo de GAB.

Modelo	Parámetros estadísticos	Coefficientes de regresión	p-valor
Guggenheim, Anderson y Boer (GAB)	R= 0,9911 R ² = 0,9824 Adj.= 0,9800 SE= 1,0891	$C= 4,420 \times 10^6$ $x_w= 2,328$ $k=1,035$	$c = 1$ $x_w < 0,0001$ $k < 0,0001$

Además del modelo de GAB, los modelos que mejor se ajustaron a los datos fueron el modelo de multicapa (BET) y el modelo propuesto los cuales obtuvieron un valor de R^2 de 98,54% y 96,69% respectivamente. El comportamiento de las curvas de ajuste para los modelos estudiados tienen una forma sigmoidea según otras investigaciones como muestran Oliveira et al (19) y Koua et al. (47); este último menciona que esta forma sigmoidea predomina en productos ricos en compuestos hidrofílicos, lo cual es típico de las isothermas tipo II, como fue reportado en productos con almidón como la harina de avena y la harina de arroz (48), té (49) y granos de cacao (19). El conocimiento de las isothermas de desorción de agua es de suma importancia para realizar cálculos de ingeniería con el fin de predecir la estabilidad del contenido de humedad de los granos durante el almacenamiento y el transporte. (50)

El estudio de la curva de equilibrio higroscópico para los granos de cacao es de gran importancia para establecer un ambiente de almacenamiento idóneo con el fin de evitar el crecimiento de OTA y con esto la pérdida del producto. Se observó que humedad relativa de 70% corresponde a un contenido de humedad (CH) de 8% (b.h.), este es un punto crítico donde comienza una tendencia muy similar y ocurren cambios significativos en la humedad relativa en contraste con el contenido de humedad que tienes pequeñas variaciones, se debe realizar esfuerzos para llevar a esa condición los granos para asegurar la calidad y evitar el deterioro.

La diferencia entre los datos de contenido de humedad observados y estimados por los modelos estudiados permiten obtener los residuales los cuales se presentan en la Figura 29 para cada modelo.

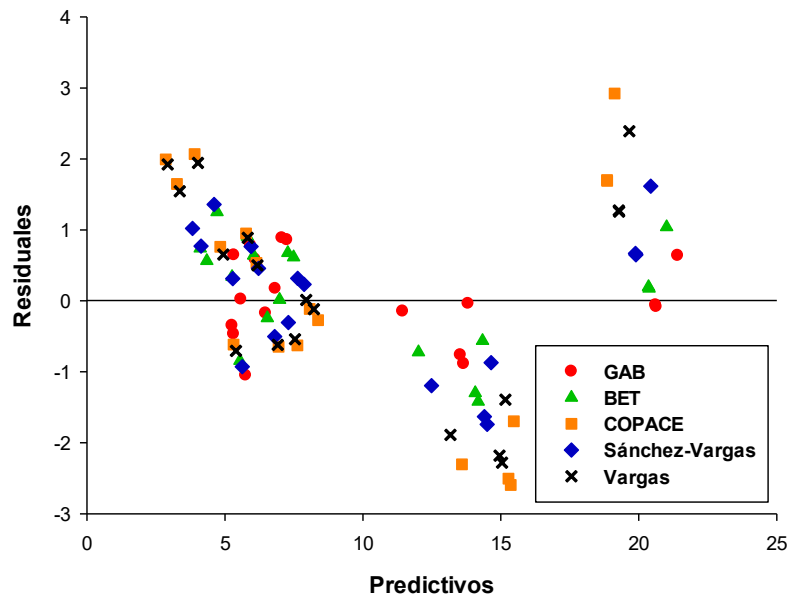


Figura 29. Análisis de residuos de los modelos de matemáticos de equilibrio higroscópico en desorción para cacao.

En general se observa en todos los ajustes hay residuales positivos y negativos a medida que la humedad relativa disminuyó. El análisis de residuos para todos los modelo estudiados es aleatorio, lo cual indica que el de regresión se ajusta bien y pueden ser utilizados para describir la cinética de desorción de los granos de cacao. Se observa que la magnitud de los residuos para el modelo de GAB oscila entre -1 y 1, lo cual señala la idoneidad que presenta. Se observó en el trabajo de Baptestini et al.(38) que modelo de GAB también fue seleccionado tanto por el buen ajuste a los datos como por los valores residuales aleatorios que presentó el modelo esto para café tostado y molido. Para granos de cacao, Oliveira et al. (19) obtuvo residuales aleatorios para la isoterma a 25 °C analizada con el modelo de GAB.

4.3. Determinación de la cinética de la pérdida de masa asociada al calentamiento de los granos de cacao durante la torrefacción.

Calentamiento del tostador

En la Figura 30, se muestra el comportamiento de la temperatura interna del tostador de las primeras dos repeticiones y la tercera; se observa que se eleva la temperatura conforme se recibe el calor de la llama de combustión, además mediante el gráfico se demuestra que el comportamiento del tostador fue diferente en las primeras dos repeticiones con respecto a la tercera, donde esta última presentó un tueste más lento lo cual conllevó a un mayor tiempo de tueste, la intensidad de la llama no fue variada por lo que el cambio se pudo deber a una menor abertura de la llave en el tanque del gas, la posición del tostador donde se afectara la llama por el viento, entre otros.

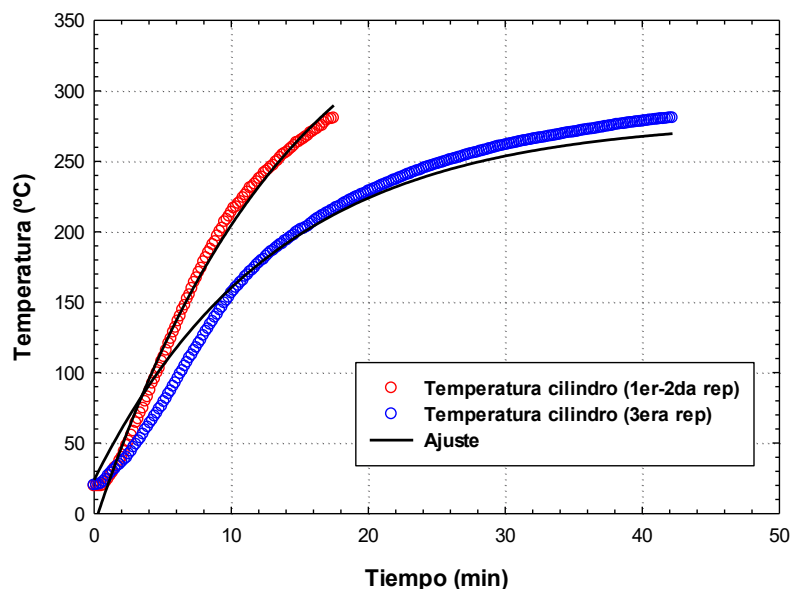


Figura 30. Temperatura interna del tostador en dos condiciones de operación.

Dado el comportamiento de tueste, el análisis de los datos se realizó en conjunto para la primera y segunda repetición; y para la tercera se evaluaron los datos solos. En el Cuadro 18 se observa con mayor detalle la diferencia de tiempo obtenido entre las repeticiones.

Cuadro 18. Tiempo de torrefacción por temperatura y masa.

	Masa (g)	Tiempo (min)				
		210 °C	215 °C	220 °C	225 °C	230 °C
R1 y R2	500	4,80±0,18	5,79±0,05	7,01±0,16	7,38±0,04	8,54±0,44
R1 y R2	750	6,38±0,46	7,62±	8,53±0,13	9,74±0,05	10,33±0,28
R1 y R2	1000	7,44±1,70	8,92±	9,33±	10,44±1,98	10,90±
R3	500	9,58	10,85	12,1	12,8	13,93
R3	750	11,77	12,85	14,23	15,25	16,40
R3	1000	13,85	15,05	16,20	17,38	18,83

En la Figura 31, se muestra el efecto que tiene la masa sobre la temperatura del tostador, durante el tiempo de tueste, en la primera imagen (A) se representan la primera y segunda repetición con tiempo menor a 8 min y en la segunda imagen (B) la tercera repetición con tiempo mayores a 8 min y menores a 14 min.

Se observa que al introducir las masas la temperatura en el tostador disminuye exponencialmente hasta alcanzar un mínimo y posteriormente empieza a aumentar conforme los granos de cacao absorben calor y con ello el tueste.

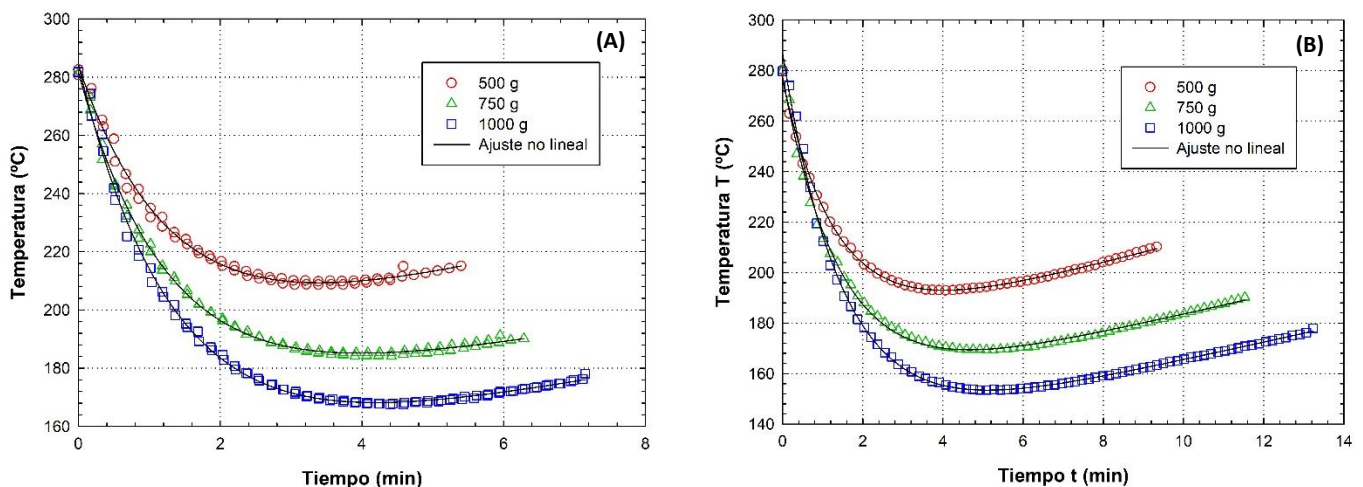


Figura 31. Efecto de la masa sobre la temperatura del tostador en dos condiciones del tostador.

El modelo matemático de mejor ajuste, fue el combinado exponencial decreciente con una parte lineal, donde los coeficientes de correlación (R^2) son mayores que 99,4%. Como menciona Vargas, el proceso de torrefacción en un tostador convencional de cilindro rotativo no se realiza en condiciones isotérmicas, según el comportamiento del tostador (40). Abarca (39) agrega que dada esta característica hace complejo los análisis del comportamiento de los fenómenos de transferencia de energía. Ambos trabajos fueron realizados en café, más esta teoría se comprueba mediante la Figura 30 que puede ser aplicada en cacao. Actualmente no hay referencias de estudios similares en cacao con tostador convencional de café.

El Cuadro 19, muestra los parámetros estadísticos para el modelo ajustado a la temperatura interna del tostador, con una temperatura inicial de 280 °C. En ambos casos el p-valor de los coeficientes es menor a 0,0001 y la desviación estándar es menor a 1,5380% en los casos estudiados.

Cuadro 19. Parámetros estadísticos del modelo de ajuste para la temperatura interna del tostador por efecto de masas. (Repeticiones 1 y 2)

	500 g	750 g	1000 g
	Coefficiente de regresión		
a	102,3667	117,3675	140,4366
b	0,7594	0,7881	0,7558
c	5,8898	4,0090	4,4453
y_0	181,5843	164,1202	143,6622
	p-valor		
a	<0,0001	<0,0001	<0,0001
b	<0,0001	<0,0001	<0,0001
c	<0,0001	<0,0001	<0,0001
y_0	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Parámetros estadísticos		
R^2	0,9946	0,9977	0,9975
SE	1,5380	1,2425	1,4562
	t-test		
a	25,0411	59,3674	79,7317
b	18,5492	36,3874	44,1413
c	7,0166	10,4912	14,4441
y_0	41,3846	75,9587	74,2904

Cuadro 19. Parámetros estadísticos del modelo de ajuste para la temperatura interna del tostador por efecto de masas. (Repeticiones 1 y 2) (continuación)

		Coefficiente de regresión			
R3	a	105,5334	129,8486	156,7526	
	b	0,7244	0,6877	0,6607	
	c	4,1445	3,6151	3,5301	
	y ₀	170,6378	147,3203	130,0522	
			p-valor		
	a	<0,0001	<0,0001	<0,0001	
	b	<0,0001	<0,0001	<0,0001	
	c	<0,0001	<0,0001	<0,0001	
	y ₀	<0,0001	<0,0001	<0,0001	
			Parámetros estadísticos		
	R ²	0,9978	0,9966	0,9973	
	SE	0,8844	1,3294	1,4204	
		t-test			
a	110,9711	115,5584	146,0242		
b	52,3979	51,6248	64,6661		
c	31,3655	29,8021	36,7637		
y ₀	170,8939	136,8185	136,7389		

El efecto de la masa en el tiempo de tostado fue realizado en café en el mismo tostador convencional, el ajuste de la ecuación de temperatura de operación del tostador en función de la masa fue adecuado y similar a las condiciones descritas por Abarca (39), se demostró un comportamiento térmico similar en el tostador utilizando granos de cacao con características físicas muy diferentes en relación a la forma y las dimensiones del café.

Mediante este análisis se comprobó que existe una relación entre la masa y el tiempo de tueste, de modo que se podría determinar un tiempo aproximado para el tueste de granos de cacao en un tostador convencional de café; pero como se observó en la Figura 29 las condiciones que presentó el tostador son no isotérmicas para el caso de la tercera repetición por lo tanto es recomendable evaluar las condiciones que pudieron afectar el tostador al momento de la prueba para establecer un tiempo de tueste promedio más certero.

Evaluación de modelos de calentamiento

En la Figura 32 se muestra la evaluación de calentamiento de la masa de granos en movimiento para 750 g a cinco diferentes temperaturas, este presenta el ajuste del modelo de Vargas-Elías para un total de 10 (n=10) y 2 (n=2) muestras, donde esta última se refiere a la temperatura evaluada de 210 °C en este caso. Se determinó que la cantidad de repeticiones no tiene un efecto significativo a la hora de evaluar los modelos para cada una de las temperaturas y que los datos se ajustan de manera correcta a la mayor temperatura evaluada.

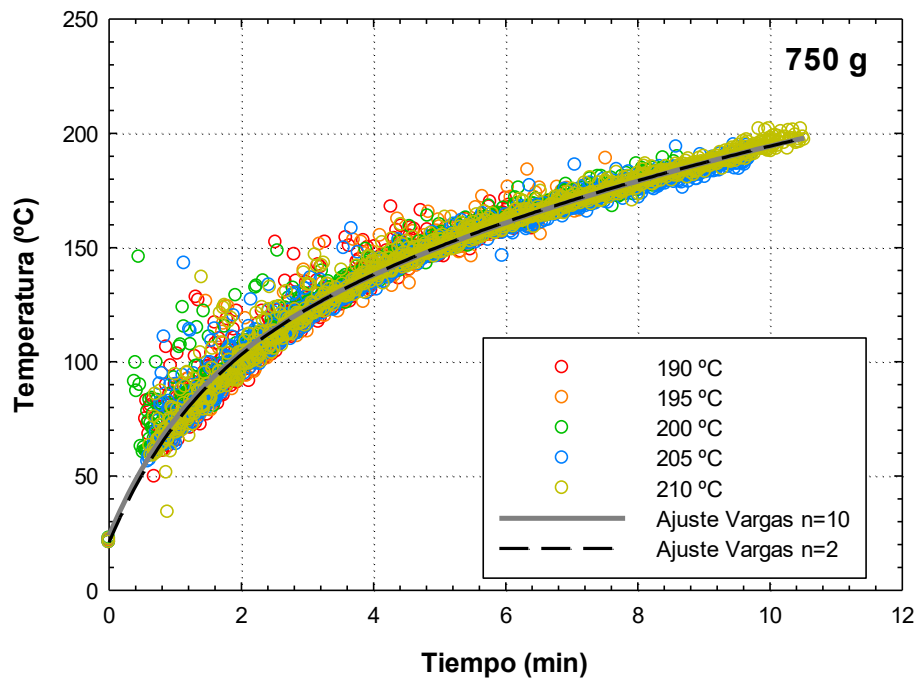


Figura 32. Cinética de calentamiento de los granos para 750 g a 5 diferentes temperaturas de tueste-Modelo Vargas-Elías.

En la Figura 33, se muestra el calentamiento de los granos de cacao en movimiento, para las 3 masas evaluadas; la Figura (A) representa la primera y segunda repetición, en tanto que la Figura (B) muestra los datos de la tercera repetición. Los modelos de ajuste utilizados son los mencionados en el Cuadro 4, se utilizó como temperatura ambiente promedio 24 °C (T_0).

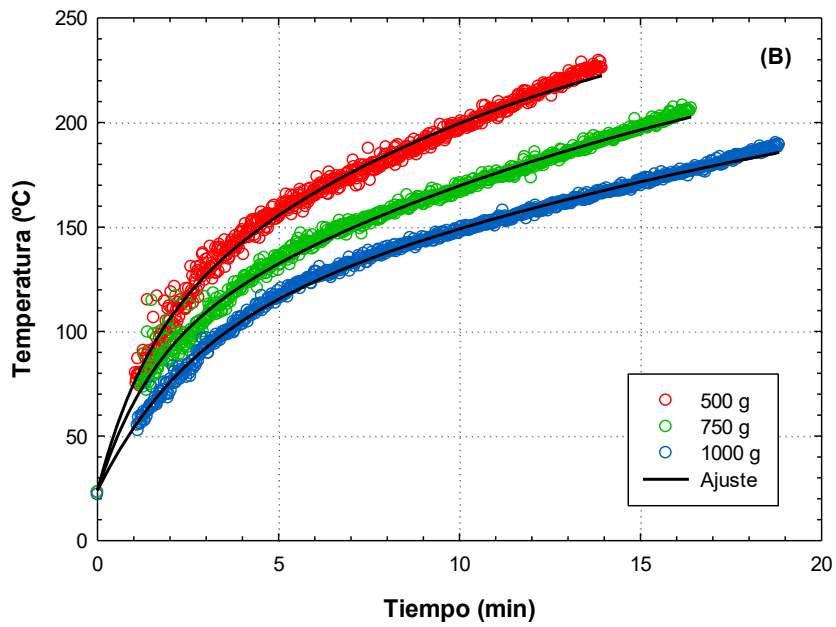
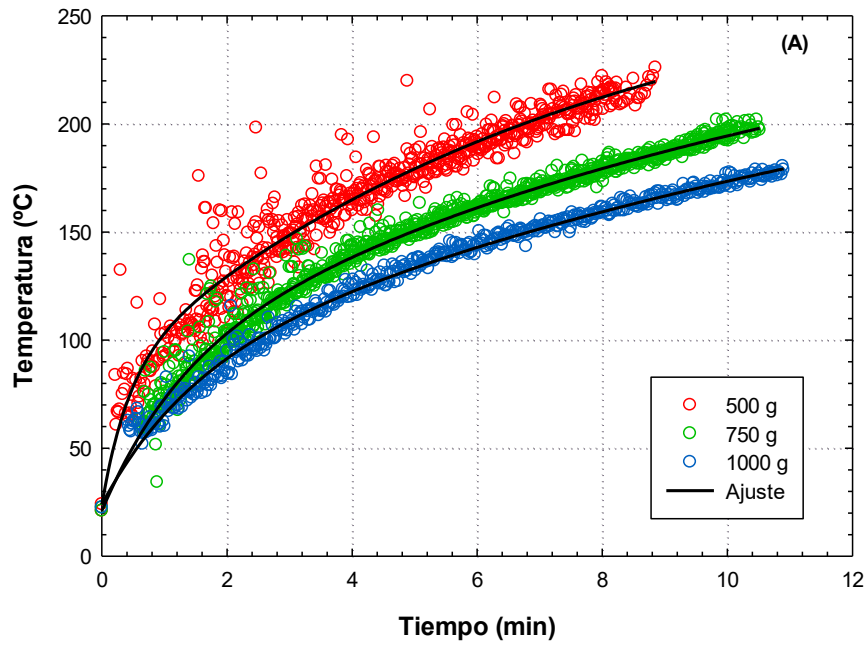


Figura 33. Cinética de calentamiento de los granos para diferentes masas -Modelo Vargas-Elías.

El modelo de Vargas-Elías se ajustó adecuadamente a los datos de calentamiento de los granos de cacao durante la torrefacción; en el Cuadros 20, se muestran los parámetros de ajuste del modelo. Como menciona Abarca (39), este ajuste fue utilizado para la torrefacción de los granos de café, donde el coeficiente de correlación fue mayor a un 99% en las diferentes masas utilizadas. En el caso del cacao se puede observar que específicamente este parámetro se comportó de manera ascendente con valores 86,73 y 93,70% en el caso de la masa de 500 g, para el ajuste general y el de mayor temperatura. Se observó que los coeficientes de correlación para la masa de 750 g fueron más altos con valores de 96,83 y 98,25%; para 1000 g se presentó un mejor ajuste con valores de 95,98 y 98,89%. La estadística refleja la irregularidad en la obtención de los datos en masas menores de 500 g, debido a la ubicación y movimiento vibratorio del termómetro, al espacio vacío que se forma por el movimiento de los granos, etc.

Se observa a su vez, en el cuadro mencionado los valores de los parámetros del modelo S, B y K, así como el valor de la desviación estándar del ajuste estimado del modelo (SE) el cual debe ser menor al 10% (39) ; en el caso de la masa de 500 g el ajuste sobre pasó este valor, más en el caso de las masas de 750 y 1000 g el ajuste fue menor a 6,19%, esto demuestra que el ajuste se adecuó mejor cuando se realizó el tueste con masas mayores, además los valores de p-valor para las variables S, B y K fueron menores a 0,0001 en todos los casos.

Cuadro 20. Parámetros estadísticos para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de granos durante el tueste de cacao-Modelo Vargas-Elías. (Primera y segunda repetición)

	500 g		750 g		1000 g	
	n=10	n=2	n=10	n=2	n=10	n=2
Coefficiente de regresión						
S	154,1091	134,9820	47,9338	48,2532	30,5283	38,2251
B	0,1376	0,1328	0,0821	0,0811	0,0578	0,0618
K	2,7872	2,3686	0,8611	0,8043	0,5583	0,7151
p-valor						
S	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
B	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
K	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos						
R	0,9313	0,9680	0,9840	0,9912	0,9797	0,9944
R ²	0,8674	0,9370	0,9683	0,9825	0,9598	0,9889
Adj. R ²	0,8673	0,9368	0,9683	0,9824	0,9597	0,9889
SE	13,2102	9,7344	6,1978	4,8695	5,9456	3,6824
t-test						
S	14,4245	11,8730	74,7882	50,9864	84,0279	47,4211
B	89,3329	0,0021	101,4087	70,6392	53,8717	59,9904
K	12,7657	0,2305	39,7907	27,5710	29,5301	24,6536

n=10 y n=2, representan la cantidad de corridas evaluadas.

En el caso de la tercera repetición los parámetros del ajuste del modelo Vargas-Elías (40) se muestran en el Cuadro 21, valores obtenidos del coeficiente de correlación fueron mayores a 97,73% para las 3 masas en estudio, los parámetros del modelo S, B y K fueron determinados con un p-valor menor a 0,0001; con respecto a la desviación estándar del ajuste estimado del modelo (SE) el cual fue menor al 10%, se observó que para la masa de 500 g se obtuvo la mayor desviación estándar con valores menores a 5,64% y conforme se aumentó la temperatura este parámetro de estudio disminuyó obteniéndose valores menores a 3,38% para 750 g y 2,35% para la masa de 1000 g.

Cuadro 21. Parámetros estadísticos para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de granos durante el tueste de cacao-Modelo Vargas-Elías. (Tercera repetición)

	500 g		750 g		1000 g	
	n=5	n=1	n=5	n=1	n=5	n=1
Coefficiente de regresión						
S	56,5518	44,9674	41,2327	39,9918	24,0408	25,7235
B	0,0829	0,0847	0,0525	0,0554	0,0341	0,0361
K	0,8677	0,7417	0,6292	0,6781	0,3605	0,4040
p-valor						
S	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
B	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
K	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos						
R	0,9886	0,9950	0,9955	0,9952	0,9974	0,9985
R ²	0,9773	0,9900	0,9911	0,9904	0,9948	0,9970
Adj. R ²	0,9773	0,9900	0,9911	0,9903	0,9948	0,9970
SE	5,6439	3,9031	3,2846	3,3881	2,3592	1,8612
t-test						
S	67,8978	43,8523	148,9290	51,4202	276,4028	136,7983
B	131,9514	95,9215	199,0425	121,4245	152,5665	133,6040
K	44,2789	27,5197	88,6928	35,0975	107,4200	68,9002

n=5 y n=1, representan la cantidad de corridas evaluadas.

La diferencia entre los datos de temperatura observados y los estimados por el modelo permiten obtener los residuales los cuales se presentan en la Figura 34, tanto para el ajuste general como para el ajuste de mayor temperatura de estudio para cada una de las masas evaluadas. La mejor distribución residual se obtuvo para la masa de 750 g. Se observa en todos los casos que hay residuales positivos y negativos a medida que el tiempo aumentó. El análisis de residuos para todos los modelo estudiados es aleatorio, lo cual indica que el de regresión se ajusta bien y puede ser utilizado para describir la cinética de torrefacción de los granos de cacao.

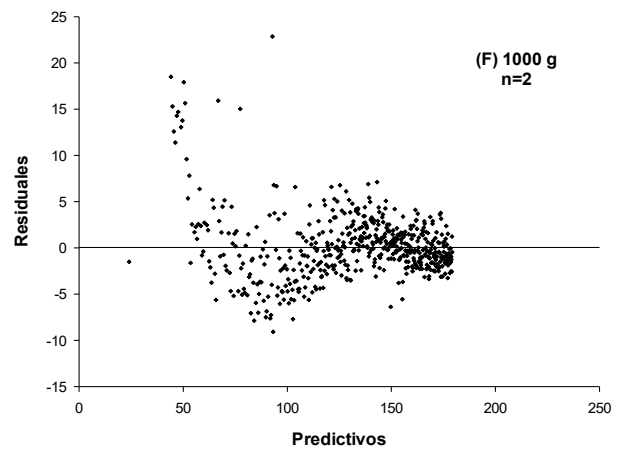
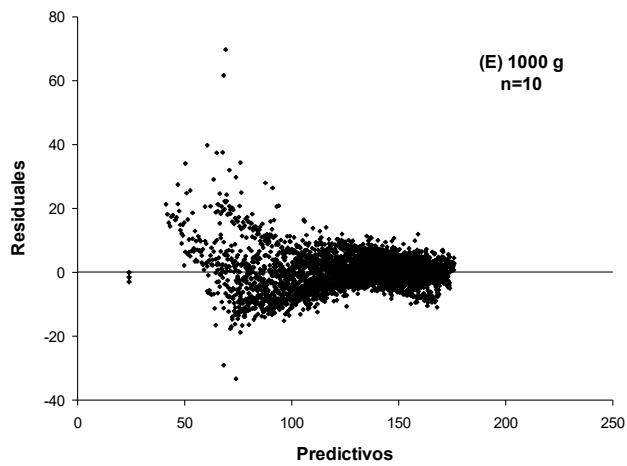
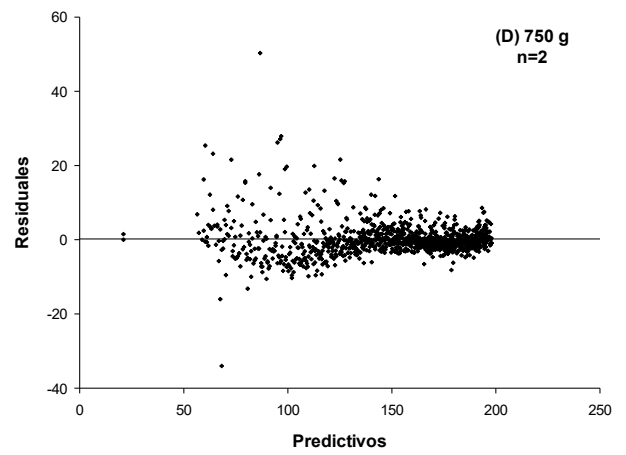
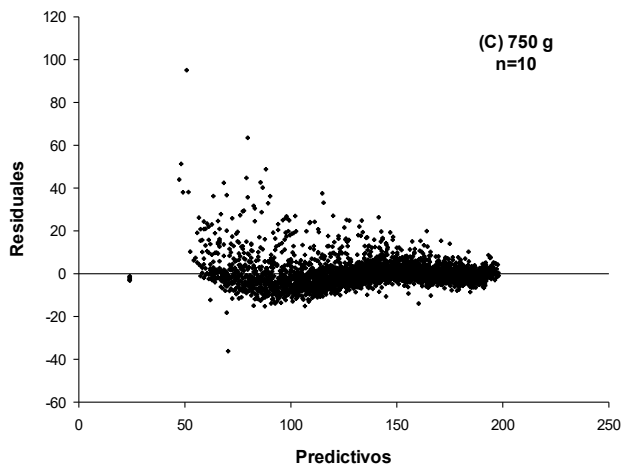
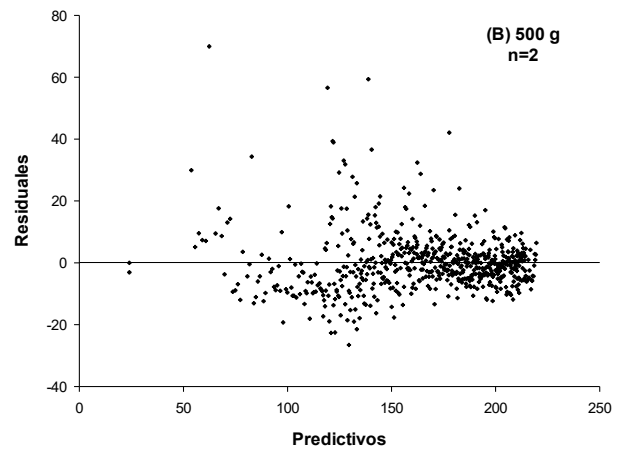
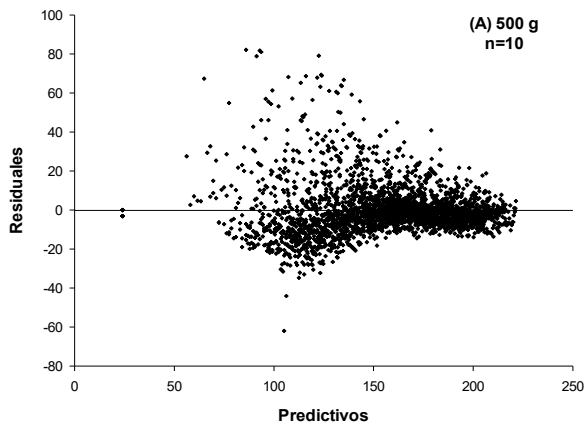


Figura 34. Análisis de residuos- Modelo Vargas-Elías. (Primera y segunda repetición)

La evaluación de residuales también fue realizada para la tercera repetición, esta se muestra en el Anexo 5 y se obtuvo un comportamiento similar a la primera y segunda repetición.

En la Figura 35 se muestra la evaluación de calentamiento de la masa de granos en movimiento para 750 g a cinco diferentes temperaturas, este presenta el ajuste del modelo de Abarca para un total de 10 y 2 muestras. Se determinó que los datos se ajustan de manera correcta a la mayor temperatura evaluada.

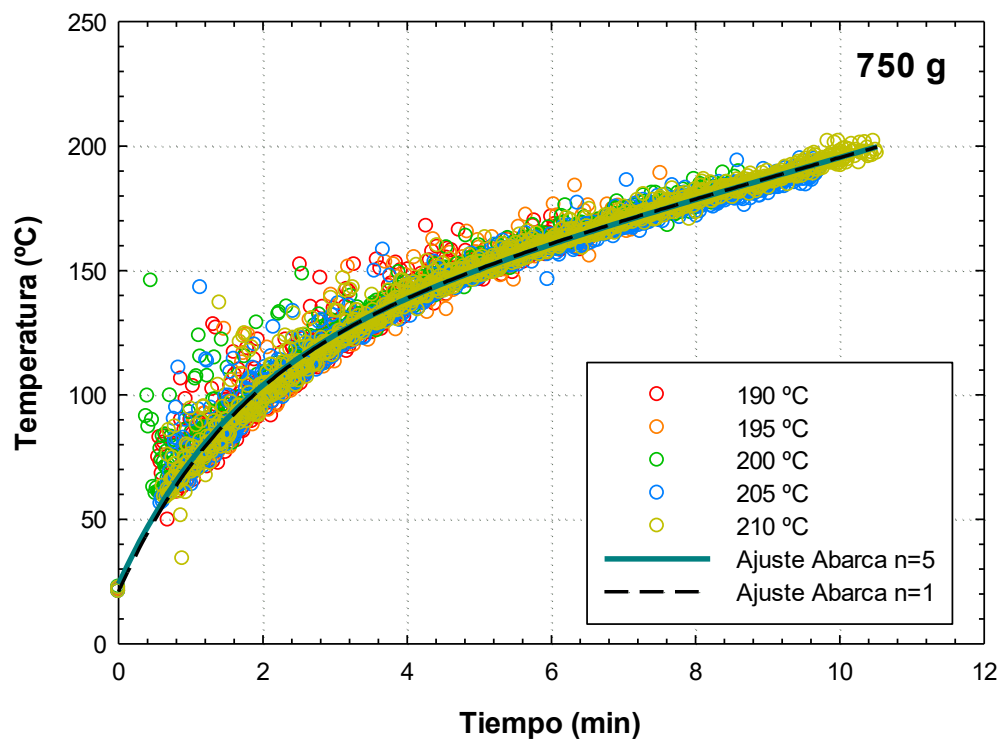


Figura 35. Cinética de calentamiento de los granos para 750 g a 5 diferentes temperaturas de tueste-Modelo Abarca.

Según menciona Abarca (39), el modelo de temperatura se compone gráficamente de dos tasas de calentamiento, la primera se observa antes de los 2,0 minutos; donde la temperatura del grano aumenta rápidamente y posteriormente se desarrolla de manera lineal hasta finalizar la torrefacción. Como se observa en la Figura 36 (A) para la primera y segunda

repetición y (B) tercera repetición, este mismo comportamiento también se observó en la torrefacción del cacao; además los cambios en las razones de calentamiento se deben principalmente a la cantidad de masa utilizada durante el tueste, esto ya que a menor masa se presenta un calentamiento mucho más rápido y conforme se aumenta este factor la rapidez del calentamiento disminuye y con esto se presenta un mejor ajuste del modelo.

Hay un espacio de aire que sirve como aislante de la temperatura entre la superficie de la cáscara y la superficie interna del grano, la testa, esta debe ser considerada para otros estudios relacionados a la transferencia de calor.

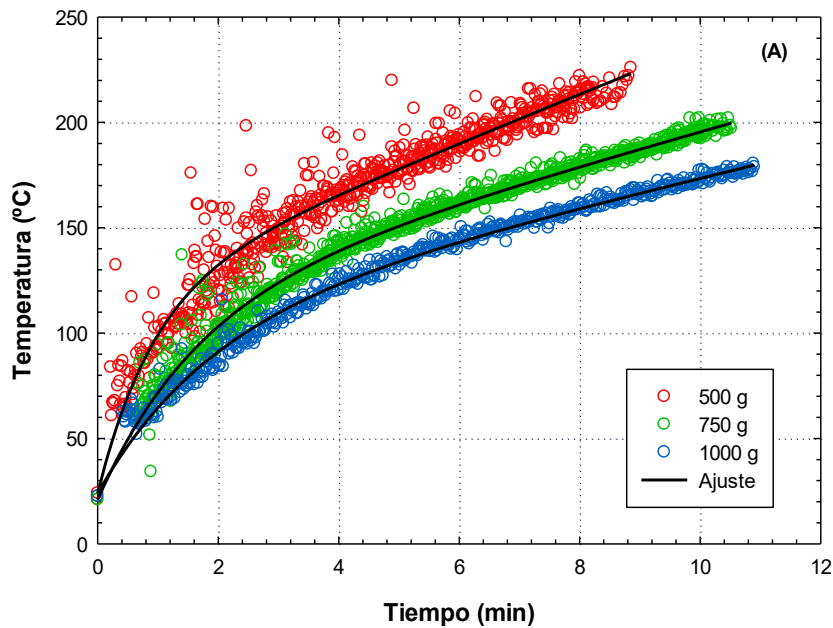


Figura 36. Modelo de calentamiento de los granos según su masa inicial- Modelo Abarca.

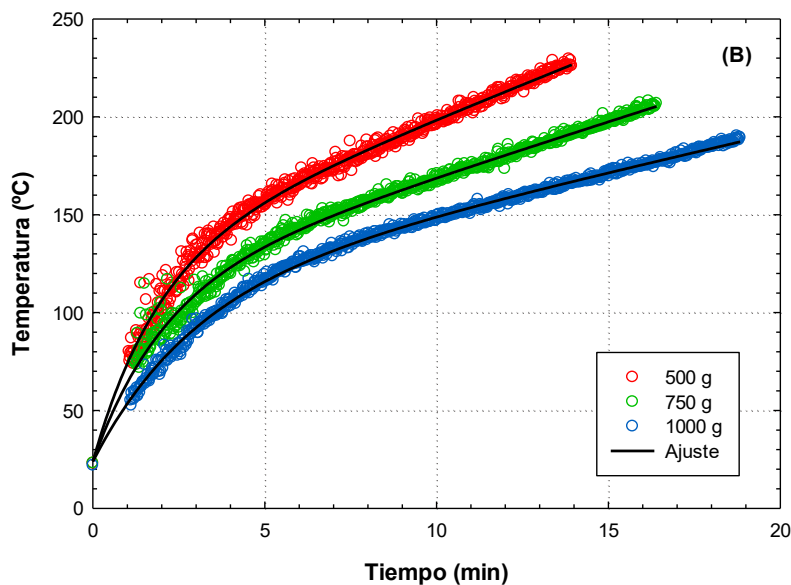


Figura 36. Modelo de calentamiento de los granos según su masa inicial- Modelo Abarca. (continuación)

Se evaluó el modelo de Abarca utilizado en granos de café, pero en este caso aplicado a datos obtenidos en tueste de cacao, este presentó un ajuste adecuado porque conforme se aumentó la masa como se observa en la Figura 35 predomina el efecto de transferencia de calor por conducción, además el modelo fue desarrollado como un ajuste estadístico basado en las observaciones de las tasas de calentamiento y por lo tanto se puede utilizar en el tueste de cacao.

Los parámetros estadísticos del modelo se muestran en el Cuadro 22, en el caso del coeficiente de correlación se obtuvieron valores de 86,22 y 93,29% para la masa de 500 g, en el caso de la masa de 750 g se alcanzaron valores mayores de 96,75 y 98,23%, en tanto que para 1000 g los valores de R^2 obtenidos fueron de 95,94 y 98,82%; determinándose de esta manera un aumento en este parámetro conforme aumentó la masa.

Los parámetros del modelo K_0 , a y b fueron determinados con un p-valor menor a 0,0001. En el caso de la desviación estándar del ajuste se obtuvieron valores similares al modelo de Vargas-Elías, donde para la masa de 500 g los valores fueron mayores al 10%; para 750 g se

obtuvo un SE menor a 6,27% y para 1000 g 5,96%, obteniendo nuevamente mejores resultados al aumentar la masa.

Cuadro 22. Parámetros estadísticos para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de granos durante el tueste de cacao-Modelo Abarca. (Primera y segunda repetición)

	500 g		750 g		1000 g	
	n=10	n=2	n=10	n=2	n=10	n=2
Coefficiente de regresión						
K	12,39	11,6969	8,2331	8,0917	6,3407	6,8738
a	-107,4608	-104,2446	-55,3341	-57,0293	-37,1276	-43,5871
b	1,1548	1,0884	0,6197	0,6083	0,4423	0,5379
p-valor						
K	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
a	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
b	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos						
R	0,9286	0,9659	0,9836	0,9911	0,9795	0,9941
R ²	0,8622	0,9329	0,9675	0,9823	0,9594	0,9882
Adj. R ²	0,8622	0,9327	0,9675	0,9823	0,9594	0,9882
SE	13,4629	10,0469	6,2725	4,8903	5,9690	3,7893
t-test						
K	47,8955	34,8143	67,8410	50,7993	37,3146	39,5474
a	-46,5361	-28,2829	-133,6501	-87,1049	-133,5086	-74,6266
b	30,2310	19,3759	61,3135	42,8862	41,9467	33,7982

n=10 y n=2, representan la cantidad de corridas evaluadas.

En el Cuadro 23, se observan los valores de los parámetros del ajuste del modelo Abarca para la tercera repetición, el coeficiente de correlación (R²) obtenido fue mayor a 98,89% para las masas en estudio los parámetros del modelo K₀, a y b fueron determinados con un p-valor menor a 0,0001 y el valor de la desviación estándar fue menor al 10% en todos los casos.

Cuadro 23. Parámetros estadísticos para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de granos durante el tueste de cacao-Modelo Abarca. (n=1)

	500 g		750 g		1000 g	
	n=5	n=1	n=5	n=1	n=5	n=1
Coefficiente de regresión						
K	7,2466	7,0813	5,4882	5,6352	3,8919	4,0628
a	-63,3053	-55,1897	-46,2062	-43,6618	-28,4081	-30,0548
b	0,6165	0,5309	0,5042	0,4909	0,3198	0,3460
p-valor						
K	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
a	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
b	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos						
R	0,9889	0,9961	0,9957	0,9955	0,9976	0,9989
R ²	0,9778	0,9922	0,9915	0,9910	0,9952	0,9977
Adj. R ²	0,9778	0,9922	0,9915	0,9910	0,9952	0,9977
SE	5,5741	3,4408	3,2058	3,2660	2,2499	1,6186
t-test						
K	102,3506	83,2508	169,8419	96,3180	143,0627	132,1792
a	-130,9667	-103,8327	-232,9573	-98,0164	-373,7895	-219,5188
b	78,2918	59,6982	134,5484	60,1032	156,2427	111,7468

n=5 y n=1, representan la cantidad de corridas evaluadas.

En el caso del modelo Abarca se muestra en la Figura 37 que la mejor distribución residual se obtuvo al igual que el modelo de Vargas-Elías para la masa de 750 g, donde la distribución de los residuales siguió un patrón aleatorio, es decir que la evaluación de los valores predichos fue exactamente correcta y pueden ser utilizados para describir la cinética de torrefacción de granos de cacao.

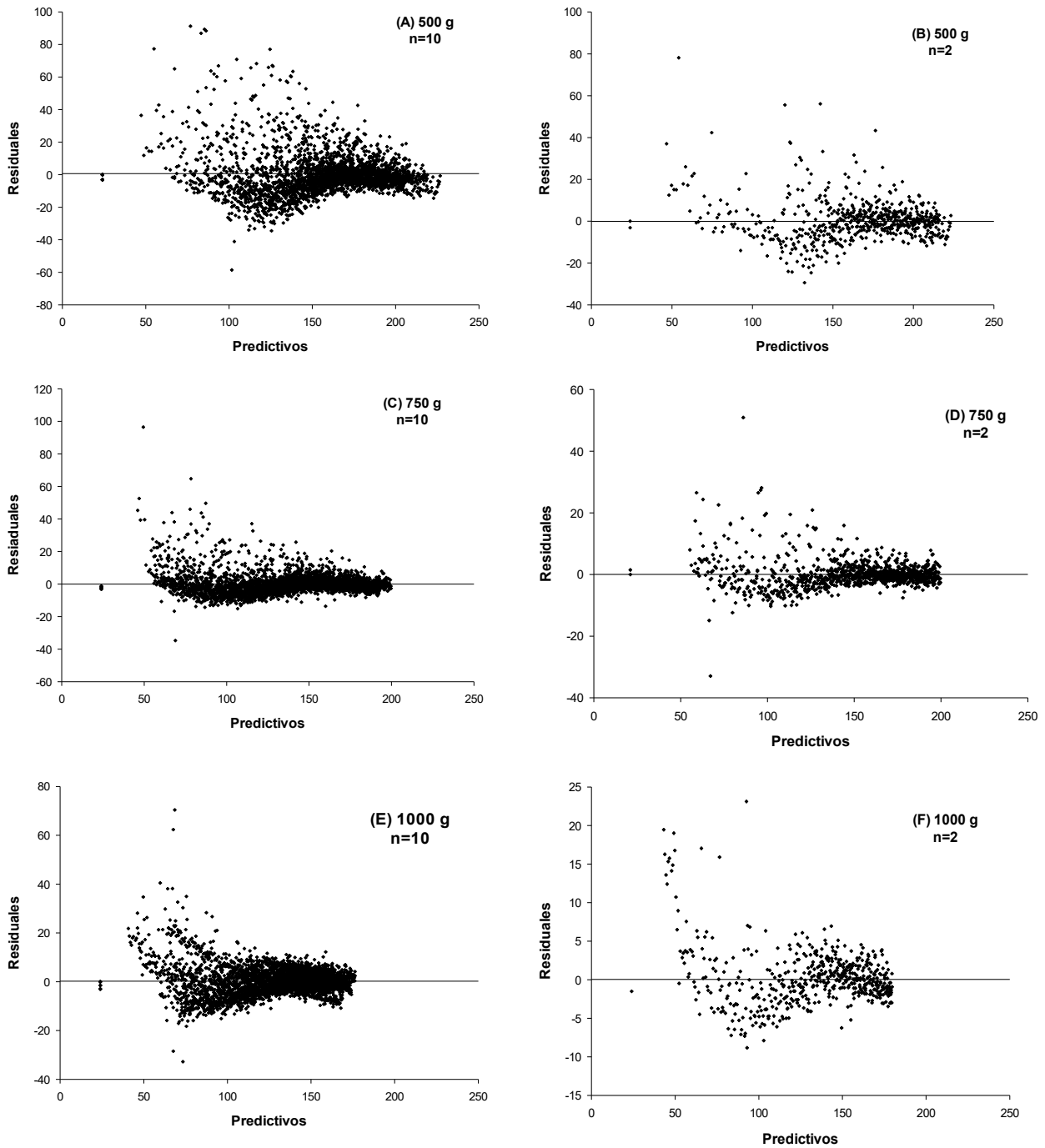


Figura 37. Análisis de residuos- Modelo Abarca. (Primera y segunda repetición)

La evaluación de residuales para la tercera repetición se muestra en el Anexo 6 y se obtuvo un comportamiento similar a la primera y segunda repetición.

Temperatura final del grano tostado

En la Figura 38 se muestra el efecto de la masa y la temperatura en el tueste los granos de cacao, para las repeticiones 1 y 2 (A) y repetición (B). Se observa que al aumentar la masa en 250 g, la temperatura final de tueste disminuye significativamente; además los incrementos en la temperatura de 5 °C para cada muestra a diferente temperatura genera un aumento en el tueste de los granos de cacao. Esto se observa en estudios de café como los de Abarca (39) y Vargas (40), donde mencionan que los incrementos en el grado de tueste generan aumento en el valor final de la temperatura del café tostado. Vargas (40) menciona que obtuvo muestras cada 10 °C de café tostado, lo que generó diferencias en los grados de tueste con cambios de temperatura del tostador en masa constante (350 g).

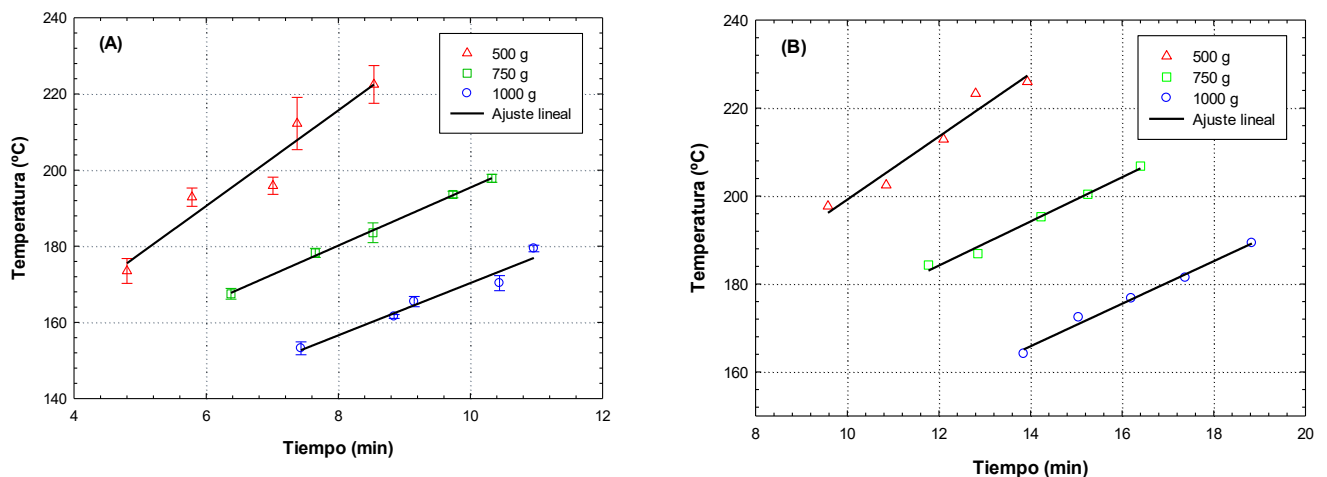


Figura 38. Temperatura de la masa de granos a cinco temperaturas.

Se observa entonces, que existe una relación lineal que permite predecir el calentamiento de los granos en función del tiempo y del tueste en los granos. Es por ello que el aumento de la temperatura de tueste a diferentes masas se ajustó correctamente a un modelo lineal como se observa en el Cuadro 24, con un coeficiente de correlación mayor a 92,78% para la primera

y segunda repetición y de 95,14% para la tercera repetición. Los parámetros estadísticos asociados al modelo en estudio para cada masa de granos de cacao tostado; se observa que la desviación estándar es menor a 5,85% y 3,16%, respectivamente para las repeticiones en estudio y un p-valor menor a 0,0084 y 0,0046.

Cuadro 24. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.

		500 g	750 g	1000 g
R1 y R2	Coefficiente de regresión			
	a (°C/min)	12,5529	7,6351	6,8635
	y ₀ (°C)	115,2805	119,0839	101,6961
	p-valor			
	a	0,0084	<0,0001	0,0042
	y ₀	0,0036	<0,0001	0,0011
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9632	0,9991	0,9771
	R ²	0,9278	0,9982	0,9547
	Adj. R ²	0,9037	0,9976	0,9395
	SE	5,8551	0,5968	2,4028
	t-test			
	a	6,2079	40,6423	7,9476
	y ₀	8,3521	73,3709	12,4634
R3	Coefficiente de regresión			
	a	7,1683	5,0250	4,8374
	y ₀	127,5211	123,8870	98,1145
	p-valor			
	a	0,0046	0,0006	0,0005
	y ₀	0,0014	0,0001	0,0003
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9754	0,9938	0,9945
	R ²	0,9514	0,9876	0,9891
	Adj. R ²	0,9352	0,9835	0,9855
	SE	3,1637	1,1991	1,1406
	t-test			
	a	7,6651	15,4664	16,4997
	y ₀	11,4125	26,8596	20,4623

La pendiente a es un indicador de la rapidez del calentamiento, donde se observa que al duplicar la masa efectivamente se disminuye a la mitad la rapidez del calentamiento pasando desde 12,6 hasta 6,9 °C/min.

Porras et al. (51) mencionan en su trabajo que la temperatura del tostador tiene un efecto directo sobre la rapidez en que calientan los granos. La pendiente de la línea representa la rapidez del calentamiento de los granos, cuando la temperatura del tostador aumentó también aumentó la pendiente de la línea de calentamiento de los granos; el comportamiento descrito también se observó en la torrefacción de granos de cacao, solamente que en este caso fue provocado por el cambio de masa, se puede inferir que el aumento de la masa causa un efecto en el tostador provocando una disminución en la temperatura de tueste.

Variación de propiedades físicas del cacao durante la torrefacción

Pérdida de masa en el tueste

La pérdida de masa total se puede relacionar con el grado de tueste de los granos, según menciona Illy et al. (52), este parámetro durante el tueste es de 90% agua y el 10% restante se debe principalmente a la liberación de CO₂ y algunas cantidades de compuestos volátiles que se formen en el proceso. En el Cuadro 25, se muestran los valores de pérdida de masa por masa y a las diferentes temperaturas de estudio. Se observó que conforme se aumenta la temperatura las pérdidas de masa fueron mayores, como en el caso de las muestras de 500 g donde a 210 °C la cual es la temperatura menor la pérdida de masa fue de aproximadamente 5,288 y 5,014% para la primera y segunda repetición respectivamente; en comparación con la temperatura de tueste mayor a 230 °C donde se obtuvo un porcentaje de 9,681 y 9,752% de pérdida de masa.

Además, se observó que conforme se aumentó la masa de tueste las pérdidas de masa fueron menores donde para la primera repetición se obtuvieron valores de 5,288%, 4,999% y 2,605% para las masas de 500, 750 y 1000 g respectivamente a la temperatura menor de tueste en cada caso.

Cuadro 25. Pérdida de masa por temperatura y masa.

Repetición	Masa (g)	Pérdida de masa (%)				
		210 °C	215 °C	220 °C	225 °C	230 °C
R1	500	210 °C	215 °C	220 °C	225 °C	230 °C
		5,288	6,748	8,253	8,873	9,681
	750	190 °C	195 °C	200 °C	205 °C	210 °C
		4,999	6,786	7,868	8,766	9,423
	1000	175 °C	180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
		2,605	5,660	6,541	7,332	8,121
R2	500	210 °C	215 °C	220 °C	225 °C	230 °C
		5,014	7,119	8,188	8,793	9,752
	750	190 °C	195 °C	200 °C	205 °C	210 °C
		5,07	6,62	7,219	8,528	8,838
	1000	175 °C	180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
		4,483	5,832	6,221	7,148	7,99
R3	500	210 °C	215 °C	220 °C	225 °C	230 °C
		9,01	10,16	10,28	11,33	11,82
	750	190 °C	195 °C	200 °C	205 °C	210 °C
		8,35	8,88	9,62	9,90	10,69
	1000	175 °C	180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
		7,53	8,11	8,65	9,21	9,82

En la Figura 39 se muestran las cinéticas de pérdida de masa durante el proceso de torrefacción de cacao para la primera (A), segunda (B) y tercera (C) repetición; se observa que en cada repetición existe una tendencia lineal ascendente, es decir para obtener los niveles de tueste se puede aproximar con dos puntos de observación y se puede aproximar el tiempo de tueste.

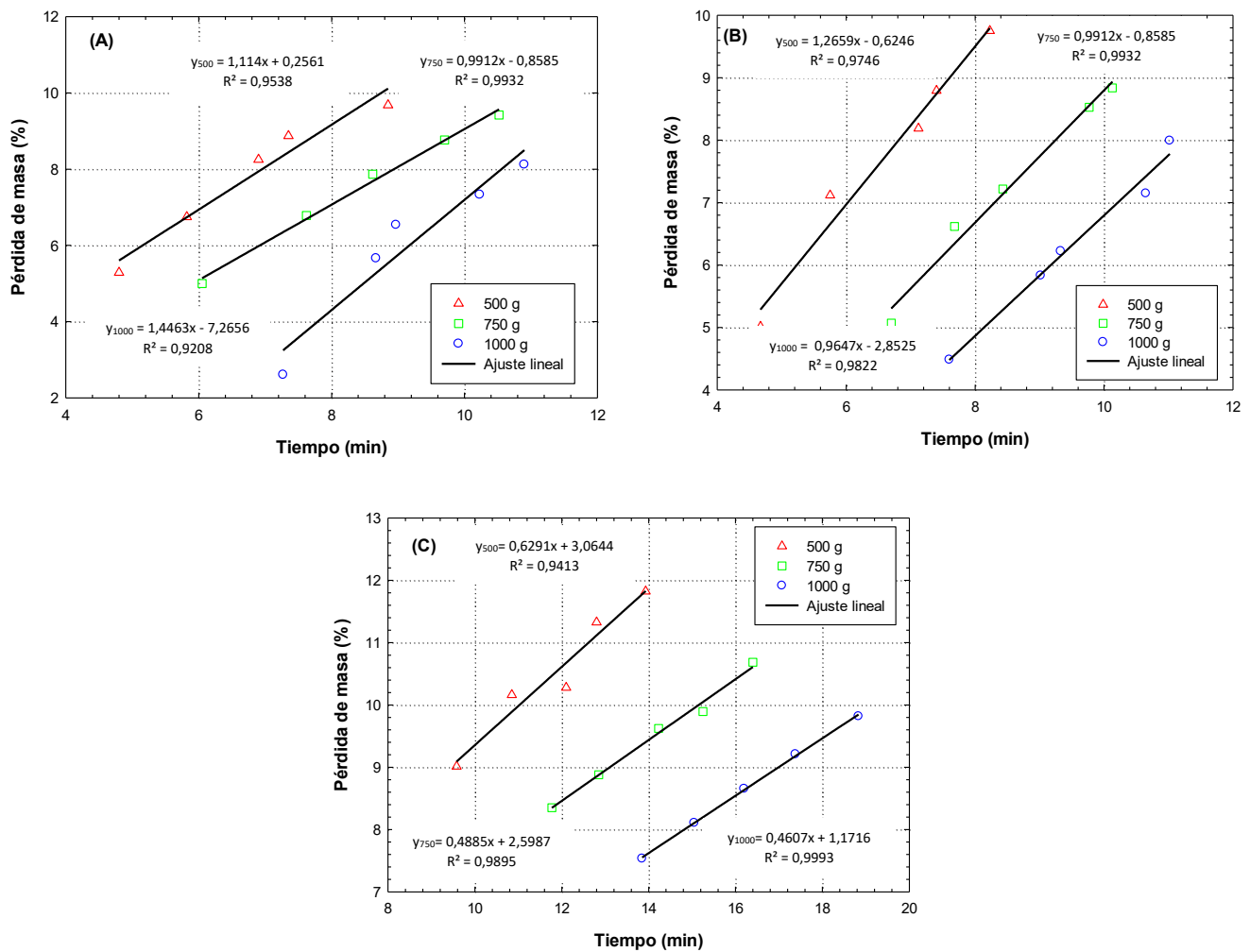


Figura 39. Cinética de pérdida de masa, para las masas evaluadas.

La cinética de pérdida de masa fue ajustada a modelos lineales como se observa en el Cuadro 26, con coeficientes de correlación mayores a 92%, las desviaciones estándar de los modelos de ajuste para las tres repeticiones fueron menores a 0,7% y los parámetros del modelo lineal y_0 y a de los modelos de ajuste fueron menores a fueron obtenidos p-valores menores a 0,9616.

Se observó que el comportamiento general fue que la pendiente disminuye conforme se incrementa la masa inicial colocada en el tostador. Este comportamiento se observó en estudios de tueste de café como el de Abarca (39), Vargas (40), Mendes (53) y Bustos (54).

Cuadro 26. Análisis estadístico del modelo lineal de la cinética de pérdida de masa. (R=1)

		500 g	750 g	1000 g
R1	Coefficiente de regresión			
	a	1,1140	0,9912	1,4463
	y ₀	0,2561	-0,8585	-7,2656
	p-valor			
	a	0,0043	0,0002	0,0097
	y ₀	0,8096	0,1263	0,0496
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9766	0,9966	0,9596
	R ²	0,9538	0,9932	0,9208
	Adj. R ²	0,9384	0,9910	0,8944
	SE	0,4352	0,1658	0,6929
	t-test			
	a	7,8728	20,9821	5,9070
	y ₀	0,2630	-2,1020	-3,1927
R2	Coefficiente de regresión			
	a	1,2659	1,0583	0,9647
	y ₀	-0,6246	-1,7853	-2,8525
	p-valor			
	a	0,0017	0,0009	0,0010
	y ₀	0,4906	0,0764	0,0287
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9872	0,9920	0,9911
	R ²	0,9746	0,9841	0,9822
	Adj. R ²	0,9661	0,9788	0,9763
	SE	0,3342	0,2223	0,2053
	t-test			
	a	10,7203	20,6271	14,4526
	y ₀	-0,7832	-4,6867	-3,7917

Cuadro 26. Análisis estadístico del modelo lineal de la cinética de pérdida de masa. (R=1) (continuación)

		Coefficiente de regresión			
R3	a	0,6291	0,4885	0,4607	
	y ₀	3,0644	2,5987	1,1716	
			p-valor		
	a	0,0061	0,0005	<0,0001	
	y ₀	0,0663	0,0081	0,0021	
			Parámetros estadísticos		
	R	0,9702	0,9947	0,9996	
	R ²	0,9413	0,9895	0,9993	
	Adj. R ²	0,9218	0,9860	0,9990	
	SE	0,3068	0,1072	0,0278	
			t-test		
	a	6,9373	16,8220	64,4025	
y ₀	2,8281	6,3037	10,0137		

Se comprobó que la pérdida de masa para el tueste de cacao es lineal, lo cual permite predecir el punto de tueste recomendado en sabor y análisis nutricional.

Densidad aparente

En el Cuadro 27, se muestran los valores de densidad aparente obtenidos para el cacao finalizado el tueste de los granos donde se observa que existe una aleatoriedad en los datos obtenidos al incrementar las temperaturas, mostrándose de esta manera un efecto considerable en la densidad aparente.

Cuadro 27. Densidad aparente del cacao tostado por efecto de la masa y temperatura.

Masa (g)	Temperatura (°C)	Densidad aparente (kg/m ³)		
		R1	R2	R3
500	210	420,72	425,52	408,93
	215	408,63	414,97	406,73
	220	410,32	413,21	396,43
	225	411,82	413,97	405,85
	230	412,37	410,69	394,99
750	190	428,46	444,16	448,59
	195	423,62	441,59	451,74
	200	415,38	444,31	429,72
	205	411,92	432,99	434,47
	210	412,91	438,19	432,45
1000	176	426,42	456,98	446,04
	181	429,23	449,79	451,24
	186	423,28	440,56	436,61
	191	426,68	425,26	452,92
	196	423,24	454,22	431,19

La densidad aparente inicial para un contenido de humedad de 7,23% (b.h.) fue de aproximadamente 513,03 kg/m³, este valor se encuentra dentro del rango estudiado por Bart-Plange et al. (55) el cual va desde 559,60 a 505,06 kg/m³ para un contenido de humedad inicial aproximado del 7%. En el caso del cacao tostado no se encontraron trabajos relacionados donde se estudie esta propiedad física.

Es importante mencionar, que los valores de densidad registrados se encuentran de acuerdo a lo reportado para el caso del café (52), donde la densidad aparente presenta valores de 300 a 450 kg/m³ en café tostado, más aunque se utilizó el método del densímetro para determinar la densidad aparente de los granos tostados se observó que la incertidumbre reportada en el presente estudio no se encontró en el rango de 0,79 a 16,00 kg/m³ de acuerdo al estudio realizado con el densímetro para granos (39) y (40).

Al realizar una comparación con el trabajo de Abarca (39), este menciona que los incrementos de masa afectan de manera positiva la densidad aparente de los granos,

permitiendo de esta manera obtener valores mayores, lo cual no se observa de manera específica en este trabajo. Además, se esperaba que conforme aumentara la temperatura de tueste por masa, es decir, el nivel de tueste el valor en estudio disminuyera, más esto no se observó de manera consecuente, como sí se vio en otros trabajos como el de Abarca (39) y Vargas (40), en granos como el café.

La diferencia en la densidad de los granos de cacao tostados podría deberse a la naturaleza de la estructura celular, del volumen y las características de masa de los granos (uniformidad) ya que estos tienen una capacidad de absorción de la humedad alta y esto tiene un efecto reductor sobre la densidad aparente (55).

Contenido de humedad final

El proceso de tostado de los granos de cacao resulta en la reducción de la humedad del 8 a alrededor del 2% y de la actividad del agua de 0,75 a 0,50; esta disminución puede ser el factor principal que aumenta considerablemente la resistencia térmica de Salmonella; para los granos de cacao la combinación de tiempo-temperatura de 24 min-110 °C, 18 min-120 °C, 13 min-130 o 140 °C será necesaria para lograr la reducción a un valor seguro para el consumo (56).

En el Cuadro 28, se muestran los valores de contenido de humedad final determinados para las tres repeticiones realizadas, al realizar el análisis estadístico se determinó que la prueba estadística de p en todos los casos tiene valores mayores a 0,0001, además al realizar el análisis de los datos de la primera y segunda repetición juntos se determinó que la diferencia entre ambos datos en algunos casos era mayor a 1, por lo tanto se tomó la decisión de realizar el análisis individual.

Cuadro 28. Contenido de humedad final del cacao tostado por efecto de la masa y temperatura.

Masa (g)	Temperatura (°C)	Contenido de humedad final (%b.h.)		
		R1	R2	R3
500	210	3,598	3,598	3,598
	215	2,480	2,480	2,480
	220	1,377	1,377	1,377
	225	1,055	1,055	1,055
	230	0,856	0,856	0,856
750	190	4,404	3,425	1,747
	195	3,035	2,796	1,733
	200	2,312	2,175	1,295
	205	1,412	1,719	1,622
	210	1,087	1,761	0,608
1000	176	4,655	3,915	1,868
	181	3,877	2,632	1,548
	186	3,015	2,259	1,524
	191	2,457	2,219	1,434
	196	1,747	0,937	1,362

Se observó que al aumentar la temperatura de tueste en cada una de las masas analizadas disminuyó la humedad final del grano de cacao tostado, el aumento en este factor generó mayor diferencia al comparar los valores de humedad final al aumentar la masa, donde los datos obtenidos son similares, esto a su vez influyó en la pérdida de masa como se observó anteriormente donde al aumentar la masa así como la temperatura de tueste la pérdida de masa de la muestra fue mayor.

El valor mínimo de humedad final de cacao tostado para la primera repetición fue de 0,85% a 500 g y el valor mayor que se presentó fue de 4,66% para una masa de 1000 g, el comportamiento de la segunda repetición fue similar a la primera con un valor mínimo de 0,94% para 1000 g y el máximo valor fue de 4,349% para 500 g. En el caso de la tercera repetición el valor mínimo fue de 0,608% a una masa de 750 g y el máximo obtenido fue de 2,461% a 210 °C para la masa de 500 g.

Zzaman et al. (57) realizaron una investigación de las propiedades físicas del cacao después del tueste por el método convectivo, este demostró que para temperaturas de 150 °C el

contenido de humedad fue de 3,04-2,74% (b.h.) para 200 °C 2,96-2,11% y para 250 °C de 4,19-2,62%. Este comportamiento se observa en la presente investigación, donde para las temperaturas de 215, 200 y 191°C (primera, segunda y tercera repetición respectivamente) se obtienen valores similares como se observa en el Cuadro 28.

Materia Seca

Abarca (39) comenta que la materia seca se estudia analizando el cambio que sucede luego del proceso de torrefacción, mediante la masa total y el contenido de humedad de los granos tostados; además aporta que el cambio en la materia seca ocurre tras consumirse debido a las reacciones de *Maillard*, en las que se liberan compuestos volátiles y CO₂, y también durante los procesos de pirolisis.

En el Cuadro 29 se muestran los valores de materia seca obtenidos para cada una de las repeticiones en estudio y sus respectivas temperaturas. Se observa en cada caso que conforme aumenta la temperatura aumenta la pérdida de materia seca.

Cuadro 29. Pérdida de masa seca del cacao tostado por efecto de la masa y temperatura.

Masa (g)	Temperatura (°C)	Materia seca (%)		
		R1	R2	R3
500	210	1,580	2,106	0,621
	215	1,974	2,788	2,251
	220	2,465	2,984	2,294
	225	2,808	3,044	2,564
	230	3,476	3,425	2,692
750	190	2,064	1,177	0,565
	195	3,135	2,155	1,332
	200	3,645	2,164	1,112
	205	4,109	3,094	1,632
	210	4,631	3,465	2,560
1000	176	4,335	2,933	2,191
	181	5,189	3,480	2,478
	186	5,033	3,840	3,036
	191	5,949	4,449	3,535
	196	6,481	4,311	4,114

Como se observó un comportamiento creciente, los datos se analizaron por medio de un ajuste lineal. En el Cuadro 30 se muestran los parámetros estadísticos para cada una de las repeticiones, donde se muestra que el coeficiente de correlación (R^2) muestra valores mayores a 89% y con desviaciones estándar menores a 0,44. En el caso de 750 g se observa que la pendiente disminuye conforme aumenta la masa de granos de cacao.

Cuadro 30. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.

	500 g	750 g	1000 g	
R1	Coefficiente de regresión			
	a	0,4903	0,2672	0,5261
	y_0	-0,8588	0,5979	-2,7599
	p-valor			
	a	0,0001	0,006	0,0442
	y_0	0,0059	0,1947	0,1555
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9981	0,9656	0,8880
	R^2	0,9961	0,9323	0,7886
	Adj. R^2	0,9948	0,9298	0,7181
	SE	0,0529	0,1458	0,4451
	t-test			
	a	27,7424	6,4289	3,3450
	y_0	-7,0411	1,6641	-1,8880
	R2	Coefficiente de regresión		
a		0,6849	0,6155	0,4943
y_0		-1,0263	-2,8463	-3,2658
p-valor				
a		0,0020	0,0034	0,0303
y_0		0,1085	0,0198	0,0756
Parámetros estadísticos				
R		0,9859	0,9799	0,9132
R^2		0,9720	0,9602	0,8340
Adj. R^2		0,9627	0,9469	0,7787
SE		0,1899	0,2069	0,3487
t-test				
a		10,2047	8,5069	3,8825
y_0		-2,2643	-4,5548	-2,6713

Cuadro 30. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos. (continuación)

	500 g	750 g	1000 g
	Coefficiente de regresión		
a	0,4637	0,3191	0,3991
y ₀	-0,0983	-0,6972	-3,4194
	p-valor		
a	0,0174	0,0134	0,0003
y ₀	0,9377	0,4773	0,0021
	Parámetros estadísticos		
R	0,9403	0,9499	0,9960
R ²	0,8841	0,9023	0,9920
Adj. R ²	0,8455	0,8697	0,9893
SE	0,3279	0,2238	
	t-test		
a	4,7842	5,2632	19,2838
y ₀	-0,0849	-0,8099	-10,1022

R3

Se realizó un ajuste de los datos por medio de un modelo cuadrático y exponencial de dos parámetros, con el fin de compararlo con los resultados obtenidos con el modelo lineal para determinar cuál modelo presentaba un mejor ajuste. Se obtuvo que el modelo cuadrático presentó un mejor ajuste con un R² mayor a 86% y una error estándar (SE) menor a 0,3905 en las repeticiones estudiadas; aunque los datos obtenidos fueron mejores se consideró como una segunda mejor opción el análisis mediante un modelo exponencial de dos parámetros como se muestra en el Anexo 8, el cual es más recomendable para el estudio de los datos obtenidos ya que en los casos de análisis de materia seca estudiados por Abarca (39) y Vargas (40) para el caso del granos de café tostado se utilizó una ecuación para reacciones químicas la cual consta de una parte exponencial.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se comprobó que la convección forzada del aire con flujo transversal es efectiva para secar los granos de cacao hasta obtener un contenido de humedad para almacenamiento seguro.

Además, la comparación entre los modelos empíricos de capa delgada utilizados en otras investigaciones resultó que la ecuación de Midilli representa adecuadamente el secado de los granos de cacao, determinándose el efecto de la temperatura del aire en la rapidez de secado donde la ecuación de Arrhenius describe adecuadamente la dependencia de la temperatura.

Se determinó que el contenido de humedad en equilibrio disminuye conforme se aumenta la temperatura del aire de secado para las muestras obtenidas por el método dinámico; el modelo de GAB es el que representa adecuadamente el equilibrio higroscópico de los granos de cacao en desorción.

El estudio del comportamiento de los granos de cacao en un tostador convencional de café permitió conocer las condiciones de tueste a diferentes masas y temperaturas, haciendo posible la torrefacción de los granos de cacao con niveles de tueste.

El calentamiento de la masa de granos del cacao puede representarse con el modelo de calentamiento desarrollado por Pabis para el secado de granos y adaptado por Vargas para la torrefacción de café en tostador convencional. La tasa de calentamiento de los granos de cacao presentó dos etapas semejante a lo relatado por Abarca, cuya ecuación puede representar la temperatura de los granos durante el tueste.

Se demostró que los granos de cacao tienen un comportamiento similar a los granos de café durante la torrefacción.

Recomendaciones

Para posteriores estudios se recomienda realizar el estudio de secado de granos de cacao, realizando variación de velocidad del aire de secado, así como en la temperatura.

Para el tueste de granos de cacao, se debe realizar una separación de granos por tamaño con el fin de obtener un tueste final más uniforme.

Considerar la variación en el nivel del gas para tueste, con el fin de observar la rapidez y sabor del grano.

Se debería desarrollar un colorímetro para los granos de cacao tostados para realizar comparaciones entre el tueste en horno de convección y mediante el método estudiado.

Es importante realizar pruebas organolépticas para posteriores investigaciones, con el fin de determinar características como sabor, olor, color, etc. Además de una prueba en la parte nutricional, para determinar si el tueste mediante el tostador convencional de café afecta a los granos de cacao.

6. REFERENCIAS

1. Schillinger U, Ban-koffi L, Franz C. Fermented Foods and Beverages of the World [Internet]. Tamang JP, Kailasapathy K, editores. Fermented Foods and Beverages of the World. Boca Ratón, FL: CRC Press; 2010. 353–375 p. Disponible en: <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/EBK1420094954>
2. Vega C, Kwik-Uribe C. *Theobroma cacao*-An introduction to the plant, its composition, uses and health benefits. En: Garti N, Widlak N, editores. Cocoa Butter and Related Compounds. United States of America: AOCS Press, Urbana; 2012. p. 35–62.
3. ICCO. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics. Vol. XLIV, The International Cocoa Organization. 2018.
4. Carmiol G. Análisis de la actividad cacaotera costarricense y perspectivas de su reactivación [Internet]. San José, Costa Rica; 2017. Disponible en: <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/EBK1420094954>
5. Hii CL, Borém F. Drying and Roasting of Cocoa and Coffee. 1st ed. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group; 2019. 356 p. (Advances in drying science and technology).
6. Guehi TS, Zahouli IB, Ban-Koffi L, Fae MA, Nemlin JG. Performance of different drying methods and their effects on the chemical quality attributes of raw cocoa material. Int J Food Sci Technol [Internet]. el 20 de julio de 2010;45(8):1564–71. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2621.2010.02302.x>
7. García-Alamilla P, Salgado-Cervantes MA, Barel M, Berthomieu G, Rodríguez-Jimenes GC, García-Alvarado MA. Moisture, acidity and temperature evolution during cacao drying. J Food Eng [Internet]. abril de 2007;79(4):1159–65. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877406003244>

8. Dankers C, Newell C. Organic Cocoa Production : A guide for Farmer Field Schools in Sierra Leone. Rome, Italy; 2005.
9. Dand R. The International Cocoa Trade [Internet]. 3er ed. The International Cocoa Trade. Philadelphia,USA: Elsevier; 2011. 65–93 p. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20130161636>
10. Hii CL, Law CL, Cloke M, Suzannah S. Thin layer drying kinetics of cocoa and dried product quality. Biosyst Eng [Internet]. febrero de 2009;102(2):153–61. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.10.007>
11. Koua BK, Koffi PME, Gbaha P. Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. J Saudi Soc Agric Sci [Internet]. enero de 2019;18(1):72–82. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2017.01.002>
12. Alfaro JD. Efecto del método de secado, la temperatura y el caudal de aire,sobre el proceso de secado en cacao (*Theobroma cacao L.*) [Tesis Licenciatura]. Universidad de Costa Rica; 1998.
13. Corrêa PC, Goneli ALD, Júnior PCA, De Oliveira GHH, Valente DSM. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. Int J Food Sci Technol [Internet]. el 23 de agosto de 2010;45(10):2016–22. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2621.2010.02373.x>
14. Ndukwu MC. Effect of Drying Temperature and Drying Air Velocity on the Drying Rate and Drying Constant of Cocoa Bean. Agric Eng Int CIGR Ejournal. 2009;11:1–7.
15. Pérez R. El Beneficiado del cacao: secado, transporte, almacenamiento y evaluación de calidad (Parte II). Rev Espec en Cacao. 2016;10:22–3.
16. Cubillos G, Marizalde GJ, Correa E. Manual de beneficio del cacao. Medellín,

Colombia: Secretaria de agricultura de Antioquia; 2008.

17. Gabas AL, Telis VRN, Sobral PJA, Telis-Romero J. Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. *J Food Eng* [Internet]. septiembre de 2007;82(2):246–52. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877407001197>
18. Hassini L, Bettaieb E, Desmorieux H, Torres SS, Touil A. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. *Ind Crops Prod* [Internet]. mayo de 2015;67:457–65. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669015000801>
19. de Oliveira GHH, Corrêa PC, de Souza Santos E, Treto PC, Diniz MDMS. Evaluation of thermodynamic properties using GAB model to describe the desorption process of cocoa beans. *Int J Food Sci Technol* [Internet]. octubre de 2011;46(10):2077–84. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2621.2011.02719.x>
20. Herman C, Spreutels L, Turomzsa N, Konagano EM, Haut B. Convective drying of fermented Amazonian cocoa beans (*Theobroma cacao* var. Forasteiro). Experiments and mathematical modeling. *Food Bioprod Process* [Internet]. marzo de 2018;108:81–94. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096030851830004X>
21. Ramos N, Castro A, Félix M, Milla F, Soria R, Alcarraz M, et al. Evaluación de ocratoxina en *Theobroma Cacao L.* “Cacao Trinitario”, por cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) y análisis micotoxigénico durante el proceso de cosecha, fermentado, secado y almacenado. *Rev Soc Quím Perú.* 2018;84(4):477–87.
22. Rocha IS, Santana LRR de, Soaes SE, Bispo E da S. Effect of the roasting temperature and time of cocoa beans on the sensory characteristics and acceptability of chocolate. *Food Sci Technol* [Internet]. el 20 de marzo de 2017;37(4):522–30. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612017000400522&lng=en&tlng=en

23. Hii CL, Menon AS, Chiang CL, Sharif S. Kinetics of hot air roasting of cocoa nibs and product quality. *J Food Process Eng* [Internet]. junio de 2017;40(3):e12467. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/jfpe.12467>
24. Ramli N, Hassan O, Said M, Samsudin W, Idris NA. Influence of roasting conditions on volatile flavor of roasted Malaysian cocoa beans. *J Food Process Preserv* [Internet]. junio de 2006;30(3):280–98. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1745-4549.2006.00065.x>
25. Krysiak W, Adamski R, Żyżelewicz D. Factors Affecting the Color of Roasted Cocoa Bean. *J Food Qual* [Internet]. febrero de 2013;36(1):21–31. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/jfq.12009>
26. Djikeng FT, Teyomnou WT, Tenyang N, Tiencheu B, Morfor AT, Touko BAH, et al. Effect of traditional and oven roasting on the physicochemical properties of fermented cocoa beans. *Heliyon* [Internet]. febrero de 2018;4(2):e00533. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844017331134>
27. International Organization for Standardization. ISO 2451:2017 Cocoa beans - Specification and quality requirements. 2017.
28. Gómez I, Murillo D, Vargas R, Vargas-Elias G. Efecto de la temperatura en la cinética de secado de semillas de papaya sin mucílago. En: Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola (CLIA). San José, Costa Rica: Memoria CLIA; 2018. p. 1–9.
29. Diamante LM, Munro PA. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Sol Energy* [Internet]. octubre de 1993;51(4):271–6. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0038092X93901225>
30. Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single-layer drying. *Dry Technol* [Internet]. el 23 de julio de 2002;20(7):1503–13. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-120005864>

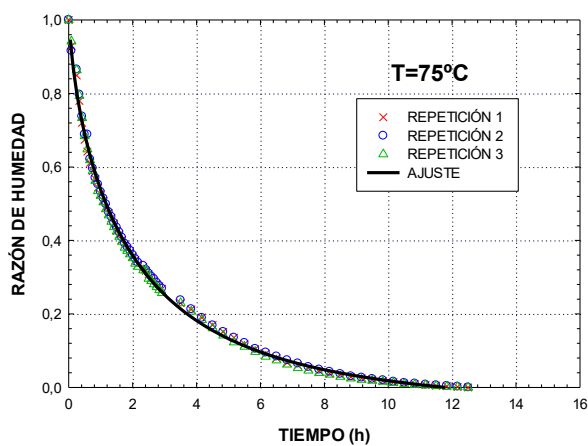
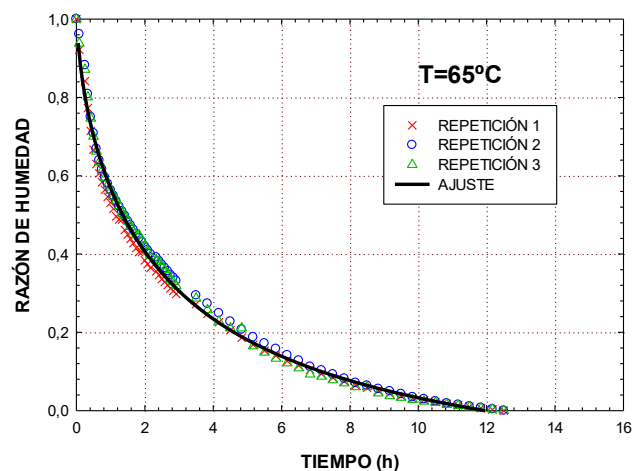
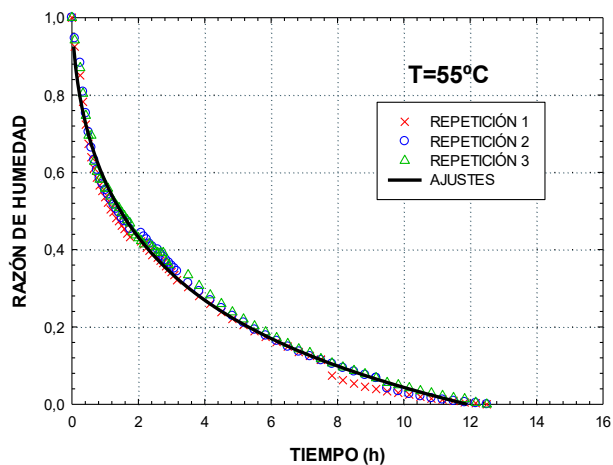
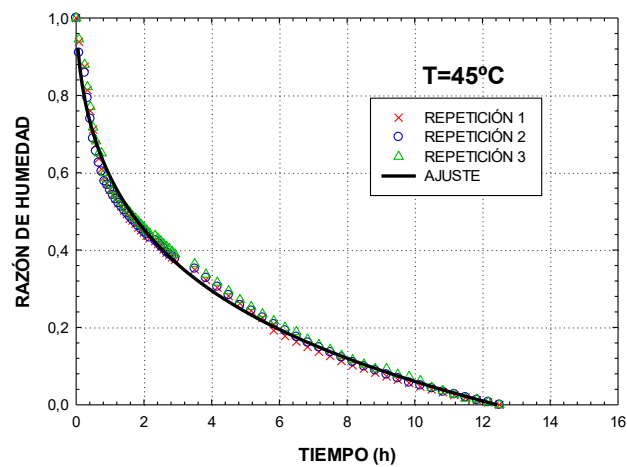
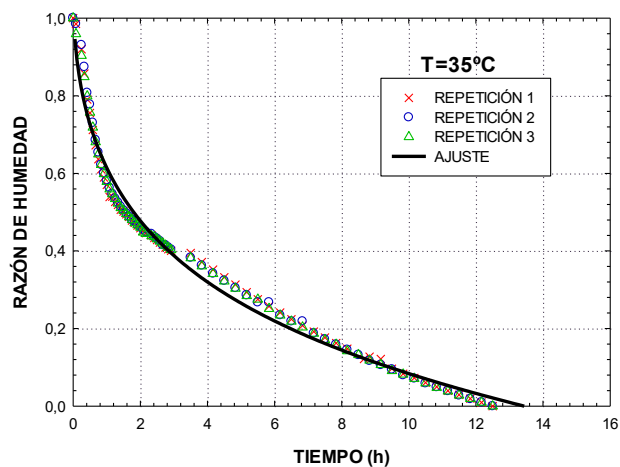
31. Kucuk H, Midilli A, Kilic A, Dincer I. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. *Dry Technol* [Internet]. el 19 de mayo de 2014;32(7):757–73. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2013.873047>
32. Henderson S, Pabis S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. *J Agric Eng Res*. 1961;6:169–74.
33. Yagcioglu K, Degirmencioglu A, Cagatay F. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. En: 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy. Adana, Turkey; 1999. p. 565–9.
34. Yaldyz O, Ertekyn C. Thin layer solar drying of some vegetables. *Dry Technol* [Internet]. el 31 de marzo de 2001;19(3–4):583–97. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-100103936>
35. Lalit R. Verma, R. A. Bucklin, J. B. Endan, F. T. Wratten. Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models. *Trans ASAE* [Internet]. 1985;28(1):296–301. Disponible en: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=32245&CID=t1985&v=28&i=1&T=1>
36. Afonso PC, Meira F, Correa PC. Propriedades físicas e térmicas dos frutos e dos grãos de café. En: Borém F, editor. *Poscolheita do Café*. 1ª ed. Minas, Gerais: Editora UFPA; 2008. p. 89–126.
37. Sánchez N. Optimización de la cinética de secado en semillas de papaya [Tesis Licenciatura]. Universidad de Costa Rica; 2018.
38. Baptestini FM, Corrêa PC, Vanegas JDB, Leite R, Botelho FM, Campos RC. Water sorption kinetics of damaged beans: GAB model. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* [Internet]. agosto de 2017;21(8):550–5. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662017000800550&lng=en&tlng=en

39. Abarca R. Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional [Tesis Licenciatura]. Universidad de Costa Rica; 2017.
40. Vargas-Elias G. Cinética do aquecimento, expansão volumétrica e perda de massa em grãos de café durante a torrefação [Tesis Doctorado]. Universidade Federal de Viçosa; 2014.
41. Doymaz I. Sun drying of figs: an experimental study. J Food Eng [Internet]. diciembre de 2005;71(4):403–7. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877404005801>
42. Toğrul İT, Pehlivan D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. J Food Eng [Internet]. diciembre de 2004;65(3):413–25. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877404000494>
43. Hii CL, Law CL, Cloke M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. J Food Eng [Internet]. enero de 2009;90(2):191–8. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877408003105>
44. MacManus Chinenye N, Ogunlowo A., Olukunle O. Cocoa Bean (*Theobroma cacao* L.)Drying Kinetics. Chil J Agric Res [Internet]. diciembre de 2010;70(4):633–9. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-58392010000400014&lng=en&nrm=iso&tlng=en
45. Senadeera W, Bhandari BR, Young G, Wijesinghe B. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. J Food Eng [Internet]. julio de 2003;58(3):277–83. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877402003862>
46. Quequeto WD, Resende O, Silva PC, Silva FAS e, Silva LC de M. Drying Kinetics of Noni Seeds. J Agric Sci [Internet]. el 15 de abril de 2019;11(5):250. Disponible en: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/39097>

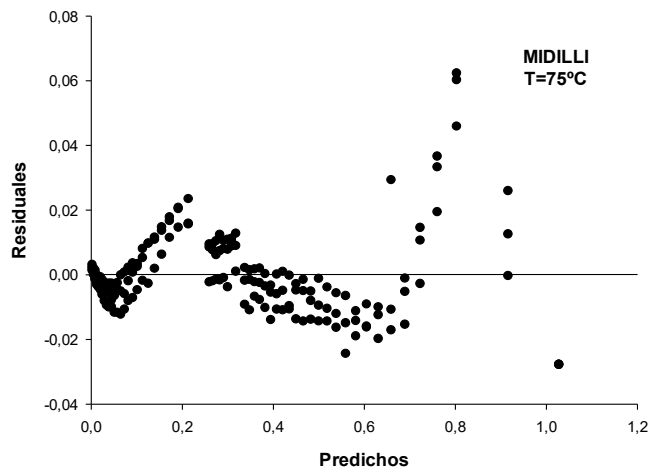
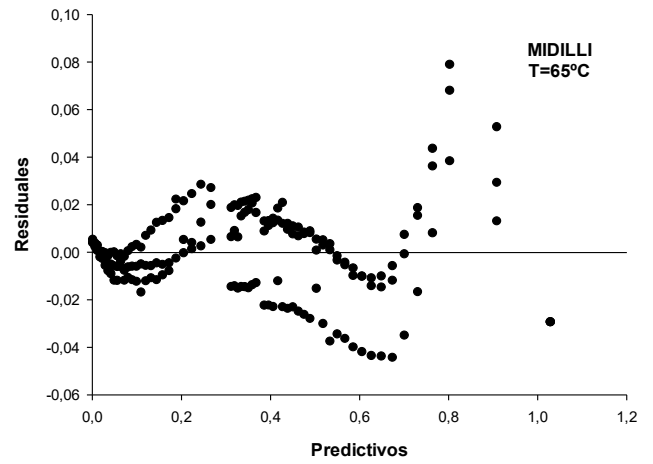
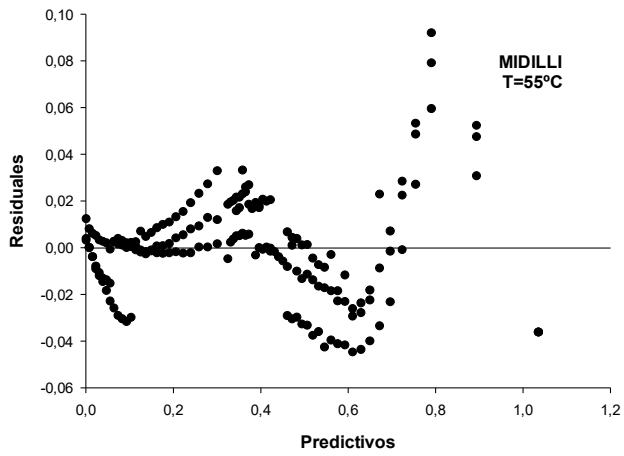
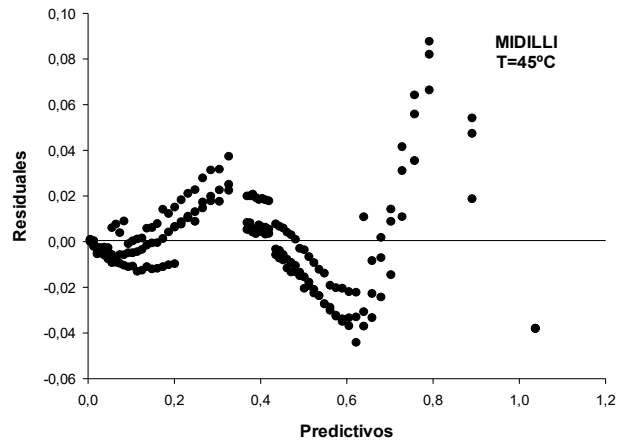
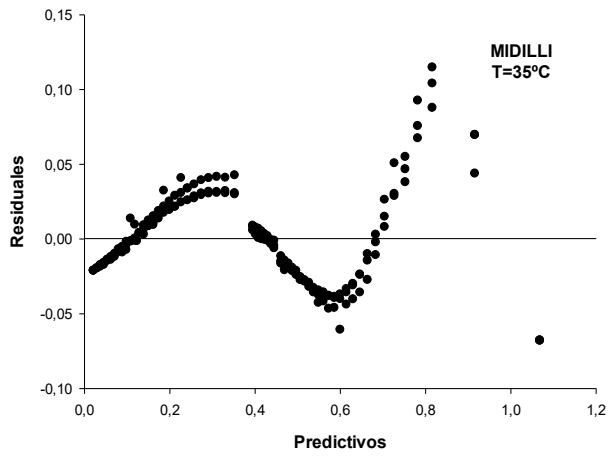
47. Koua BK, Koffi PME, Gbaha P. Moisture desorption isotherms characteristics of cocoa beans. *Pakistan J Food Sci.* 2016;26(3):143–52.
48. Brett B, Figueroa M, Sandoval AJ, Barreiro JA, Müller AJ. Moisture Sorption Characteristics of Starchy Products: Oat Flour and Rice Flour. *Food Biophys* [Internet]. el 12 de septiembre de 2009;4(3):151–7. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11483-009-9112-0>
49. Chen C, Weng Y-K. Moisture Sorption Isotherms of Oolong Tea. *Food Bioprocess Technol* [Internet]. el 20 de abril de 2010;3(2):226–33. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11947-008-0075-9>
50. Sandoval AJ, Barreiro JA. Water sorption isotherms of non-fermented cocoa beans (*Theobroma cacao*). *J Food Eng* [Internet]. febrero de 2002;51(2):119–23. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877401000474>
51. Porras MC, Vargas-Elias G, Araúz L, Abarca Y. Efecto de la temperatura en la rapidez del tostado de café. *Tecnol en Marcha.* 2019;32(7):20–7.
52. Illy A, Rinantonio V. *Espresso Coffee The Science of Quality*. Segunda Ed. San Diego, California, Estados Unidos: Elsevier Academic Press; 2005. 417 p.
53. Mendes F. Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e caracterizagao do processo de torrefagao dos graos de *Coffea canephora* [Tesis Doctorado]. Universidade Federal de Viçosa; 2012.
54. Bustos JD. Modelagem das propriedades físicas e da transferencia de calor e massa dos graos de café durante a torrefagao [Tesis Doctorado]. Universidade Federal de Viçosa; 2015.
55. Bart-Plange A, Baryeh EA. The physical properties of Category B cocoa beans. *J Food Eng* [Internet]. diciembre de 2003;60(3):219–27. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877402004521>

56. Nascimento M da S do, Brum DM, Pena PO, Berto MI, Efraim P. Inactivation of Salmonella during cocoa roasting and chocolate conching. Int J Food Microbiol [Internet]. octubre de 2012;159(3):225–9. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168160512004564>
57. Zzaman W, Yang TA. Effect of Superheated Steam and Convection Roasting on Changes in Physical Properties of Cocoa Bean (*Theobroma cacao*). Food Sci Technol Res [Internet]. 2013;19(2):181–6. Disponible en: <http://jlc.jst.go.jp/DN/JST.JSTAGE/fstr/19.181?lang=en&from=CrossRef&type=abstract>

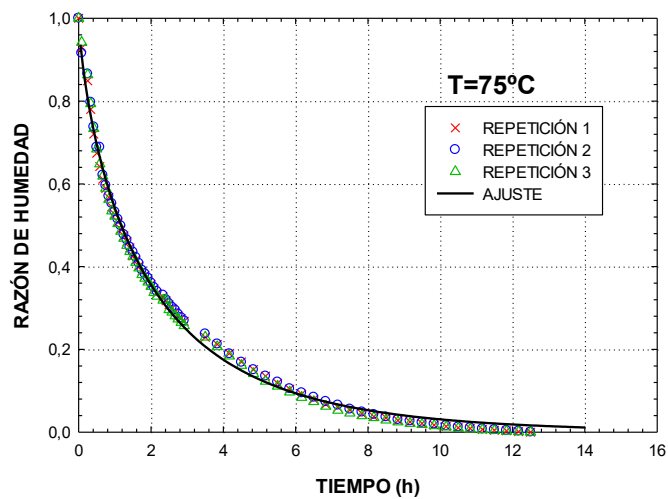
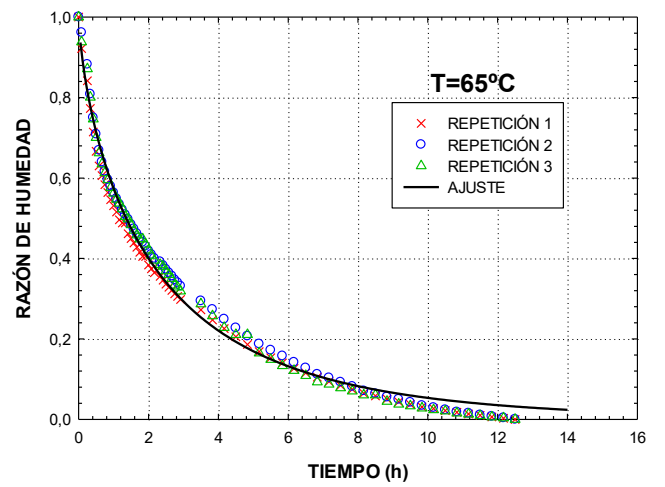
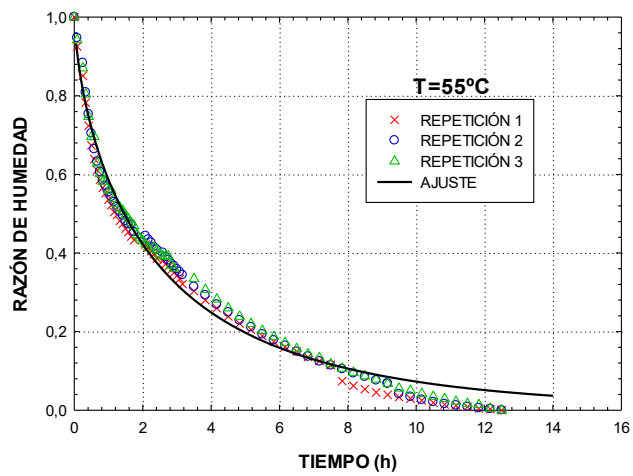
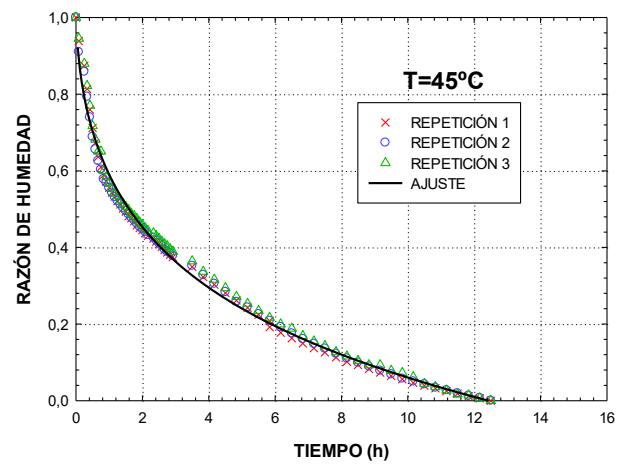
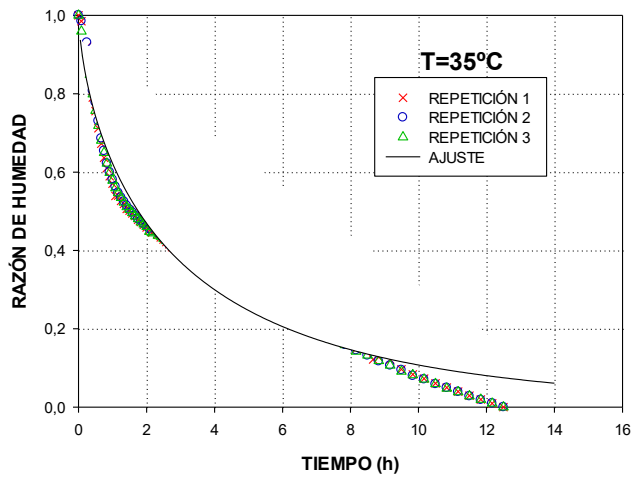
7. ANEXOS



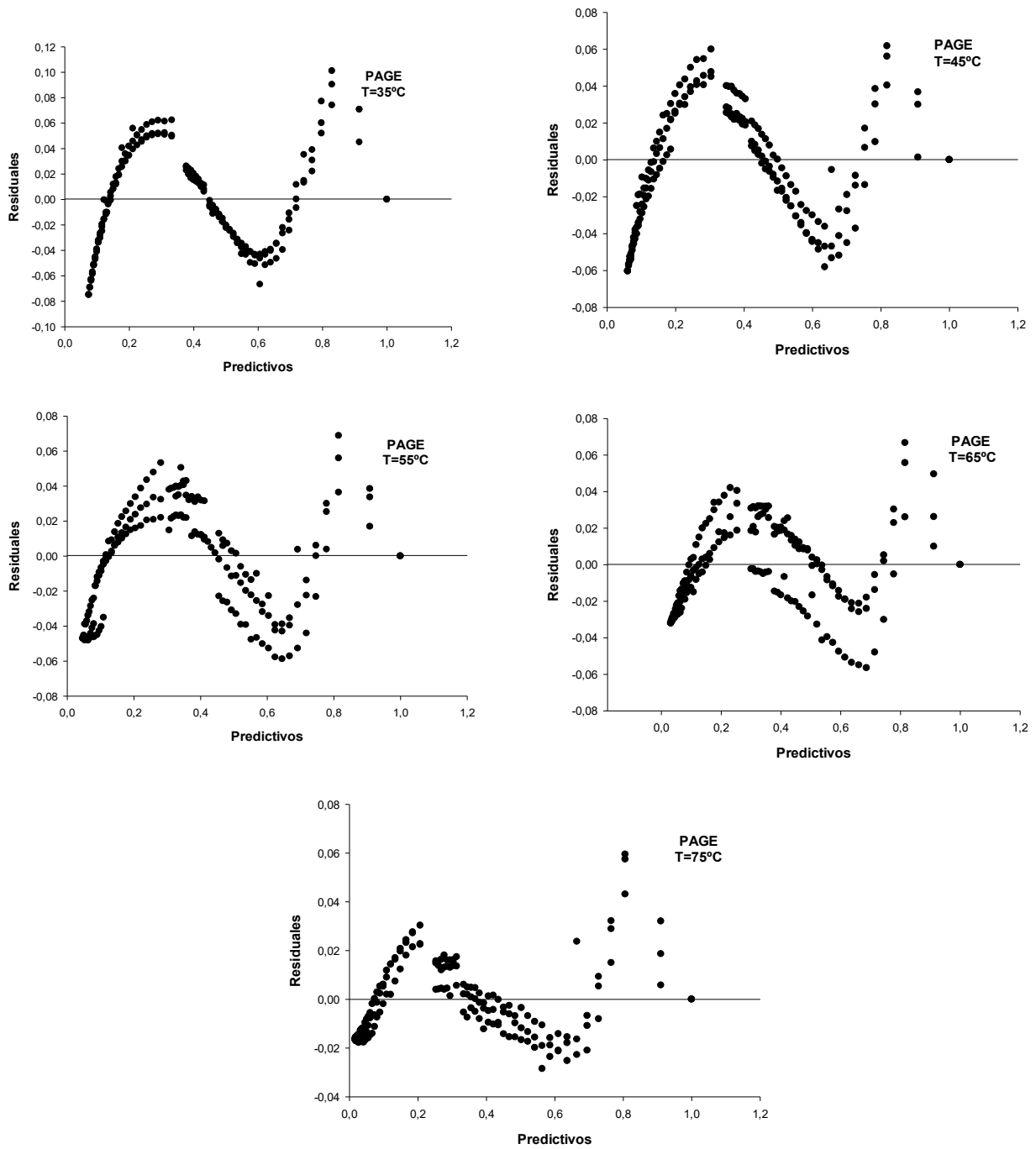
Anexo 1. Cinética de secado del modelo de Midilli para las temperaturas de estudio.



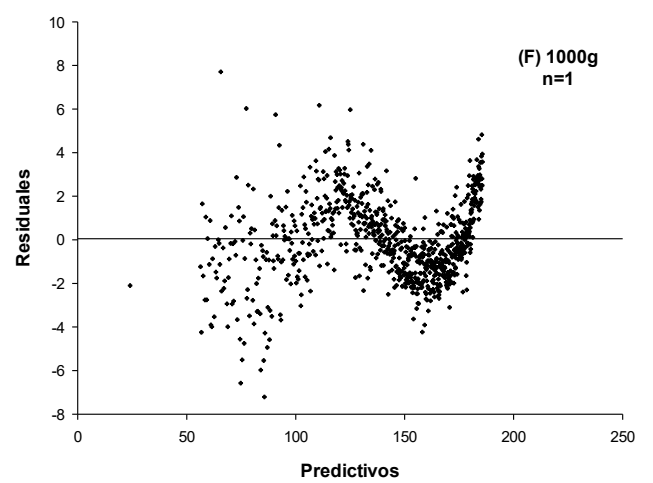
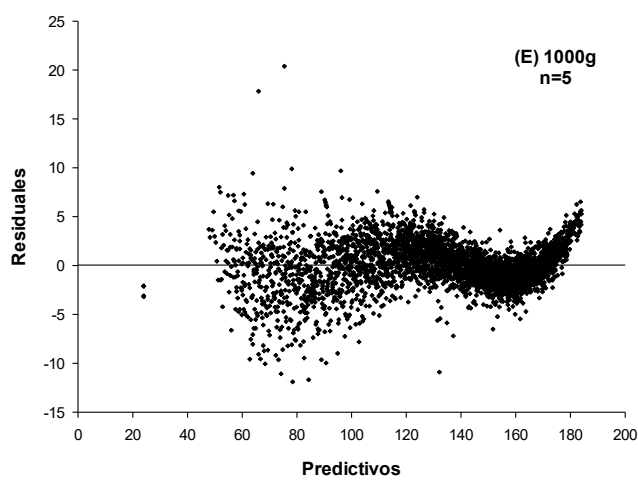
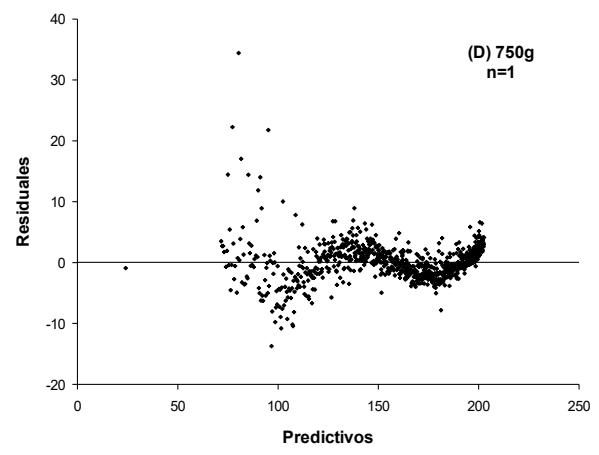
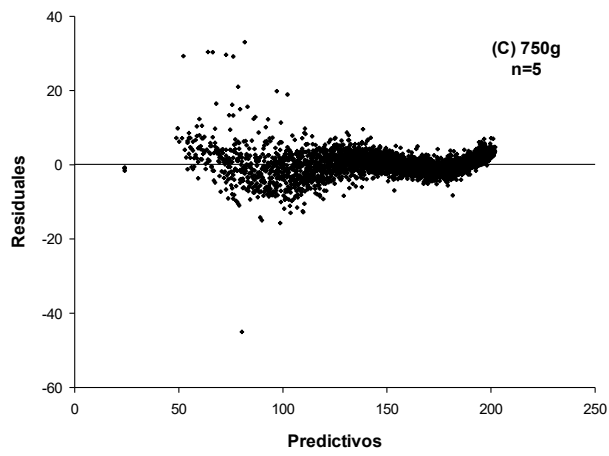
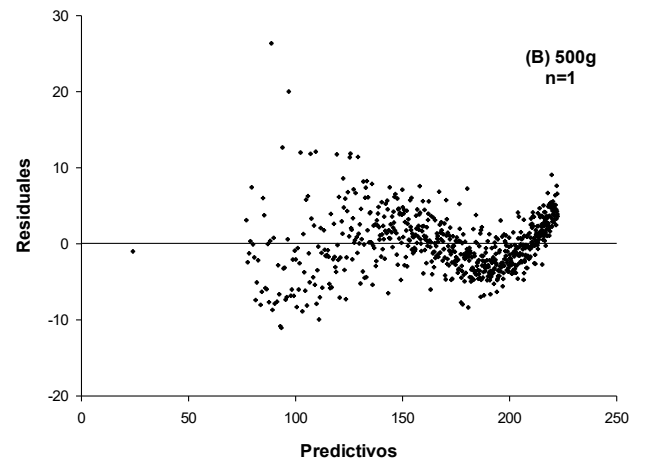
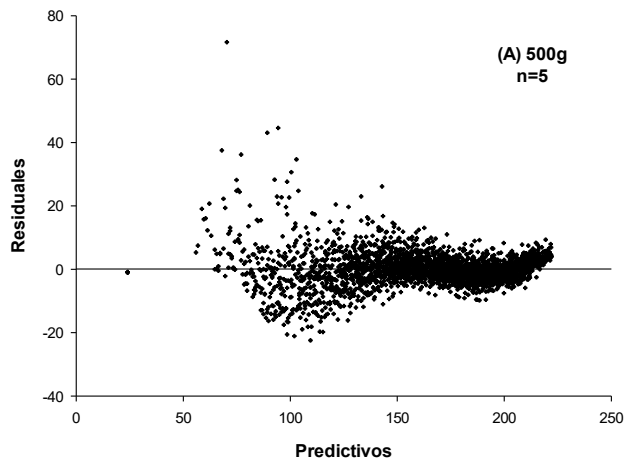
Anexo 2. Análisis de Residuos, modelo de Midilli.



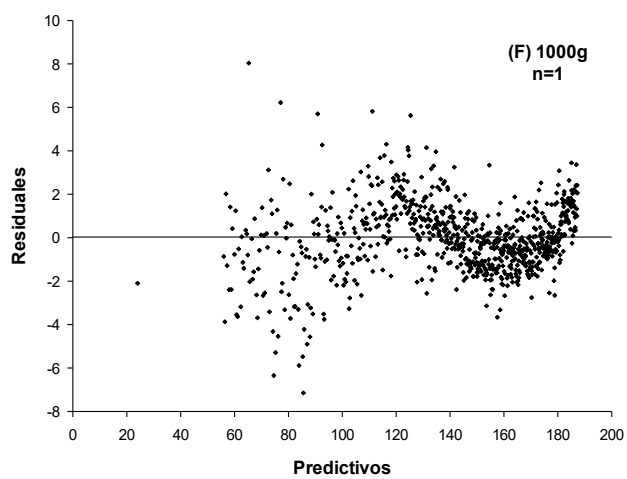
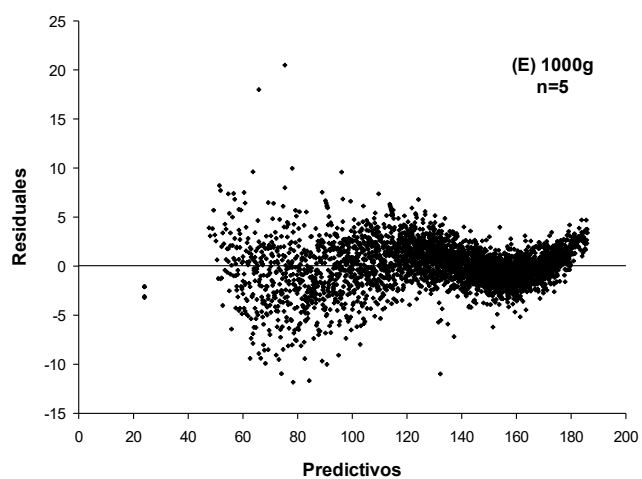
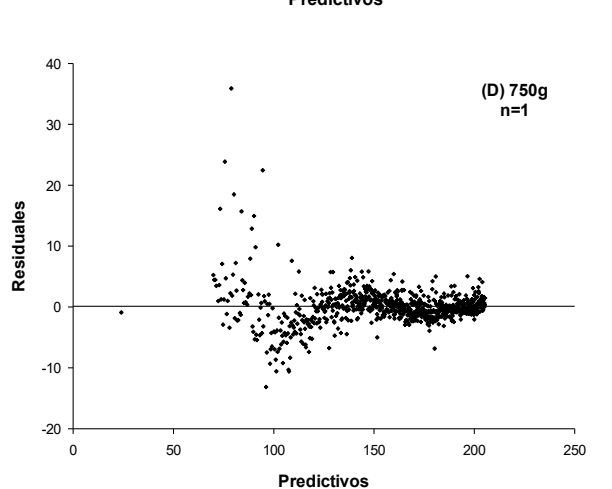
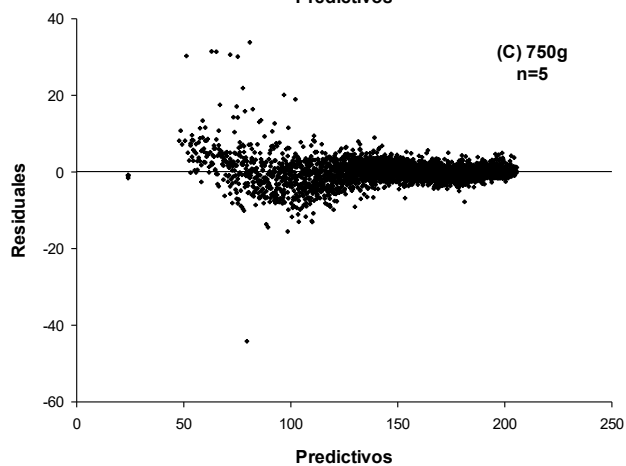
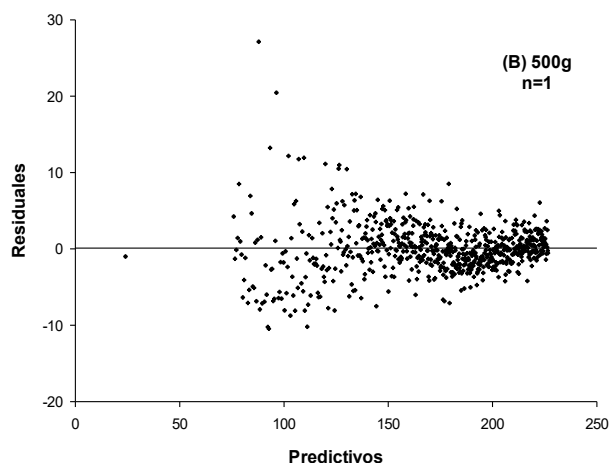
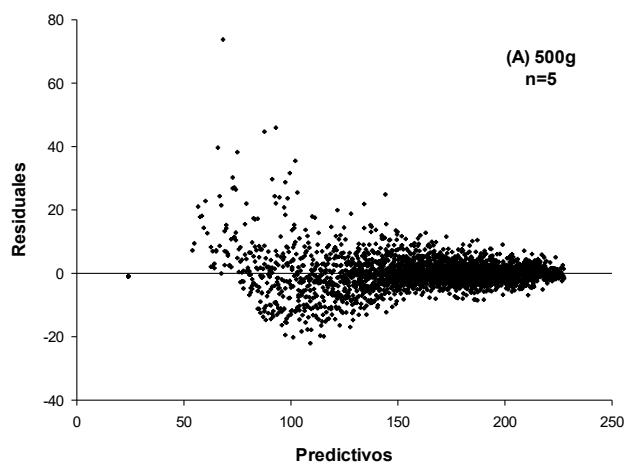
Anexo 3. Cinética de secado del modelo de Page para las temperaturas de estudio.



Anexo 4. Análisis de Residuos, modelo de Page.



Anexo 5. Análisis de residuos- Modelo Vargas-Elías. (Tercera repetición)



Anexo 6. Análisis de residuos- Modelo Abarca. (Tercera repetición)

Anexo 7. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.-
Ajuste cuadrático.

		500g	750g	1000g
R1	Coefficiente de regresión			
	a	0,4360	0,7600	4,7267
	b	0,0039	-0,0298	-0,2305
	y ₀	-0,6790	-1,3672	-21,5264
	p-valor			
	a	0,2011	0,2790	0,0304
	b	0,8362	0,4394	0,0379
	y ₀	0,4756	0,5793	0,0297
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9981	0,9765	0,9921
	R ²	0,9962	0,9536	0,9843
	Adj. R ²	0,9924	0,9072	0,9686
	SE	0,0639	0,1479	0,1486
	t-test			
	a	1,8787	1,4715	5,6051
	b	0,2349	-0,9574	-4,9909
y ₀	-0,8709	-0,6558	-5,6773	
R2	Coefficiente de regresión			
	a	1,0015	0,7467	-1,0919
	b	-0,0247	-0,0077	0,0847
	y ₀	-1,9999	-3,3901	4,0270
	p-valor			
	a	0,4371	0,6870	0,7090
	b	0,7889	0,9421	0,5953
	y ₀	0,5993	0,6619	0,7642
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9865	0,9800	0,9280
	R ²	0,9732	0,9603	0,8612
	Adj. R ²	0,9465	0,9207	0,7224
	SE	0,2274	0,2530	0,3905
	t-test			
	a	0,9632	0,4660	-0,4301
	b	-0,3054	-0,0820	0,6258
y ₀	-0,6185	-0,5081	0,34323	
			+	
R3	Coefficiente de regresión			
	a	-0,4660	1,9136	-0,0361
	b	0,0396	-0,0567	0,0133
	y ₀	5,2610	-11,7572	0,0965

Anexo 7. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.-
Ajuste cuadrático. (continuación)

		p-valor		
R3	a	0,8369	0,2176	0,9437
	b	0,6864	0,2765	0,4367
	y ₀	0,6935	0,2574	0,9814
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9463	0,9764	0,9973
	R ²	0,8955	0,9534	0,9945
	Adj. R ²	0,7910	0,9069	0,9891
	SE	0,3813	0,1892	0,0815
	t-test			
	a	-0,2338	1,7768	-0,0798
	b	0,4671	-1,4822	0,9640
	y ₀	0,4554	-1,5682	0,0264

Anexo 8. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.-
Ajuste exponencial.

		500g	750g	1000g
		Coefficiente de regresión		
R1	a	0,6505	1,2884	0,2614
	b	0,1917	0,0930	0,2220
	p-valor			
	a	0,0030	0,0130	0,3918
	b	0,0010	0,0080	0,1156
	Parámetros estadísticos			
	R	0,9917	0,9548	0,8255
	R ²	0,9834	0,9117	0,6815
	Adj. R ²	0,9779	0,8823	0,5753
	SE	0,1094	0,1666	0,5463
	t-test			
	a	8,9425	6,3120	0,9980
b	12,9763	5,3136	2,1962	
		Coefficiente de regresión		
R2	a	0,8988	0,2499	0,0327
	b	0,2011	0,2592	0,3864
	p-valor			
	a	0,151	0,0732	0,4184
b	0,0052	0,0072	0,0325	

Anexo 8. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos-
Ajuste exponencial. (continuación)

		Parámetros estadísticos		
R2	R	0,9780	0,9732	0,9328
	R ²	0,9565	0,9470	0,8700
	Adj. R ²	0,9420	0,9294	0,8267
	SE	0,2366	0,2387	0,3085
		t-test		
	a	5,0371	2,7094	0,9359
	b	7,3665	6,5654	3,7779
		Coefficiente de regresión		
	a	1,8896	1,1913	0,3699
	b	0,0878	0,0817	0,1286
		p-valor		
	a	0,0199	0,0337	0,0035
	b	0,0160	0,0211	0,0003
R3	Parámetros estadísticos			
	R	0,9452	0,9357	0,9959
	R ²	0,8933	0,8756	0,9917
	Adj. R ²	0,8578	0,8341	0,9890
	SE	0,3146	0,2525	0,0819
		t-test		
	a	4,5496	3,7250	8,3987
	b	4,9242	4,4503	18,4791