

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**EFFECTO DEL TIPO DE BENEFICIADO EN LA TORREFACCIÓN DE LOS  
GRANOS DE CAFÉ (*Coffea arabica*).**

Trabajo Final de Graduación presentado a la Facultad de Ingeniería como requisito para  
optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Sergio Ignacio Barrantes Montoya

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2022

## **DEDICATORIA**

A mis abuelos Carlos y Azálea.

A mis padres Sergio y Azálea.

A mi hermana Azálea.

## **AGRADECIMIENTOS**

A el profesor Guillermo Vargas que además de cumplir con su labor como Director de tesis y profesor de excelente forma, ha sido un compañero y amigo que me apoyo durante este proceso.

A la Universidad de Costa Rica, a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas y a sus profesores por la educación que me dieron que hizo posible este trabajo.

A las empresas Lorena Coffee Tour, Aromas del Alto y Café Terciopelo, las cuales brindaron la materia prima para este proyecto.

A Andrea Artavia por estar ahí para mí en este último trayecto de mi carrera Universitaria siendo mi motivadora.

A mi familia y amigos, por ayudarme y estar ahí para mí cuando los necesité.

Agradecimientos especiales a mis mascotas que aportaron esa alegría particular que dan los animales en la vida de las personas.

## HOJA DE APROBACIÓN

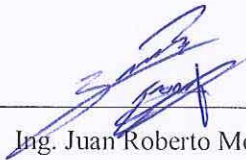
Este trabajo fue sometido a revisión a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica como requisito para optar por el grado de Licenciatura de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



Ing. Guillermo Vargas Elías, D.Sc.  
Director



Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D.  
Presidente del Tribunal examinador



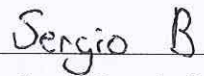
Ing. Juan Roberto Mora Chaves, M.Sc.  
Lector



Ing. Matías A. Chaves Herrera, M.Sc.  
Lector del Tribunal examinador



Ing. Mariamela Alfaro Santamaría, Ph.D.  
Lectora



Ing. Sergio Ignacio Barrantes Montoya,  
Bach.  
Sustentante

## ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>HOJA DE APROBACIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivo general</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>2</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Generalidades del fruto del café</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2 Tipos de beneficiado</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2.1 Beneficiado seco</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2.2 Beneficiado húmedo</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2.3 Beneficiado semi-seco</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3 Secado del Café</b> .....	<b>6</b>
<b>2.3.1 Modelos matemáticos para el secado en capa delgada</b> .....	<b>6</b>
<b>2.3.2 Secado solar directo</b> .....	<b>8</b>
<b>2.4 Torrefacción</b> .....	<b>9</b>

2.4.1 Grado de tueste.....	10
2.4.2 Perfil de tueste y el calentamiento de los granos .....	12
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Metodología del secado .....</b>	<b>14</b>
3.1.1 Zona de estudio.....	14
3.1.2 Tipos de beneficiado y características del producto a utilizar .....	14
3.1.3 Secado de granos y evaluación de la cinética del secado.....	15
3.1.4 Análisis de Datos .....	15
<b>3.2 Metodología de la torrefacción .....</b>	<b>19</b>
3.2.1 Torrefacción del producto .....	19
3.2.2 Tipos de beneficiado y características del producto a utilizar .....	19
3.2.3 Tueste de granos y evaluación de la cinética de la torrefacción.....	19
3.2.4 Análisis de Datos .....	20
<b>3.3 Metodología características físicas .....</b>	<b>21</b>
3.3.1 Control de masa.....	21
3.3.2 Control de densidad aparente .....	22
3.3.3 Análisis por regresión lineal del cambio relativo de la masa y la densidad aparente .....	24
3.3.4 Evaluación del color del café tostado.....	25
3.3.5 Contenido de humedad .....	25

<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Secado del café natural miel y lavado .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.1 Café lavado .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.2 Café miel .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1.3 Café natural.....</b>	<b>34</b>
<b>Comparación entre sistemas de beneficiado.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Torrefacción del café natural, miel y lavado .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.1 Tiempo de Tueste .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.2 Perfil de tueste de café lavado .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.3 Perfil de tueste de café miel .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.4 Perfil de tueste de café natural.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.5 Análisis de las constantes de las ecuaciones para el perfil de tueste:.....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.6 El calentamiento de los granos durante el tueste: .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2.7 Análisis de Residuos del calentamiento de los granos.....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.8 Resumen del análisis estadístico del calentamiento de los granos .....</b>	<b>64</b>
<b>4.3 Experimento características físicas .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.1 Secado en laboratorio (CIGRAS) .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.2 Secado en finca (Terciopelo) .....</b>	<b>74</b>
<b>4.3.3 Torrefacción de café (Aromas del alto) .....</b>	<b>77</b>
<b>5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>86</b>

**6 RECOMENDACIONES..... 89**

**7 BIBLIOGRAFÍA..... 90**



## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Modelos matemáticos utilizados para secado de capa fina en productos agrícolas. ....	8
<b>Cuadro 2.</b> Modelos para el Perfil de tueste .....	12
<b>Cuadro 3.</b> Modelos para el calentamiento del grano.....	13
<b>Cuadro 4.</b> Análisis estadístico del ajuste en secado de café lavado en dos lugares. ....	28
<b>Cuadro 5.</b> Análisis de las constantes de los modelos de page y page modificado para café lavado. .....	30
<b>Cuadro 6.</b> Análisis estadístico del ajuste en secado de café miel en dos lugares. ....	32
<b>Cuadro 7.</b> Análisis de las constantes de los modelos de page y page modificado para café miel.	33
<b>Cuadro 8.</b> Análisis estadístico del ajuste en secado de café natural en dos lugares. ....	35
<b>Cuadro 9.</b> Análisis de las constantes de los modelos de Page y Page modificado para café natural. .....	36
<b>Cuadro 10.</b> Resumen de los coeficientes de la ecuación de Page-modificada para el secado de café en tres niveles de beneficiado en laboratorio y en finca. ....	39
<b>Cuadro 11.</b> Duración del proceso de torrefacción (min).....	44
<b>Cuadro 12.</b> Análisis estadístico de las ecuaciones para el perfil de tueste en la torrefacción de café provenientes de beneficiado lavado. ....	45
<b>Cuadro 13.</b> Análisis estadístico de las ecuaciones para el perfil de tueste en la torrefacción de café provenientes de beneficiado miel. ....	49

<b>Cuadro 14.</b> Análisis estadístico de las ecuaciones para el perfil de tueste en la torrefacción de café provenientes de beneficiado natural.....	52
<b>Cuadro 15.</b> Resumen de los coeficientes de la ecuación 17 para la torrefacción de café en un tostador convencional. ....	56
<b>Cuadro 16.</b> Resumen de los coeficientes de la ecuación 18 para la torrefacción de café en un tostador convencional. ....	57
<b>Cuadro 17.</b> Resumen de los coeficientes de la ecuación 19 para la torrefacción de café en un tostador convencional. ....	58
<b>Cuadro 18.</b> Análisis estadístico del ajuste del perfil de tueste en la torrefacción de café provenientes de tres tipos de beneficiado.....	61
<b>Cuadro 19.</b> Coeficientes del ajuste de la ecuación 20 para calentamiento de los granos en la torrefacción de café provenientes de tres tipos de beneficiado. ....	65
<b>Cuadro 20.</b> . Coeficientes del ajuste de la ecuación 21 para calentamiento de los granos en la torrefacción de café provenientes de tres tipos de beneficiado. ....	65
<b>Cuadro 21.</b> Coeficientes del ajuste del calentamiento de los granos en la torrefacción de café provenientes de tres tipos de beneficiado.....	66
<b>Cuadro 22.</b> Modelos seleccionados para describir los procesos de secado y torrefacción. ....	71
<b>Cuadro 23.</b> Contenidos de humedad teóricos para el café secado solar laboratorio. ....	72
<b>Cuadro 24.</b> Características físicas del café antes del secado y después del secado solar en laboratorio. ....	73
<b>Cuadro 25.</b> Contenidos de humedad teóricos para el café secado solar en finca.....	75

<b>Cuadro 26.</b> Contenido de humedad de café lavado, miel y natural antes y después de la torrefacción. ....	77
<b>Cuadro 27.</b> Características físicas del café en el tueste a tres temperaturas. ....	78
<b>Cuadro 28.</b> Resultados estadísticos y coeficientes de la ecuación lineal de cambio relativo de masa en el tueste de café natural, miel y lavado en función del tiempo.....	81
<b>Cuadro 29.</b> Resultados estadísticos y coeficientes de la ecuación lineal de cambio relativo de masa en el tueste de café natural, miel y lavado en función de la temperatura de tueste. ....	82
<b>Cuadro 30.</b> Resultados estadísticos y coeficientes de la ecuación lineal de cambio relativo de densidad aparente en el tueste en función de la temperatura de tueste. ....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Sección transversal del fruto de café .....	3
<b>Figura 2.</b> Muestras de las mallas utilizadas en el secado de café natural en finca de la empresa familiar café Terciopelo .....	15
<b>Figura 3.</b> Estación de investigación de los procesos de torrefacción de granos.....	20
<b>Figura 4.</b> Equipo utilizado para la medición de la densidad aparente.....	22
<b>Figura 5.</b> Escala de color de los granos de café tostado.....	25
<b>Figura 6.</b> Razón de humedad en el Secado de café por proceso en finca (a) y en laboratorio (b).	27
<b>Figura 7.</b> Análisis de los residuos de café lavado secado en finca para la ecuación Page modificada y Henderson & Pabis modificada (a) y en laboratorio para la ecuación Page modificada y Verma & Bucking (b). .....	29
<b>Figura 8.</b> Ajuste del modelo de Page modificado en el secado del café lavado en finca (a) y en laboratorio (b). .....	31
<b>Figura 9.</b> Ajuste del modelo de Page modificado para el secado del café miel en finca a) y en laboratorio b).....	34
<b>Figura 10.</b> Ajuste del modelo de Page modificado en el secado del café natural en finca. ....	37
<b>Figura 11.</b> Ajuste modelo de Page modificado para el secado del café natural en laboratorio.....	38
<b>Figura 12.</b> Cinéticas de secado para el café <i>Catuaí</i> procesado en laboratorio. ....	41
<b>Figura 13.</b> Cinéticas de secado para el café <i>Catuaí</i> procesado en la finca.....	43

<b>Figura 14.</b> Análisis de los residuos de café lavado para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de café en tostador convencional. ....	46
<b>Figura 15.</b> Ajustes para el perfil de tueste del café lavado en tostador convencional. ....	48
<b>Figura 16.</b> Análisis de los residuos de café miel para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de café en tostador convencional. ....	50
<b>Figura 17.</b> Ajustes para el perfil de tueste del café miel en tostador convencional. ....	51
<b>Figura 18.</b> Análisis de los residuos de café natural para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de café en tostador convencional. ....	53
<b>Figura 19.</b> Ajustes para el perfil de tueste del café natural en tostador convencional. ....	54
<b>Figura 20.</b> Perfil de tueste descrito por la ecuación 19 propuesta para la torrefacción en tostador convencional de los granos de café procesado en tres métodos. ....	59
<b>Figura 21.</b> Ajuste del calentamiento de los granos para el café: (a) lavado (b) miel y (c) natural. ....	62
<b>Figura 22.</b> Análisis de los residuos para el calentamiento del café: (a) lavado(b) miel y (c) natural. ....	63
<b>Figura 23.</b> Ajuste del calentamiento de los granos de tres tipos de beneficiado para la ecuación 21 ....	68
<b>Figura 24.</b> Ajuste del perfil de tueste y del calentamiento de los granos provenientes de tres tipos de beneficiado para la ecuación 19 y 21. ....	69
<b>Figura 25:</b> Cambio porcentual de la pérdida de masa de los granos de café según el tiempo de tueste. ....	80

<b>Figura 26:</b> Cambio porcentual de la pérdida de masa de los granos de café según la temperatura final de tueste. ....	82
<b>Figura 27.</b> Cambio relativo de la densidad aparente (%) de los granos de café según la temperatura final de tueste. ....	83
<b>Figura 28.</b> Predicción del volumen del café tostado dependiendo de la temperatura del proceso.	84

## **RESUMEN**

El presente trabajo final de graduación se centró en el análisis de la cinética de secado solar y torrefacción de café lavado, miel y natural, así como de la medición de parámetros físicos del café antes y después de los procesos de secado y torrefacción.

Se realizaron las labores de beneficiado lavado, semi-seco y húmedo para la obtención del grano a utilizar en los experimentos en condiciones de laboratorio y finca, se registró la pérdida de masa del café para el cálculo de la humedad del grano durante el secado y se determinó los coeficientes del modelo que describieron mejor los resultados, se concluyó que el modelo de Page Modificado describió de forma adecuada con un coeficiente de determinación ajustado mayor que 0,983 y los parámetros del modelo fueron diferentes para describir el secado solar en cada tipo de beneficiado.

Se realizó la torrefacción del café lavado, miel y natural obtenido del secado solar, se llevó un control de la temperatura interna del aire del tostador y la temperatura del grano durante la torrefacción, se ajustaron los modelos que describen tanto la temperatura interna del aire del tostador y la temperatura de grano, encontrando que los ajustes obtenidos son particulares para cada tipo de grano utilizado en el experimento. Se encontró que el modelo propuesto obtuvo el mejor ajuste para el perfil de tueste con un coeficiente de determinación de 0,978.

En el secado y la torrefacción se registró las propiedades físicas de contenido de humedad, densidad aparente y masa, se obtuvo para el caso de los granos con tres niveles de tueste ecuaciones lineales que describen las pérdidas relativas de masa y densidad en función de la temperatura del perfil de tueste; encontrando que los ajustes de los parámetros de la ecuación son característicos para cada tipo de grano. Además, se propuso una ecuación compuesta para predecir el volumen aparente final de la masa de grano al final del tueste en función de la temperatura final de tueste.

## 1. INTRODUCCIÓN

El café en Costa Rica ha sido una actividad económica de gran importancia en el desarrollo del país, siendo una base fundamental del desarrollo económico, social y cultural. El café que se cultiva es de la especie *Coffea arabica*, principalmente de las variedades Caturra y Catuaí (ICAFE, 2016).

En el sector cafetalero los micro beneficios de café en Costa Rica han comenzado a sobresalir con la producción de cafés de calidad, utilizando el sistema poscosecha de beneficiado en seco, que no es el característico para este tipo de producto como el beneficiado en húmedo (Gómez, 2019).

El mercado de cafés de especiales se caracteriza por la calidad de los granos desde un enfoque organoléptico, porque a través de la puntuación obtenida en la evaluación sensorial se define el precio de comercialización, el éxito de la evaluación sensorial es de principal importancia y depende de la calidad de café y de los procesos poscosecha (Deribe, 2019). En Costa Rica, aunque hay experiencia en la producción, aún falta establecer la relación entre las condiciones de secado y su efecto en el perfil de tueste de los granos.

El estudio del secado y de la torrefacción podría generar información valiosa para el mejoramiento de la calidad del café, se contó como antecedentes a esta investigación con las investigaciones realizadas en el tueste del café en el cual se desarrolló el efecto que tiene en la cinética del secado la masa usada en el tostador y el grado de tueste realizado por Abarca (2017), también en la investigación realizada por Vargas (2014) donde se estudió el efecto de la expansión volumétrica y de la pérdida de masa en el proceso de torrefacción (Vargas et al., 2016).

La razón por la cual es de importancia el estudio del efecto que tiene el tipo de beneficiado en el proceso de secado y torrefacción son los cambios que pueden generar en el proceso



causados por la posible afectación en los cambios físicos y químicos en el grano de café verde que ocurren según explica Clarke & Macrae (1987) durante la transferencia de calor, por la temperatura y tiempo de exposición, pérdida de materia seca en forma principalmente de transformación en dióxido de carbono y agua y los productos volátiles de la pirolisis, por lo cual la importancia del estudio del tipo de beneficiado y su efecto en el secado y la torrefacción; el cual es un estudio que no se cuenta en Costa Rica.

La investigación tiene como objetivo la caracterización del resultado de secar y tostar granos provenientes de tres tipos de beneficiado utilizados en Costa Rica y de los cambios que estos pueden generar en el perfil de tueste y la curva de calentamiento del tostador.

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto del tipo de beneficiado de los frutos en la torrefacción del café (*Coffea arabica*).

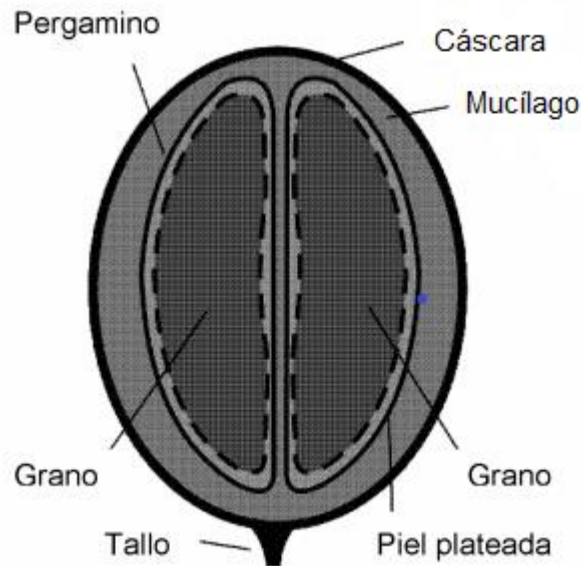
### **1.2 Objetivos específicos**

1. Describir el secado por el modelo de capa delgada para la determinación de la rapidez del secado solar directo de café por la vía seca, semi seca y húmeda en condiciones de finca.
2. Determinar la cinética de la temperatura durante el tueste de los granos beneficiados tipo natural, miel y lavado.
3. Analizar el efecto del tipo de beneficiado en las propiedades físicas de los granos secos y los tostados.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades del fruto del café

El fruto de café generalmente tiene dos granos, cada uno de ellos se encuentra envuelto en una piel plateada, por encima está cubierta por el pergamino, rodeado por el mucílago y externamente por la cáscara, como se muestra en la Figura 1 (Kuit et al., 2004)



**Figura 1:** Sección transversal del fruto de café.

**Fuente:** (International Coffee Organization, 2009)

El contenido de humedad del fruto al momento de cosechar es de aproximadamente 65 % b.h. y en su procesamiento agroindustrial debe seguir una secuencia de procesos como el despulpado, el desmucilaginado, el lavado y el escurrido. El café en pergamino resultante tiene un contenido de humedad cercana a un 55 % b.h., el secado debe iniciarse, dentro de un lapso de 24 horas posterior a su recolección hasta alcanzar 12 % b.h. (Gómez, 2019).

## **2.2 Tipos de beneficiado**

Las tres formas de tratamiento pos cosecha del café son el procesamiento seco (natural), el húmedo (lavado) y el semi-seco, considerado como proceso intermedio conocido como miel (*honey* o *pulped natural*) (Wintgens, 2004).

### **2.2.1 Beneficiado seco**

El beneficiado seco consiste en secar la fruta del café inmediatamente después de la cosecha; a este proceso también se le conoce como secado al sol. Es realizado generalmente en extensiones de terreno en proporción de 19,4 a 13,2 kg/m<sup>2</sup>, con un espesor de capa de 30 a 40 mm, debe revolverse el grano entre 8 a 10 veces al día, se realiza usualmente sobre piso de concreto y utilizando la radiación solar como fuente de calor para el secado y el proceso puede durar de 3 a 4 semanas hasta obtener un 12 %b.h (Clarke & Macrae, 1987).

Uno de los principales problemas del secado para obtener un café natural es la poca uniformidad del contenido de humedad inicial, lo cual es controlado por medio de la separación por flotación de la fruta del café obteniendo dos categorías: la fruta que flota y la que se hunde, de la utilización de esta separación ha beneficiado el tiempo de secado, trabajo, espacio y una uniformidad del contenido de humedad final del café para el caso del secado solar directo. (Wintgens, 2004)

El proceso de obtención de café natural es la forma más fácil de transformar el fruto del café en grano verde, pero es el proceso en el que es más difícil producir café de alta calidad (Poltronieri & Rossi, 2016).

### **2.2.2 Beneficiado húmedo**

El beneficiado húmedo consiste en la remoción de la pulpa y el mucílago del fruto maduro del café. Este tipo de beneficiado comparte los procedimientos de limpieza y separación del beneficiado seco, su diferencia reside en el despulpado y el desmucilaginado antes del

secado el cual requiere el uso de agua para la efectividad de la maquinaria necesaria para estas labores (Wintgens, 2004).

El secado utilizado puede ser tanto al sol de forma natural o de forma artificial (Clarke & Macrae, 1987; Poltronieri & Rossi, 2016). El secado al sol de café lavado tiene una duración de 7 a 8 días dependiendo de las condiciones climatológicas de la región (Fonseca et al., 2003).

El secado llega debe llegar a un 12 % b.h. para el almacenamiento seguro, este contenido de humedad en el grano puede ser determinado con la isoterma de equilibrio higroscópico desarrollada por Jiménez & Valverde (1999), la cual utiliza como variable independiente la humedad relativa del aire, que debido a las condiciones climáticas del país es la variable que más influye para su cálculo. En Costa Rica no se registra referencia de la relación de equilibrio para los cafés tipo miel y natural.

### **2.2.3 Beneficiado semi-seco**

Consiste en una separación parcial del mucílago y un pre secado como procesos adicionales al beneficiado seco, obteniendo: granos maduros, pergamino producto del despulpado y la pulpa. Debido a que las cerezas maduras son despulpadas al mismo tiempo que sucede la separación, ocasiona que el mucílago no sea removido del pergamino y es secado al sol con algo o todo el mucílago del fruto producto el cual tiene sus propias cualidades organolépticas (Wintgens, 2004).

A este proceso también se le conoce como miel o *honey*, según el porcentaje de mucílago que se conserve en el grano y el uso de sombra el tiempo de secado puede variar de 6 días a 30 días, el secado dura más entre más mucílago se conserve y si se utiliza sombra (Poltronieri & Rossi, 2016).

## **2.3 Secado del café**

El proceso de secado en los sólidos consta de dos fenómenos que ocurren simultáneamente, la transferencia de calor que permite la evaporación del líquido y por otra parte la transferencia de masa en la difusión del líquido dentro del sólido y del vapor de la superficie al ambiente. (Suárez et al., 2016)

Existe una gran diversidad de tecnologías de secado en el mercado debido a la variabilidad de las características tanto físicas y químicas de los materiales a procesar, así como la variación de dichas propiedades durante el secado dificultan la formulación de un modelo unificado para estudiar el comportamiento del secado. (Villalba, 2015)

Durante los procesos de secado del café, uno de los principales cambios que ocurren es la contracción del producto, debido a que la pérdida de agua causa daños a la estructura celular del producto, ocasionando un cambio de forma y una disminución de sus dimensiones. Mayor & Sereno (2004) y Ratti (1994) concluyeron que la contracción volumétrica de los productos de origen vegetal durante el secado no era exclusivamente debida al contenido de humedad, sino que estos dependían de las condiciones ambientales del proceso, de la geometría del producto y de la constitución química del producto.

### **2.3.1 Modelos matemáticos para el secado en capa delgada**

Existen numerosos modelos matemáticos propuestos los cuales describen la cinética del secado de los productos agrícolas a través de la razón de humedad del producto agrícola en función del tiempo. La razón de la humedad es calculable de forma experimental mediante el conocimiento de la humedad de equilibrio del grano, su humedad inicial y su humedad en un momento. (Chen et al., 1997)

Hay selecciones de modelos de secado de capa delgada los cuales han sido utilizados para explicar el secado de granos en secadores solares por Collazo et al. (2018); y también

Ertekin & Firat (2015) realizaron una revisión de más de 100 modelos de capa delgada diferentes para el secado de productos agrícolas.

En el secado de café los modelos más frecuentes utilizados son los de Newton, Page, Henderson y Pabis, Midilli habiendo muchos otros modelos utilizados como se observa en los trabajos realizados por Phitakwinai et al. (2019), Alves et al. (2019), Gómez (2019) y Jordan et al. (2020).

Existen modelos teóricos, semi-teóricos y empíricos, pero los modelos semi-teóricos y empíricos son los que son los más aplicados por los investigadores (Inyang, Oboh, & Etuk, 2018). Los modelos semi-teóricos son aquellos que están basados en la teoría del enfriamiento de Newton o en la segunda ley de Fick, los modelos empíricos constituyen una relación directa entre el promedio de contenido de humedad y el tiempo de secado, ignorando los fundamentos del proceso de secado y por consiguiente sus parámetros no tienen ningún significado físico (Ertekin & Firat, 2015; Erbay & Icier, 2010).

Para los modelos semi-teóricos o semi-empíricos cada uno tiene sus propias variables dimensionales y constantes de secado. (Inyang et al., 2018) La constante de secado conocida como  $k$  en los modelos semi empíricos en unidades de la inversa de horas ( $h^{-1}$ ) la cual está en función del contenido de humedad del material, tipo de producto, humedad del aire, temperatura del aire y velocidad del aire (Collazo et al., 2018). En los trabajos realizados en secado de café las constantes de los modelos pueden ser asociadas con ciertos parámetros de los experimentos, las constantes  $k$  y  $n$  de modelos de Midilli han sido asociados con la elaboración de ecuaciones en función de la temperatura y la humedad relativa del aire de secado (Phitakwinai et al., 2019).

El secado de capa delgada en granos se ha analizado a través de ecuaciones semi empíricas aplicadas de forma general a productos agrícolas con excepción de la ecuación de Hii, Law & Cloke que es una ecuación empírica (Ertekin & Firat, 2015), donde se relaciona la razón

de humedad con el tiempo del proceso. Se utilizaron los modelos matemáticos del Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Modelos matemáticos utilizados para secado de capa fina en productos agrícolas.

Referencia	Nombre ecuación	Ecuación	Número
(Page,1949)	Page	$RX(t) = \exp(-k * t^n)$	1
(Midilli, Kucuk & Yapar, 2002)	Midilli, Kucuk & Yapar	$RX(t) = a * \exp(-k * t^n) + b * t$	2
(Henderson & Pabis, 1961)	Henderson & Pabis	$RX(t) = a * \exp(-k * t)$	3
(Ertckin & Yaldix, 2004)	Henderson y Pabis modificada	$RX(t) = a * \exp(-k * t) + b * \exp(-g * t) + c * \exp(-h * t)$	4
(Verma & Bucking, 1985)	Verma & Bucking	$RX(t) = a * \exp(-k * t) + (1 - a) * \exp(-g * t)$	5
(Hii, Law & Cloke, 2009)	Hii, Law & Cloke	$RX(t) = a * \exp(-k * t^n) + c * \exp(-g * t^n)$	6
(Bruce, 1985)	Newton	$RX(t) = \exp(-k * t)$	7
(Togrul & Pehlivan, 2002)	Logarítmica	$RX(t) = a * \exp(-k * t) + c$	8
(Henderson, 1974)	Dos términos	$RX(t) = a * \exp(-k * t) + b * \exp(-g * t)$	9
(Barrozo, 1995)	Page modificada	$RX(t) = \exp(-(k * t)^n)$	10

Donde:  $k, a, b, c, g, h$  y  $n$  son parámetros o constantes de cada modelo.

**Fuente:**(Sánchez, 2018)

### 2.3.2 Secado solar directo

El secado tradicional al aire libre es un tipo de secado solar directo y es conocido como secado al sol, en el país este se realiza dispersando los productos agrícolas en una capa delgada sobre el suelo de un campo abierto y exponiéndolos directamente al sol (Esper & Muhlbauer, 1998).

En este tipo de secado se han registrado pérdidas de 30 a 40% de la producción, debido a las condiciones variables del proceso y a la inexistencia de un control directo sobre las mismas (Esper & Muhlbauer, 1998). También pueden ser realizado en camas montadas en mesas lo cual ayuda a la aireación del grano (Wintgens, 2004).

Para el secado solar directo al aire libre no se cuenta con valores de la constante de secado ( $k$ ) previos que describen el secado al sol con exposición directa, en cambio sí se cuentan con los valores  $k$  para el secado mecánico (Gómez, 2019).

Para el secado solar se recomienda que se utilice una capa delgada de entre 30 mm a 40 mm para café de un proceso seco (Clarke & Macrae, 1987); para café de un proceso semi-seco nunca debe pasar de 2,5 cm de espesor (Wintgens, 2004). El término capa delgada ha sido utilizado a un solo grano libremente suspendido en el aire o una capa compuesta de un solo grano de espesor, también ha sido utilizada para múltiples capas de varios granos de espesor mientras se pueda considerar que la temperatura y la humedad relativa del aire de secado están en el mismo estado termodinámico en todo momento durante el secado. (Ertekin & Firat, 2015)

Al final del proceso de secado el café cuenta con un 12% de contenido de humedad base húmeda promedio, en dicha condición es almacenado. El proceso de preparación consiste en el pelado del grano (desprendimiento del pergamino), pasa por procesos de limpieza de impurezas y clasificación por tamaño, densidad y color, para finalmente ser empacado para exportación o para iniciar el proceso de torrefacción (ICAFFE, 2016).

## **2.4 Torrefacción**

La torrefacción es un proceso de transferencia de calor hacia los granos de café, su factor clave es el suministro controlado de la temperatura durante el proceso y la finalización es precedida por la liberación de los aromas y la coloración homogénea de los granos (Illy & Viani, 2005).

El proceso de torrefacción puede ser dividido en tres etapas: la primera etapa es el secado donde ocurre la pérdida de masa debido a la evaporación de agua y liberación de compuestos volátiles del grano de café, la segunda etapa es la torrefacción donde ocurren reacciones exotérmicas de pirolisis, esto ocasiona cambios en la composición química de los granos debido a la liberación del gas carbónico y la tercera etapa es el enfriamiento donde se disminuye la temperatura del grano por medio de la aplicación de aire a temperatura ambiente para evitar la carbonización de los granos (Illy & Viani, 2005).



En la torrefacción la rapidez en que aumenta la temperatura interna durante el tueste es una característica tanto del equipo como de la materia prima de mucha importancia debido a que una diferencia de 5 °C en el interior del tostador genera cambios significativos en las propiedades físicas con una tasa de calentamiento uniforme hasta el final del proceso (Porrás et al., 2019).

#### **2.4.1 Grado de tueste**

El proceso de torrefacción genera una diferenciación en los granos del café debido a lo que se conoce como el grado de tueste, el cual se determina por medio de la coloración obtenida del grano durante el proceso. El grado de tueste está relacionado al desarrollo de sabores característicos, a una pérdida de masa seca y a cambios químicos en los componentes específicos. siendo clasificados de forma simple en claro, medio u oscuro. Se clasifican de forma simple en claro, medio u oscuro, clasificación que sirve para identificar las características de sabor de los extractos que se elaboran posteriormente a partir del café tostado, en los que la mezcla de grados de tueste, la velocidad de tueste, están asociados a café de una calidad superior (Clarke & Macrae, 1987).

La medición de los grados de tueste se realiza por medio de una evaluación del color obtenido al final de la torrefacción, se basa en la experiencia del encargado del tostado, el cual por medio de una inspección visual del grano procede a realizar una comparación con una escala cualitativa. En la industria del café se realizan muestras cuantitativas por lecturas de reluctancia por medidores adecuados (Clarke & Macrae, 1987), también se han desarrollado indicadores de color como la tabla Agtron para la clasificación de los grados de tueste; en otros estudios como el de Vargas et al. (2016) se determinó que la pérdida de masa es un indicador del color final de los granos.

Vargas (2011) analizó café lavado y determinó la pérdida de masa para los diferentes grados de tueste y logró concluir las pérdidas de masa relativas necesarias para obtener un tueste Medio claro (15,85%), Medio (17,02%), Moderadamente oscuro (18,74%) y Oscuro

(20,58%) además se determinó que una diferencia suficiente para garantizar una diferencia significativa en el grado de tueste es de 0,8%. Abarca (2017) determinó que el valor mínimo de cambio de masa relativa necesaria para que se aprecie físicamente una diferencia de color según la escala Agtron es mayor a un 1% y define la condición de Isonivel (mismo grado de tueste) a los valores de pérdida de masa que se encuentren en un rango de  $\pm 0,50\%$ .

Procesar cafés categorizados como especial más allá de un grado de tueste medio afecta de forma gradual hasta llegar a un deterioro completo de la calidad, a nivel comercial el café de calidad baja se suele procesar hasta un grado de tueste moderadamente oscuro o muy oscuro, esto se hace con la finalidad de ocultar los defectos, bajar la acidez y darle mayor cuerpo, además se generan contenidos altos de acrilamidas (Lantz et al., 2006). Esto coincide con las recomendaciones hechas por Vargas (2011) donde el nivel de tueste en los granos de un café especial debe ser desde medio claro a medio para mantener una buena puntuación en la bebida y la temperatura de los granos debe ser menor que 233 °C, con duración de 9 a 16 minutos.

Vargas (2011), e Illy & Viani, (2005) concluyen que el contenido de humedad decrece exponencialmente durante el tueste y que conforme aumente el nivel de tueste en los granos el contenido de humedad puede llegar a disminuir hasta estabilizarse en 1 % b.h. además el café tostado presenta cambios de coloración entre marrón a negro entre más alto sea el nivel de tueste alcanzado. La resistencia mecánica será baja, se dará un incremento del volumen hasta un 100 % en un tueste oscuro, la densidad disminuye de 550 a 700 kg/m<sup>3</sup> en el café beneficiado hasta un valor entre 300 a 450 kg/m<sup>3</sup> en el café tostado, lo cual está de acuerdo con lo concluido por Clarke & Macrae (1987) que y el aumento en el volumen del producto está en función del grado de torrefacción del producto Clarke & Macrae (1987).

### 2.4.2 Perfil de tueste y el calentamiento de los granos

El perfil de tueste y el calentamiento de los granos han sido estudiados por Vargas (2014) y Abarca (2017) respectivamente para un tostador convencional con flujo de calor a través de las paredes de metal, evaluando el efecto de la temperatura de tueste y la masa de grano, propusieron modelos teóricos y semi-teóricos, por medio de la aplicación de coeficientes de simplificación y regresiones no lineales de las ecuaciones teóricas desarrolladas, encontraron que una variación en la temperatura inicial del proceso y en la masa de grano introducida al tostador provoca un cambio en la duración del proceso de torrefacción.

Schwartzberg (2002, 2013) estudió el comportamiento de la torrefacción y el calentamiento de los granos, pero en tostadores de flujo de aire caliente directo a la cámara de tueste, concluyó que los grados de tueste van aumentando su color oscuro con forme más tiempo dura el tueste, también concluyó que la temperatura de calentamiento de los granos y la del perfil de tueste fueron similares con forme avanzó el proceso.

En el Cuadro 2 se muestran las ecuaciones utilizadas para describir el perfil de tueste del tostador convencional y una ecuación propuesta (ecuación 13) que es una combinación de las ecuaciones 11 y 12.

**Cuadro 2:** Modelos para el Perfil de tueste.

Referencia	Ecuación	Número
Abarca, 2017	$T(t) = a * \exp^{-k*t} + b * t + c$	11
Barrantes et al, 2020	$T(t) = a * \exp^{-k*t^d} + b * t$	12
Propuesta	$T(t) = a * \exp^{-k*t^d} + b * t + c$	13

Donde  $k$ ,  $d$ ,  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros o constantes de cada modelo,  $t$  es tiempo en minutos y  $T$  es la temperatura del aire del tostador en grados Celsius en el momento  $t$

El coeficiente  $k$  y  $b$  de las ecuaciones del Cuadro 2 tienen unidades de  $\text{min}^{-1}$  y  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  respectivamente, Archontoulis & Miguez (2015) identificaron al coeficiente  $k$  de una ecuación exponencial como el valor que determina la pendiente de la curva y se le llama la

constante de velocidad y Pardo & Ruiz (2005) identificaron al coeficiente  $b$  de una ecuación lineal como el cambio medio que se produce en el valor de la función  $F(x)$  por cada unidad de cambio  $x$ , y es conocida también como la pendiente de la recta.

Las ecuaciones 14 y 15 del Cuadro 3, son ecuaciones que describen el calentamiento de los granos.

**Cuadro 3:** Modelos para el calentamiento del grano.

Referencia	Ecuación	Número
(Abarca, 2017)	$T(t) = T_0 + K_0 * t - \left(\frac{a}{b}\right) * (1 - \exp(-b * t))$	14
(Vargas, 2014)	$T(t) = T_a + \frac{S}{B-K} * [\exp(-K * t) - \exp(-B * t)] + (T_0 - T_a) * \exp(-B * t)$	15

Donde  $a, b, S, B, K, T_a$  y  $T_0$  son parametros o constante de cada ecuación,  $t$  es tiempo en minutos y  $T$  es la temperatura del grano en grados Celsius en el momento  $t$

**Fuente:** (Vargas R., 2019)

Las ecuaciones del cuadro 3 tienen bases teóricas, debido a esto los valores  $T_a$  y  $T_0$  son constantes y representan las condiciones iniciales del sistema, respectivamente de temperatura inicial de la pared del tostador y la temperatura ambiente.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Metodología del secado**

##### **3.1.1 Zona de estudio**

Se realizó el experimento en dos lugares, uno a nivel de finca en las instalaciones de café Terciopelo ubicado en San Jerónimo de Tarrazú, en San José, Costa Rica, coordenadas geográficas 9°37'43.0"N 84°06'34.6"W y otro a nivel de laboratorio en las instalaciones del Centro de Investigación de Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica, ubicado en San Pedro de Montes de Oca, coordenadas geográficas 9°56'23.249"N 84°2'54.608"W.

El producto a analizar para el experimento en finca se obtuvo de la zona de San Jerónimo de Tarrazú a una altura de 1500 msnm. Para el experimento en el laboratorio el producto se obtuvo de la finca Los Jiménez a 1700 msnm de la empresa Lorena Coffee Tour.

Los datos del clima de temperatura, precipitación, humedad y velocidad del viento de las zonas de estudio fueron obtenidos para el caso de finca en la aplicación CR-CAFÉ de la estación meteorológica de San Carlos ubicada a 1,4 km de la finca, para el caso del laboratorio se obtuvieron de las estaciones meteorológicas de la UCR ubicadas en la Facultad de Ingeniería de la UCR a 0,5 km del laboratorio.

##### **3.1.2 Tipos de beneficiado y características del producto**

Se utilizaron granos de café (*Coffea arabica*) de la variedad Catuaí rojo de la cosecha 2019-2020. Se beneficiaron 3 lotes de 10 kg para cada tratamiento de beneficiado seco, semi-seco y húmedo, tanto en la finca como en el laboratorio, bajo las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa propias de cada una de las zonas.

### 3.1.3 Secado de granos y evaluación de la cinética del secado

El secado de granos se realizó con la exposición directa al sol de los granos, se movió el café 5 veces al día, el secado se dio por terminado al obtener masa constante en dos días consecutivos, los cuales fueron colocados en mesas elevadas con cedazo (camas africanas) con dimensiones de 35 x 80 cm. Para la comparación de la cinética del secado del café en los 3 tipos de tratamiento de beneficiado se pusieron tres mallas sobre las mesas con una masa de café de 500 g y un espesor de capa de 0,5 cm (Figura 2). Para la medición de masa en finca se realizó un muestreo al día con tres repeticiones registrando los datos del día, hora y masa, se utilizó una balanza digital FS-400. Para el caso del laboratorio se muestreo dos veces al día en la mañana y en la tarde con tres repeticiones por medición con una balanza digital marca BOECO BPS 51 plus.



**Figura 2.** Muestras de las mallas utilizadas en el secado de café natural en finca de la empresa familiar café Terciopelo.

### 3.1.4 Análisis de Datos

El estudio diario de las tres masas de control por beneficiado permitió desarrollar la curva de secado representativa del lote en las mesas elevadas para capas finas de producto. El

cálculo de contenido de humedad instantáneo se determinó con la pérdida de masa según la ecuación.

$$X_t = 100 + (X_0 - 100) \left( \frac{M_0}{M_t} \right) \quad (16)$$

Donde el subíndice cero y  $t$ , representan la condición inicial y la condición instantánea del tiempo de secado, respectivamente:

$X_0$  = Contenido de humedad inicial en base húmeda (% b.h.)

$X_t$  = Contenido de humedad instantáneo en base húmeda (% b.h.)

$M_0$  = Masa en el momento inicial (g).

$M_t$  = Masa instantánea durante el proceso (g)

Se realizó la transformación de base húmeda a base seca y a partir de la siguiente ecuación los datos fueron transformados a razón de humedad mediante la fórmula.

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_i - X_e} \quad (17)$$

Donde:

$RX$ : La razón de humedad (decimal adimensional).

$X_t$ : El contenido de humedad del café durante el secado, decimal en base seca (dec. b.s.).

$X_i$ : El contenido de humedad inicial del café, decimal en base seca (dec. b.s.).

$X_e$ : El contenido de humedad en equilibrio del café (dec. b.s.).

El contenido de humedad de equilibrio se determinó según la curva de equilibrio para café pergamino descrita en la ecuación 3 y para café oro en la ecuación 4 (Jiménez y Valverde, 1999).

$$X_e = 3,33 * 10^{-4} * HR^3 - 5,642 * 10^{-2} - 2 * HR^2 + 3,3205 * HR - 56,4398 \quad (18)$$

$$X_e = 1,37 * 10^{-4} * HR^3 - 2,05 * 10^{-2} * HR^2 + 1,14867 * HR - 13,05 \quad (19)$$

Donde:

$X_e$ : El contenido de humedad en equilibrio del café (% b.h.).

HR: Humedad relativa (%)

Los coeficientes de los modelos del Cuadro 1 se determinaron estadísticamente por análisis de regresión no lineal en el software SigmaPlot 14. La disminución del contenido de humedad del café se asoció al tiempo mediante las ecuaciones propuestas para secado en capa delgada por varios autores a curvas con un ajuste del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) superior a 0,9 (Madamba et al.,1996).

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_e - Y_t)^2 \quad (20)$$

Donde:

$Y_e$  = el valor obtenido de forma experimental (Unidades de la función)

$Y_t$  = el valor calculado por la regresión (Unidades de la función)

N = el número de muestras observadas, adimensional

El SEE (ecuación 15) es la distancia promedio en unidades de las variables en que el valor observado se aleja del estimado por la regresión, además entre menor sea su valor el modelo presenta un mejor ajuste a los datos (Siqueira et al., 2012)

$$R^2_{adj} = \left( R^2 - \frac{p}{n-1} \right) * \left( \frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (21)$$



Donde:

$R^2_{adj}$  = R cuadrado ajustado o coeficiente de determinación ajustado, adimensional

$R^2$  = R cuadrado o coeficiente de determinación, adimensional

n = Número de observaciones de la muestra

p = Número de variables independientes

El  $R^2$  indica la capacidad del modelo para predecir la variable dependiente y el  $R^2_{adj}$  (ecuación 16) modifica el valor del  $R^2$  tomando en cuenta la cantidad de constantes de la ecuación disminuyendo el valor calculado del  $R^2$  entre más constantes se utilicen (Archontoulis & Miguez 2015).

El análisis de residuos se utilizó para determinar si el modelo tiene alguna tendencia (T) en el error o si el error es aleatorio (A) y el valor de P se empleó para el análisis de las variables de cada modelo para determinar si estas fueron estadísticamente relevantes y se indicó la cantidad de variables de cada modelo que no pasaron esta prueba estadística y se buscó el menor error estándar en las constantes obtenidas por medio de la regresión no lineal para los modelos (Montgomery & Runger, 2003; Archontoulis & Miguez 2015).

El criterio de prioridad utilizado para determinar el modelo de mejor ajuste, primero el  $R^2_{adj}$ , segundo el SEE, tercero la cantidad de constantes significativas según el valor P, cuarto el comportamiento aleatorio de los residuos y quinto el error estándar de las variables.

La ecuación seleccionada con las bandas de confianza del 95% delimita el intervalo donde la respuesta promedio para cada uno de los valores específicos del modelo al momento t puede ubicarse en el 95% de las repeticiones de la toma de datos; además las bandas de predicción del 95% delimita el intervalo donde el 95% de las futuras mediciones pueden estar ubicadas (Montgomery & Runger, 2003).

## **3.2 Metodología de la torrefacción**

### **3.2.1 Torrefacción del producto**

El trabajo se realizó en el Centro de Investigaciones de Granos y Semillas(CIGRAS), en la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica(UCR).

### **3.2.2 Tipos de beneficiado y características del producto a utilizar**

Se utilizaron granos de café (*Coffea arabica*) variedad Catuaí rojo de la zona del Valle Occidental de Costa Rica de la empresa Aromas del alto en San Ramón de Alajuela, cosecha 2019-2020. El lote fue producido en una parcela con elevación promedio de 1250 m.s.n.m. La cosecha fue manual y selectiva del fruto maduro. El secado fue realizado al sol durante 30 días en mesas elevadas con circulación de aire por convección natural, el espesor fue menor a 3 cm. Se utilizó un lote de 12,0 kg de fruto seco. La bebida con los granos obtenidos fue clasificada como café especial con evaluación sensorial de 85 puntos según la Asociación Americana de Cafés Especiales.

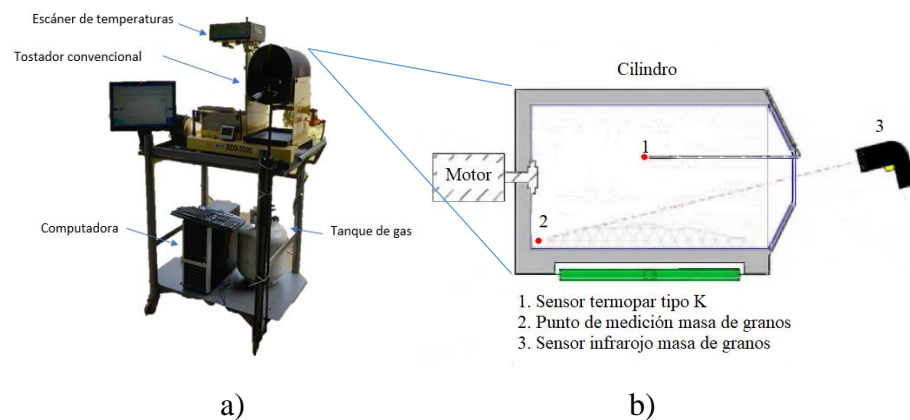
### **3.2.3 Tueste de granos y evaluación de la cinética de la torrefacción**

Se tostó los granos de los tres tipos de proceso (natural, miel y lavado), se tostó hasta alcanzar tres grados de tueste distintos de cada uno de ellos con 3 repeticiones para cada nivel de tueste de cada tipo de grano, para un total de 27 tuestes. Las temperaturas dentro del horno son alcanzadas mediante un flujo constante de energía del quemador hacia el cilindro rotativo y consumo de gas constante, la temperatura inicial del tostador fue de 280 °C antes del ingreso de la masa de granos y finalizó cuando la temperatura alcanzó para los tuestes claro, medio y oscuro los 220, 225 y 230 °C. Se empleó un termopar tipo K, para llevar registro de la temperatura interna del tostador al inicio y al final del tueste.

Se utilizó un medidor infrarrojo para medir la temperatura de la masa de granos, se usó una masa de granos de 600 g por tueste para garantizar un buen volumen de granos dentro del cilindro que permitió que se llevara un registro por medio del medidor infrarrojo de la masa

de granos y no las paredes del tostador, el modelo del medidor es marca General, el cual proporciona rangos de lecturas desde -32 hasta 1650 °C, con un tiempo de respuesta de 1 s y una precisión de 0,1°C. Se registró la masa obtenida al final del tueste.

Se utilizó un escáner de temperatura marca Cole-Parmer Instrument Company, modelo 92000-00 Benchtop, donde se conectó el cable termopar tipo k para medir la temperatura del interior del cilindro como se ve en la Figura 3.



**Figura 3:** Estación de investigación de los procesos de torrefacción de granos.

**Fuente:** a) Barrantes et al., 2020 b) Abarca, 2017

### 3.2.4 Análisis de Datos

Se utilizó el software SigmaPlot 14 para el procesamiento de los datos obtenidos del tueste de café, se realizaron las curvas del perfil de tueste y del calentamiento de los granos; se buscó la ecuación de mejor ajuste para describir el proceso del tostado diferenciado por el tipo de beneficiado, hay dos ecuaciones que se han utilizado para describir el perfil de tueste en tostador convencional y dos para describir el calentamiento de los granos.

Las constantes determinadas de los modelos fueron por el método matemático de la regresión no lineal. Se utilizó el mismo criterio estadístico descrito en la metodología de secado para evaluar las regresiones lineales obtenidas de los distintos modelos.

El coeficiente  $k$  y  $b$  de las ecuaciones del Cuadro 2 tienen unidades de  $\text{min}^{-1}$  y  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  respectivamente, Archontoulis & Miguez (2015) identificaron al coeficiente  $k$  de una ecuación exponencial como el valor que determina la pendiente de la curva y se le llama la constante de velocidad y Pardo & Ruiz (2005) identificaron al coeficiente  $b$  de una ecuación lineal como el cambio medio que se produce en el valor de la función  $F(x)$  por cada unidad de cambio  $x$ , y es conocida también como la pendiente de la recta.

Para las ecuaciones del cuadro 3 del calentamiento de los granos, los coeficientes respectivos a las condiciones iniciales del sistema se determinaron y se obtuvo que la temperatura inicial de la pared del tostador ( $T_a$ ) fue de  $320^{\circ}\text{C}$  y la temperatura ambiente ( $T_0$ ) fue de  $23,1^{\circ}\text{C}$ .

### **3.3 Evaluación de característica físicas**

Durante los experimentos de secado y torrefacción se midió el contenido de humedad, densidad aparente y la masa del café antes y después de cada uno de los experimentos. En el caso del experimento en finca no se registró la densidad aparente ya que no se pudo desplazar el equipo a la finca para las fechas que se realizaron las labores de beneficiado en la finca.

#### **3.3.1 Control de la masa**

Se pesó el lote de grano al inicio y al final del proceso de torrefacción, estas mediciones se tomaron mediante el uso de una balanza digital con una precisión de  $0,01$  g. Se utilizó la ecuación (3) para el cálculo de la pérdida relativa de masa.

$$\Delta M = \frac{M_f - M_0}{M_0} * 100 \quad (22)$$

Donde:

$\Delta M$  = variación relativa de la masa (%)

$M_0$  = masa inicial (g)

$M_f$  = la masa final (g).

### 3.3.2 Control de densidad aparente

Se utilizó como referencia la norma del instituto de Normas técnicas de Costa Rica (INTECO), INTE/ISO 6669-2009, que detalla el método de ensayo para determinar la densidad a granel de los granos enteros de café verde, bajo la condición de caída libre desde un contenedor a otro, esta norma toma como base la norma internacional ISO 6669: 1995 Determination of free flow bulk density of whole beans (Routine method).

Equipos: Balanza capaz de pesar con una exactitud de  $\pm 0,1g$ . Tolva alimentadora con forma de embudo con puerta corrediza en el extremo inferior con un recipiente para medición con una capacidad de 1 L y una espátula con borde recto para la nivelación.



**Figura 4:** Equipo utilizado para la medición de la densidad aparente.

Para determinar la densidad del grano se usó el equipo que se muestra en la Figura 4, en primera instancia se cierra la puerta corrediza del tanque alimentador luego el tanque

alimentador se llenó con la muestra de ensayo hasta 2,5 mm antes del borde superior del mismo, una vez sea colocado el recipiente de medición se abre la puerta corrediza, se dejó vaciar el tanque al recipiente de medición sin forzarlos, los granos que sobrepasaron la capacidad del recipiente cayeron sobre una bandeja previamente colocada para contener los granos. Con la espátula en posición horizontal se retiraron rápidamente el exceso de granos para nivelar la superficie se procedió a realizar la medición del peso de los granos de café que cupieron en el recipiente de 1 L; se midió la densidad aparente del grano antes y después de la torrefacción para cada uno de los tipos de tuestes, se tomaron 5 repeticiones para cada tueste realizado.

El cálculo se realizó tanto en las condiciones de grano inicial y final de los experimentos de secado y torrefacción; el resultado se representará en forma del cambio relativo de la densidad aparente por medio de la ecuación 23.

$$\Delta\rho = \frac{\rho_f - \rho_0}{\rho_0} * 100 \quad (23)$$

Donde:

$\Delta\rho$  = variación relativa de la densidad aparente (%)

$\rho_0$  = densidad aparente inicial (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_f$  = densidad aparente final (kg/m<sup>3</sup>).

Se calculó también la expansión aparente observada en los experimentos por medio de la ecuación 24.

$$\Delta\Psi = \left[ \left( \frac{\rho_0 * M_f}{\rho_f * M_0} \right) - 1 \right] * 100 \quad (24)$$

Donde:

$\Delta\Psi$  = cambio relativo de expansión aparente (%)

$\rho_0$  = densidad aparente inicial ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_f$  = densidad aparente final ( $\text{kg/m}^3$ )

$M_0$  = masa inicial (g)

$M_f$  = masa final (g).

### 3.3.3 Análisis por regresión lineal del cambio relativo de la masa y la densidad aparente

Se realizó la regresión lineal de los valores obtenidos de los cambios relativos de la masa en función del tiempo y en función de la temperatura de tueste final, esta regresión se valoró con los métodos estadísticos del  $R^2$  y el SEE por medio del software SigmaPlot 14 para observar cuál de las dos variables obtuvo un mejor ajuste, para realizar respecto a esta la regresión lineal del cambio relativo de la densidad aparente buscando una uniformidad en la evaluación de estos dos valores físicos, se evaluó estadísticamente y se propuso la ecuación 27 conjunta para el cálculo del volumen final de tueste en función de la variable designada por medio de las dos ecuaciones lineales obtenidas para el cambio relativo de masa (ecuación 25) y densidad (ecuación 26).

$$\Delta M(T) = y_M + a_M * T \quad (25)$$

$$\Delta \rho(T) = y_\rho + a_\rho * T \quad (26)$$

Donde:

$y_M, y_\rho, a_M$  y  $a_\rho$  = parámetros de la regresión lineal

$T$  = Temperatura final de tueste del aire dentro del tostador ( $^{\circ}\text{C}$ )

La ecuación 27 se planteó a partir de la ecuación 25 y 26, para obtener el valor al que se ve disminuido la característica física se realizó la conversión del valor porcentual a decimal se restó este valor a 1 y se multiplico por el valor inicial.

$$V_f = \frac{\left(1 - \frac{\Delta M}{100}\right) * M_0}{\left(1 - \frac{\Delta \rho}{100}\right) * \rho_0} \quad (27)$$

El desempeño de la ecuación 27 se evaluó comparando los valores obtenidos del volumen final por medio de datos de masa y densidad teóricos y experimentales.

### 3.3.4 Evaluación del color del café tostado:

El nivel de tostado se evaluó según el color de los granos, por medio de la escala Agrtron Figura 5. La evaluación se realizó de manera directa contra los patrones de color.



**Figura 5:** Escala de color de los granos de café tostado Tabla Agrtron

**Fuente:**(Castillo, Muñoz, & Engler, 2016)

### 3.3.5 Contenido de humedad

El contenido de humedad del café pergamino en la fase de secado se midió en la finca de la empresa Terciopelo con el uso de un medidor de humedad para café de la marca Agratronix con tres repeticiones para los tres tipos de beneficiado.



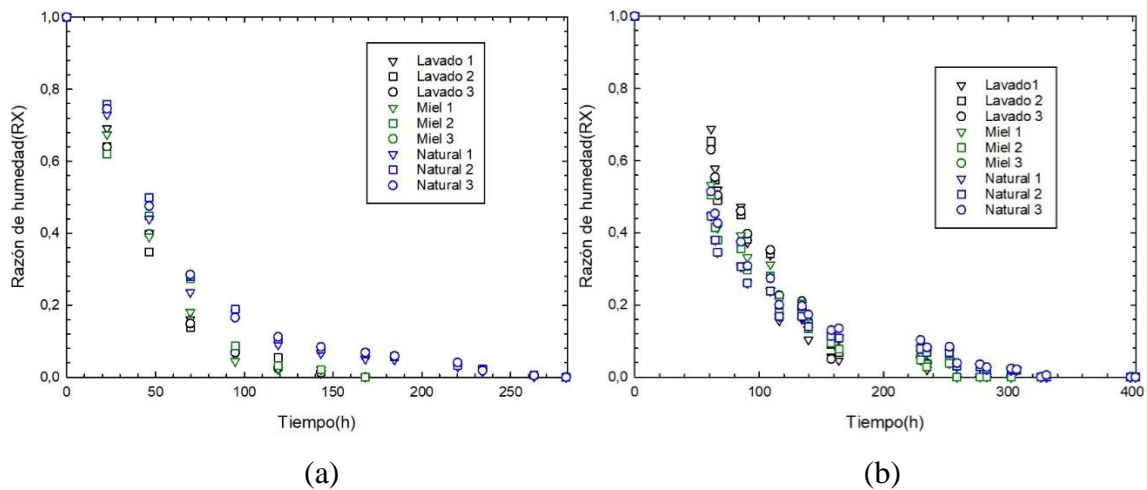
En el experimento en el laboratorio el contenido de humedad se midió con el uso de una balanza de radiación A&D modelo MF-50 a una temperatura de 130 °C hasta alcanzar el equilibrio con muestras de 5 g con tres repeticiones para el café natural, miel y lavado.

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Secado del café natural miel y lavado

Se registró los datos promedios de las condiciones atmosféricas registradas en estaciones meteorológicas cercanas a las ubicaciones del experimento durante el tiempo del secado, en finca se registró una de temperatura de 22,24 °C, con 19,2 mm de precipitación, humedad de 73% y vientos de 1,15 km/h; para el secado en laboratorio la temperatura fue de 19,8 °C, no se registraron lluvias, una humedad de 71,74 % y velocidad del viento de 8,5 km/h.

En la Figura 6 se muestra el conjunto de datos registrados para el secado en finca y en laboratorio. La razón de humedad en el secado en finca descendió de 100% a 75% en aproximadamente un día, después descendió hasta 50 % en dos días y finalmente alcanzó el 25% en tres días.



**Figura 6.** Razón de humedad en el Secado de café por proceso en finca (a) y en laboratorio (b).

#### 4.1.1 Café lavado

El café lavado se secó tanto en la finca como en el laboratorio independientemente y las tres repeticiones de cada lote fueron consistentes mostrando una tendencia decreciente de la

razón de humedad. Se observa en el Cuadro 4 que todos los modelos describieron adecuadamente el proceso con un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) superior a 0,98; lo cual confirmó que el secado del café lavado puede ser descrito como capa delgada siempre que los granos sean removidos frecuentemente.

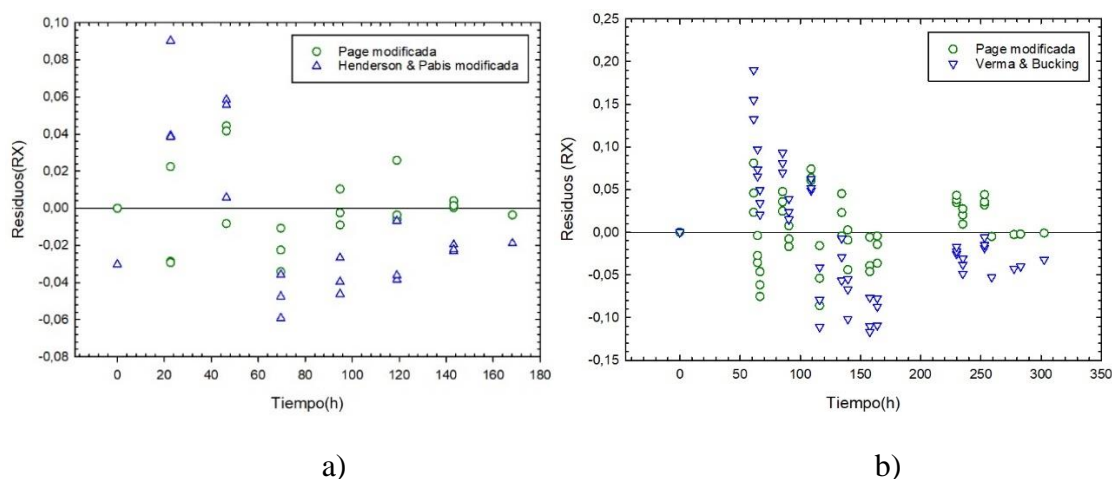
**Cuadro 4.** Análisis estadístico del ajuste en secado de café lavado en dos lugares.

Ecuación	Finca				Laboratorio			
	$R^2_{adj}$	SEE	AR	P	$R^2_{adj}$	SEE	AR	P
Page	0,9968	0,0199	A	0	0,9832	0,036	A	0
Midilli, Kucuk & Yapar	0,9965	0,0209	A	1	0,9829	0,0363	A	1
Henderson & Pabis	0,9862	0,0412	T	0	0,9444	0,0654	T	0
Henderson y Pabis modificada	0,9832	0,0455	T	2	0,9400	0,0679	T	1
Verma & Bucking	0,9843	0,0439	T	2	0,9373	0,0694	T	2
Hii, Law & Cloke	0,9963	0,0214	A	4	0,9826	0,0366	A	3
Newton	0,9857	0,0419	T	0	0,9395	0,0682	T	0
Logaritmica	0,9856	0,0421	T	1	0,9585	0,0565	T	0
Dos terminos	0,9849	0,0432	T	4	0,9423	0,0666	T	2
Page modificada	0,9968	0,0199	A	0	0,9832	0,036	A	0

SEE: error estándar de los estimados; AR: Análisis de residuos; P: cantidad de coeficientes que no pasaron el análisis del valor-p.

Del Cuadro 4 se destacan las ecuaciones de Page y Page-modificada con los valores más altos del coeficiente de determinación ajustado en finca de 0,9968, además presentaron el menor error estándar de los estimados en 0,0199, el comportamiento de sus residuos es aleatoria y todas las constantes de los dos modelos tienen un valor de  $P$  menor de 0,05. Este resultado fue confirmado con el secado en el laboratorio, porque presentaron los mejores resultados con  $R^2_{adj}$  de 0,9832, SEE de 0,036 y todos los coeficientes con  $P$  menor que 0,05. El modelo de Midilli, Kucuk & Yapar tuvo valores de  $R^2_{adj}$  y SEE de 0,9965 y 0,0214 respectivamente para el caso de finca; y de 0,9829 y 0,0363 para el caso de laboratorio, presentó un ajuste adecuado pero menor que los de Page y Page-modificada. Se observa en la columna de los resultados del  $t$ -test para el valor de  $P$  una de sus variables no es representativa para los datos en ninguno de los dos casos.

El comportamiento de los residuos fue aleatorio para los modelos de Page, Midilli, Hii, Law & Cloke y Page modificada debido a su alto nivel de ajuste del  $R^2_{adj}$ , siendo superior a 0,99 y de un SEE cercanos a 0,02. En la Figura 7 se muestra el comportamiento aleatorio de los residuos para el modelo de Page modificada y en contraste se muestra los residuos para la ecuación de Henderson-Pabis modificada la cual tiene un comportamiento tendencioso.



**Figura 7.** Análisis de los residuos de café lavado secado en finca para la ecuación Page modificada y Henderson & Pabis modificada (a) y en laboratorio para la ecuación Page modificada y Verma & Bucking (b)

Así mismo, en la Figura 7.a se muestran los residuos para el modelo de Henderson-Pabis modificada con  $R^2_{adj}$  menor entre todos los modelos de 0,9832 y SEE de 0,0455, el cual muestra residuos con un comportamiento tendencioso este comportamiento marcado porque antes de las 60 horas los residuos tienden a un comportamiento positivo y después tienden a ser negativos; este tipo de distribución polarizada se determinó como tendencioso.

El comportamiento mostrado en la Figura 7.b es representativo del comportamiento aleatorio de los residuos en el caso de laboratorio de los modelos de Page, Midilli, Hii, Law

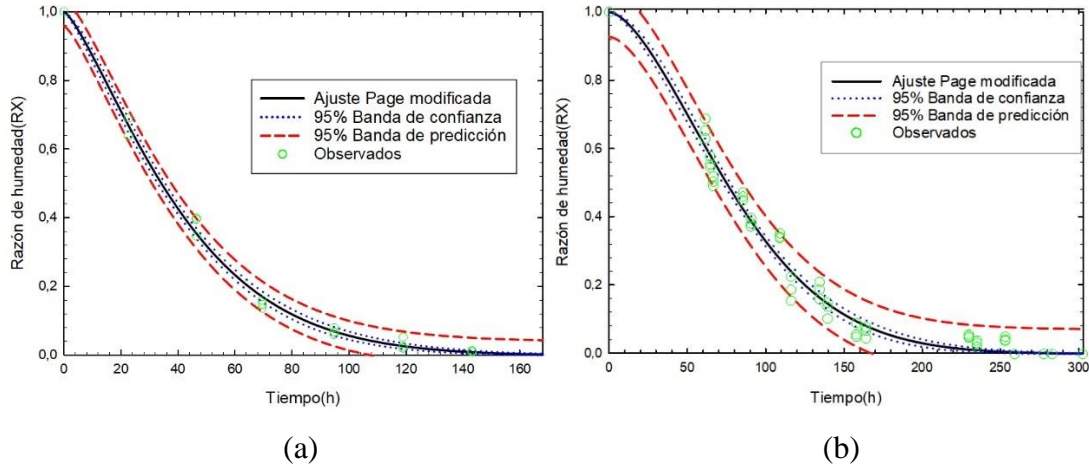
& Cloke y Page modificado. El comportamiento de los residuos de Verma & Bucking es un ejemplo de la clasificación tendenciosa de los residuos.

Se analizaron las constantes obtenidas para estos dos modelos en el Cuadro 5 donde se presentan las constantes del modelo de Page y Page modificado donde se observó que la constante  $k$  es el coeficiente que varía entre modelos y que la constante  $k$  obtenida para el modelo de Page modificado es la que tiene el menor error estándar por lo cual se determina que es la ecuación de mejor ajuste.

**Cuadro 5.** Análisis de las constantes de los modelos de Page y Page modificado para café lavado.

Ecuación	Variable	Coeficiente	Error estándar
Page (Finca)	n	1,3163	0,0403
	K(1/h)	0,0066	0,0010
Page modificada (Finca)	n	1,3163	0,0403
	K(1/h)	0,0221	0,0003
Page (Laboratorio)	n	1,6372	0,0629
	K(1/h)	0,0006	0,0002
Page modificada (Laboratorio)	n	1,6372	0,0629
	K(1/h)	0,0107	0,0001

En el trabajo realizado por Siqueira et al. (2017) utilizaron café lavado y secado con aire forzado, ellos obtuvieron que el modelo de mejor ajuste fue el modelo de Midilli el cual tiene una estructura parecida al de Page modificada, su principal diferencia consiste en el coeficiente pre exponencial y la suma de una constante. Al Analizar los valores obtenidos para su experimento de  $k$  están entre valores de 0,1376 y 0,1825 para una temperatura de 35 °C y de 0,1549 y 0,2248 para una temperatura de 40 °C, comparando estos valores  $k$  con los obtenidos en el trabajo de 0,0221 y 0,0107 para el modelo de Page modificada ya que el proceso dura varios días en completarse a diferencia del proceso de secado con aire que dura menos de un día. En las Figuras 9 y 10 se muestra el ajuste del modelo de Page con las bandas de confianza y bandas de predicción.



**Figura 8.** Ajuste del modelo de Page modificado en el secado del café lavado en finca (a) y en laboratorio (b).

En la Figura 8.a las bandas de predicción tienen una amplitud promedio de  $\pm 0,043$  y en la Figura 8.b la banda de predicción cuenta con una amplitud promedio es de  $\pm 0,073$ ; con una desviación estándar de  $\pm 0,001$ . Las bandas de confianza tienen una amplitud promedio para la Figura 8.a y 8.b de  $\pm 0,012$  con una incertidumbre de  $\pm 0,001$  para finca y  $\pm 0,007$  para el caso de laboratorio. El tiempo efectivo del secado depende del lugar, en finca fue de aproximadamente 170 h mientras que en laboratorio fue de aproximadamente 260 h, es decir una diferencia de 4 días.

#### 4.1.2 Café miel

El café miel se secó tanto en la finca como en el laboratorio, las tres repeticiones fueron consistentes con la tendencia decreciente de la razón de humedad, se hizo un ajuste general considerando todos los valores, se muestran los resultados estadísticos de las ecuaciones estudiadas para la café miel en finca y laboratorio en el Cuadro 6.

**Cuadro 6.** Análisis estadístico del ajuste en secado de café miel en dos lugares.

Ecuación	Finca				Laboratorio			
	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	SEE	AR	P	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	SEE	AR	P
Page	0,9901	0,0347	A	0	0,9863	0,0288	A	0
Midilli, Kucuk & Yapar	0,9892	0,0362	T	1	0,9858	0,0294	A	1
Henderson & Pabis	0,9833	0,0449	T	0	0,9841	0,0311	A	0
Henderson y Pabis modificada	0,9796	0,0497	T	1	0,9829	0,0323	A	2
Verma & Bucking	0,9818	0,0468	T	2	0,9836	0,0316	A	2
Hii, Law & Cloke	0,9886	0,0371	T	4	0,9855	0,0296	A	1
Newton	0,9834	0,0448	T	0	0,9842	0,0310	A	0
Logaritmica	0,9825	0,0460	T	1	0,9870	0,0281	A	0
Dos terminos	0,9816	0,0471	T	4	0,9835	0,0316	A	2
Page modificada	0,9901	0,0347	A	0	0,9863	0,0288	A	0

SEE: error estándar de los estimados; AR: Análisis de residuos; P: cantidad de coeficientes que no pasaron el análisis del valor-p.

Se observa en el Cuadro 6 que los modelos describen según el R<sup>2</sup><sub>adj</sub> de una forma adecuada el secado, con resultados superiores a 0,9800; el modelo de Henderson y Pabis modificado fue el modelo con el resultado más bajo con un valor de 0,9796. Se resaltó el desempeño en los datos de finca de 2 modelos los cuales tiene valores del R<sup>2</sup><sub>adj</sub> de 0,9901 y SEE de 0,0347 siendo estos los modelos de Page y Page modificado. Estos mismos modelos presentaron el R<sup>2</sup><sub>adj</sub> mayor para los datos del laboratorio siendo superiores a 0,9863 y SEE de 0,0288.

Los ajustes de los modelos son adecuados con valores superiores a 0.9800 del R<sup>2</sup><sub>adj</sub>, sin embargo, un criterio que puede aplicarse para seleccionar el mejor ajuste es el valor de P el cual nos indica que los modelos de Page y Page modificado para el caso de finca y laboratorio todos sus coeficientes pasaron el análisis del valor-p.

De los datos de café miel secado en finca presentados en el Cuadro 6, los modelos Page y Page-modificado tienen un comportamiento de residuos aleatorio y con todos los coeficientes estadísticamente importantes. Las mismas ecuaciones representan

adecuadamente al secado del café miel en el laboratorio, ya que todos los coeficientes pasaron la prueba de significancia estadística (Análisis del valor-p).

El Cuadro 7 presenta los coeficientes de los dos modelos seleccionados para el secado de café miel en el laboratorio. El comportamiento de los residuos fue aleatorio para todas las ecuaciones.

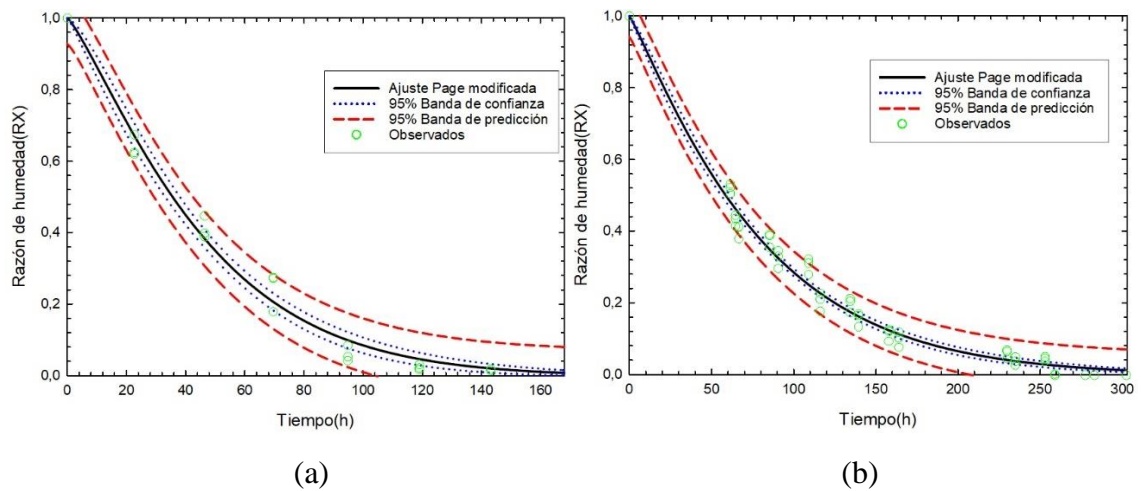
**Cuadro 7.** Análisis de las constantes de los modelos de Page y Page modificado para café miel.

Ecuación	Variable	Coefficiente	Error estándar
Page (Finca)	n	1,2228	0,0620
	K(1/h)	0,0088	0,0022
Page modificada (Finca)	n	1,2228	0,0620
	K(1/h)	0,0208	0,0006
Page (Laboratorio)	n	1,1098	0,0381
	K(1/h)	0,0075	0,0013
Page modificada (Laboratorio)	n	1,1098	0,0381
	K(1/h)	0,0122	0,0002

Duarte et al. (2009) utilizó el modelo de Page para el ajuste del secado de café miel a diferentes temperaturas superiores a la temperatura ambiente obteniendo valores de las constantes  $k$  para las temperaturas de 40, 50 y 60 °C con valores de 0,0249; 0,1361 y 0,1786 siendo estos más de 4 veces mayores a los resultados mostrados en el Cuadro 5 a temperatura ambiente; los valores de  $n$  fueron cercanos a los obtenidos en este experimento para el café miel.

El modelo Page modificado muestra un error estándar menor en el coeficiente  $k$  para los dos experimentos realizados, el coeficiente  $n$  se mantuvo constante en 1,2228 (Finca) y 1,1098 (Laboratorio) entre los modelos en cada uno de los experimentos. En las Figuras 9.a y 9.b se muestra el ajuste del modelo de Page con las bandas de confianza y bandas de predicción para los experimentos realizados.





**Figura 9.** Ajuste del modelo de Page modificado para el secado del café miel en finca (a) y en laboratorio (b).

En la Figura 9.a las bandas de predicción tienen una amplitud promedio de  $\pm 0,075$  y en la Figura 9.b la banda de predicción su amplitud promedio es de  $\pm 0,059$ ; valores con una desviación estándar de  $\pm 0,002$  y  $\pm 0,001$  respectivamente. Las bandas de confianza tienen una amplitud promedio para las Figuras 9.a y 9.b de  $\pm 0,021$  y  $\pm 0,012$  con una incertidumbre de  $\pm 0,008$  para finca y  $\pm 0,005$  para el caso de laboratorio.

#### 4.1.3 Café natural

Para los experimentos con café natural se obtuvo una variación de los modelos que obtuvieron un valor del coeficiente determinación más alto, siendo estos Henderson & Pabis modificada y Midilli, Kucuk & Yapar. Se muestran los resultados del secado en el Cuadro 8.

**Cuadro 8.** Análisis estadístico del ajuste en secado de café natural en dos lugares.

Ecuación	Finca				Laboratorio			
	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	SEE	AR	P	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	SEE	AR	P
Page	0,9951	0,0216	T	0	0,9873	0,0251	A	0
Midilli, Kucuk & Yapar	0,9958	0,0201	T	0	0,9869	0,0255	A	1
Henderson & Pabis	0,9930	0,0259	T	0	0,9863	0,026	A	0
Henderson y Pabis modificada	0,9921	0,0274	T	2	0,9866	0,0257	A	2
Verma & Bucking	0,9919	0,0279	T	2	0,9872	0,0252	A	2
Hii, Law & Cloke	0,9978	0,0146	A	0	0,9877	0,0247	A	2
Newton	0,9923	0,0271	T	0	0,9865	0,0259	A	0
Logaritmica	0,9928	0,0262	T	1	0,9866	0,0258	A	1
Dos terminos	0,9926	0,0266	T	2	0,9870	0,0254	A	3
Page modificada	0,9952	0,0216	T	0	0,9873	0,0251	A	0

SEE: error estándar de los estimados; AR: Análisis de residuos; P: cantidad de coeficientes que no pasaron el análisis del valor-p.

Los datos para el café natural analizado en laboratorio (Cuadro 8) muestran que el modelo de mejor ajuste obtenido en los experimentos de finca y laboratorio es el de Hii, Law & Cloke con R<sup>2</sup><sub>adj</sub> de 0,9978; SEE de 0,0146 y R<sup>2</sup><sub>adj</sub> de 0,9877; SEE de 0,0247. Se observó que el modelo de Hii, Law & Cloke tiene variables no estadísticamente representativas al no pasar el criterio del análisis del valor-p para el experimento del laboratorio, razón por la que es descartado, por esta misma razón el modelo de Midilli, Kucuk & Yapar igualmente es descartado.

Para el caso del beneficiado de café natural, (Cuadro 8) los modelos de Page y Page modificado tuvo resultados en finca del R<sup>2</sup><sub>adj</sub> respectivamente de 0,9951 y 0,9952 y ambos con un SEE de 0,0216. Los modelos de Page y Page modificado presentaron el mejor comportamiento también en el laboratorio ya que todas sus variables son estadísticamente representativas y su ajuste R<sup>2</sup><sub>adj</sub> es de 0,9873 y SEE es de 0,0251 para ambos modelos. En los resultados obtenidos por Jordan et al. (2020) en el secado con aire de café natural, se obtuvo que la ecuación de mejor ajuste fue el modelo de Midilli, el cual obtuvo mejores resultados estadístico que el de Page, aunque se destaca que los ajustes del modelo de Page

fueron adecuados con valores de coeficiente de determinación de 0,9954 y con un SEE de 0,0171; semejantes a los obtenidos en este experimento, mostrando que la ecuación de Page puede ser utilizada tanto para secado solar o secado con aire del café natural.

Se seleccionó para el caso del secado en finca la ecuación de Page modificada ya que se busca es un modelo que describa adecuadamente el secado para los tres procesos de beneficiado lo cual el modelo de Page modificada cumple de forma adecuada en ambos experimentos, tiene un SEE de 0,216 lo cual ubica a los residuos muy cerca de la línea de residuos 0 y un  $R^2_{adj}$  de 0,9952. Estos resultados muestran que el modelo de Page modificado describe el proceso de secado de café natural en finca.

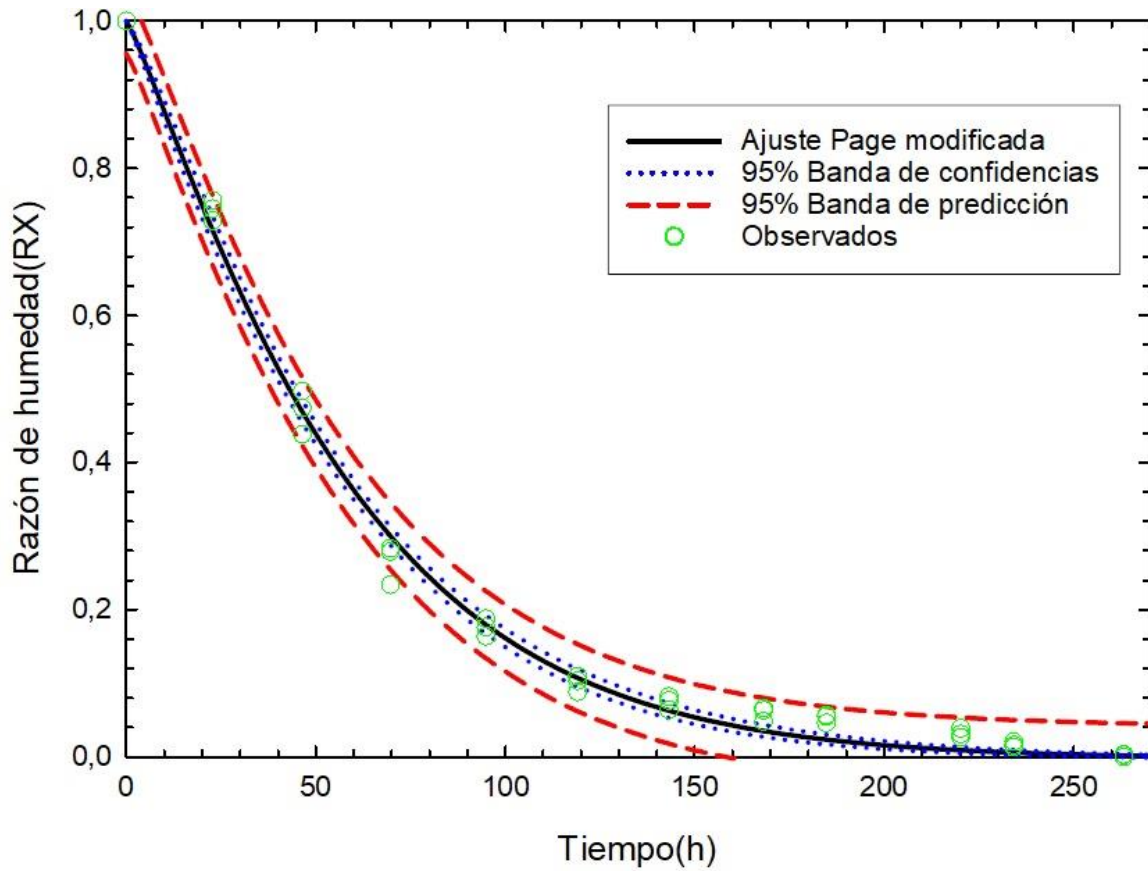
Los modelos de mejor ajuste para el secado en el laboratorio fueron Page y Page modificado por ser su comportamiento adecuado en las dos repeticiones del experimento. En el cuadro 9 se muestran los resultados de las constantes de los modelos de Page y Page modificado.

**Cuadro 9.** Análisis de las constantes de los modelos de Page y Page modificado para café natural.

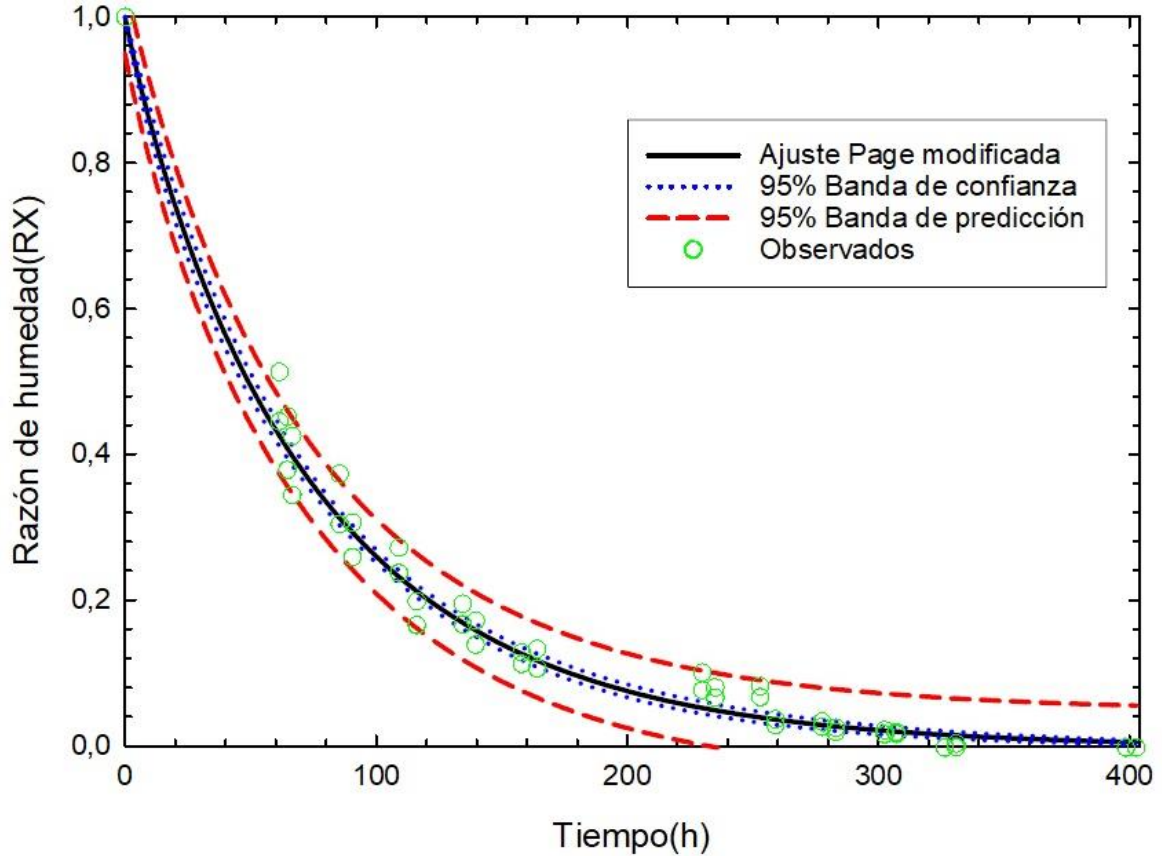
Ecuación	Variable	Coefficiente	Error estándar
Page (Finca)	n	1,1435	0,0310
	K(1/h)	0,0094	0,0012
Page modificada (Finca)	n	1,1435	0,0310
	K(1/h)	0,0168	0,0003
Page (Laboratorio)	n	0,9307	0,0286
	K(1/h)	0,0184	0,0025
Page modificada (Laboratorio)	n	0,9307	0,0286
	K(1/h)	0,0137	0,0002

La constante  $k$  del modelo de Page modificado presenta un error menor que la del modelo de Page como se puede observar en el Cuadro 9, siendo sus constantes de mayor confianza estadística, por lo cual fue seleccionado como el mejor modelo para el análisis del secado

del café natural. En las Figuras 13 y 14 se muestra el ajuste del modelo de Page con las bandas de confianza y bandas de predicción para los experimentos realizados.



**Figura 10.** Ajuste del modelo de Page modificado en el secado del café natural en finca.



**Figura 11.** Modelo de Page modificado para el secado del café natural en laboratorio.

En la Figura 10 las bandas de predicción tienen una amplitud promedio de  $\pm 0,045$  y en la Figura 11 la banda de predicción su amplitud promedio es de  $\pm 0,051$ ; ambas con valores de desviación estándar de  $\pm 0,001$ . Las bandas de confianza tienen una amplitud promedio para las Figuras 13 y 14 de  $\pm 0,009$  y ambas con una incertidumbre  $\pm 0,005$ .

De acuerdo a Jordan et al. (2020) el tiempo de secado en horas de los experimentos va desde las 50 horas hasta las 225 horas, incrementando el tiempo de secado conforme disminuyó la temperatura del aire con valores de  $k$  entre 0,1729 y 0,0923, los resultados coinciden en que la rapidez del proceso puede estudiarse a través de la magnitud de la constante de secado que en este caso el mayor valor (0,0168) correspondió con el menor tiempo 300 h de secado y el mínimo valor (0,0137) con 400 h.

Se destaca la semejanza del exponente  $n$  entre los modelos de Page y Page modificada para cada beneficiado estudiado en los dos experimentos de finca y laboratorio como se ve en los Cuadros 3, 5 y 7. La constante de secado  $k$  si varía entre los modelos de Page y Page modificada.

#### 4.1.4 Comparación entre sistemas de beneficiado

Los tres tipos de beneficiados fueron descritos adecuadamente por las ecuaciones de Page y Page-modificada. Los criterios de selección estadísticos en orden de importancia fueron:  $R^2_{adj}$ , el comportamiento aleatorio de los residuos, SEE, error estándar de las variables y constantes significativas según el valor P, se determinó que entre los dos modelos el más adecuado fue la ecuación de Page-modificada por tener un error estándar reducido en la constante de secado  $k$ . El Cuadro 10 resume los valores de las constantes determinadas para cada análisis.

**Cuadro 10.** Resumen de los coeficientes de la ecuación de Page-modificada para el secado de café en tres niveles de beneficiado en laboratorio y en finca.

Lugar	Beneficiado	$n$	$k(1/h)$	$R^2_{adj}$	SEE
Laboratorio	Natural	0,9307	0,0137	0,9873	0,0251
	Miel	1,1098	0,0122	0,9863	0,0288
	Lavado	1,6372	0,0107	0,9832	0,0360
Finca	Natural	1,1435	0,0168	0,9952	0,0216
	Miel	1,2228	0,0208	0,9901	0,0347
	Lavado	1,3163	0,0221	0,9968	0,0199

SEE: error estándar de los estimados;  $n$  y  $k$  coeficientes del modelo

Se observa en el Cuadro 10 que la constante  $n$  tuvo un comportamiento diferenciado para cada sistema de beneficiado, su valor es creciente desde el café natural, el café miel y el café lavado, lo cual se comprobó en las dos localidades,  $n$  puede estar asociada a la tasa de difusión de los líquidos; en el trabajo Alves et al. (2013) la difusión de los líquidos aumenta

al disminuir las barreras físicas que impiden la pérdida de líquido; esta diferencia en cantidad de barreras físicas se da en el experimento producto de la característica del grano de cada tipo de beneficiado siendo el grano natural el que tiene mayor cantidad de barreras física y el grano lavado el de menor cantidad.

La constante  $n$  del modelo de Page-modificado depende del tipo de beneficiado que recibe el grano sea natural, miel o lavado, es decir; está asociado a la morfología de los granos entre café natural y café descascarado la cual ocasiona que haya diferencia en el tiempo de secado siendo menor para el del café descascarado (Siqueira et al., 2017).

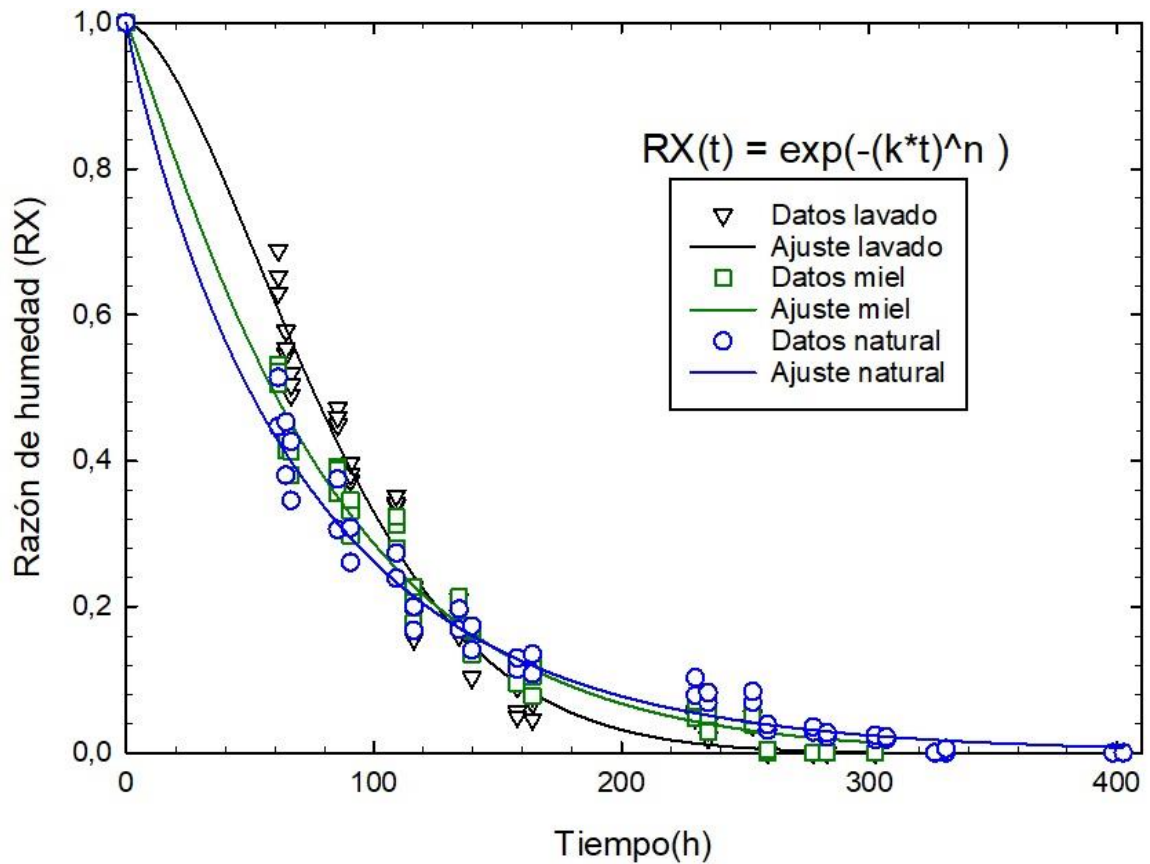
La dependencia observada de la constante  $n$  respecto a la morfología del producto también se ve reflejada en los resultados obtenidos por Akpinar (2010) con el modelo de Page modificada, obteniendo valores para la constante para hojas de menta, perejil y albahaca.

La constante de la rapidez de secado ( $k$ ) aumentó conforme se fueron reduciendo las capas externas del fruto, desde la cáscara hasta la remoción del mucílago, lo cual concuerda con los experimentos en finca. En el caso de las muestras secadas al ambiente en el laboratorio, la rapidez tuvo una tendencia decreciente y opuesto a los resultados en finca, debe indicarse que las diferencias entre los valores de  $n$  fueron cercanos a 0,2 (natural-miel) y 0,5 (miel-lavado) en el caso de laboratorio.

Los resultados en este experimento concuerdan con otras investigaciones realizadas por Jordan et al. (2020), Siqueira et al. (2017), Duarte et al. (2009) y Phitakwinai et al. (2019), donde el proceso de secado al sol en forma general presenta valores de 4 a 20 veces menores de la constante de secado ( $k$ ) con respecto al secado con aire forzado a diferentes temperaturas.

La Figura 12 muestra los ajustes de Page-modificada para los tres procesos en el laboratorio, se observó que el proceso de beneficiado afecta el ajuste del modelo, hay un punto en común

donde las gráficas se intersecan después de 5 días de secado. La duración del proceso de secado descrito en la Figura 12 para el café lavado es 230 horas, para el café miel es de 300 horas y para el café natural es de 400 horas.



**Figura 12.** Cinéticas de secado para el café *Catuai* procesado en laboratorio.

En la Figura 12 se da un comportamiento no esperado de las curvas de secado antes de las 150 horas ya que es cuando la humedad del grano cambia más en el tiempo y además los granos deben ser desplazados de la zona de secado durante las noches a dentro de las instalaciones del laboratorio del CIGRAS.

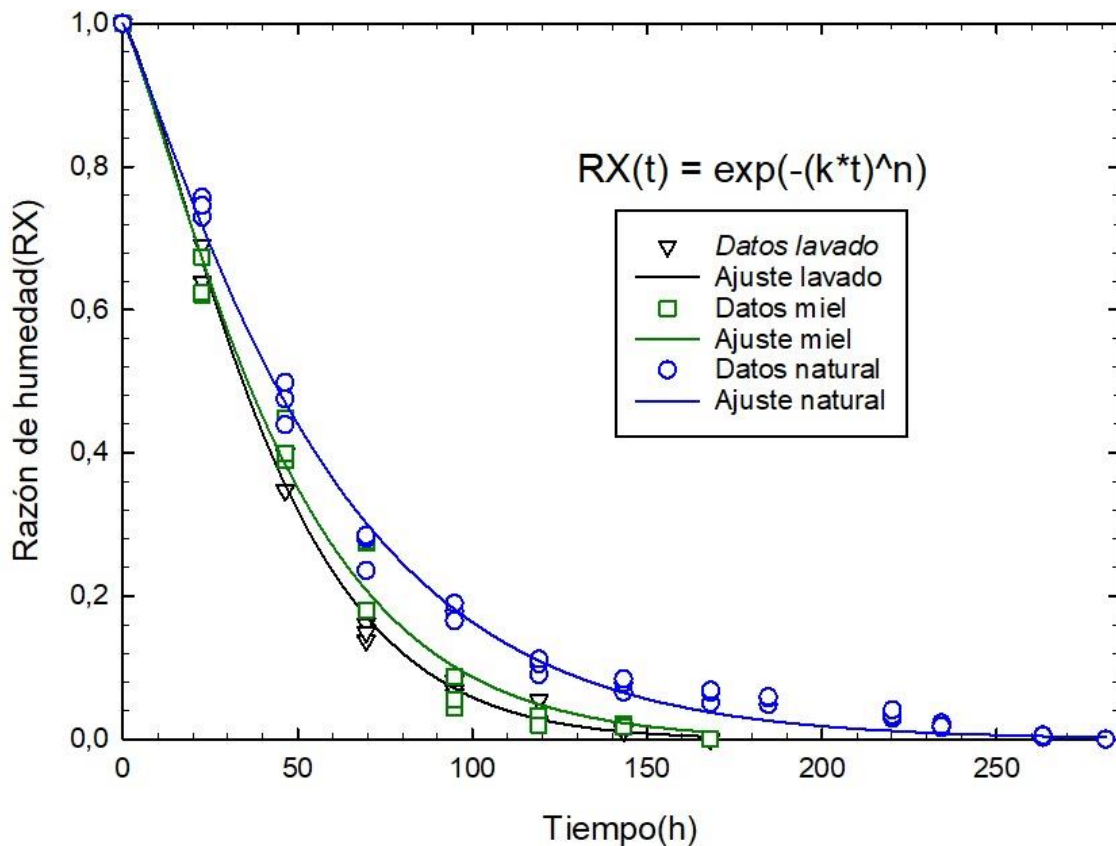
De la Figura 12 se resalta el efecto de la constante  $n$  en la ecuación de Page-modificada, la cual presentó los mayores valores en el caso del café lavado. Esta característica le da a la



gráfica un comportamiento de forma de “S” presentando un proceso de secado lento al inicio y luego disminuyó drásticamente en la razón de humedad asociada con el valor máximo de la constante  $n$  de 1,6372.

Para el proceso de café natural la constante  $n$  tuvo el valor mínimo de 0,9307 y un descenso en la razón de humedad con menos cambios en la razón de humedad a lo largo de la duración del proceso, es decir; fue un proceso más amortiguado, lo cual está de acuerdo con el movimiento interno del agua y la resistencia de las capas externas del grano. Después de aproximadamente 125 horas los casos con una constante  $n$  mayor son los primeros en secarse.

La Figura 13 muestra los ajustes para el café procesado en la finca por los tres métodos, se observó que el proceso de beneficiado afecta ambos coeficientes ( $n, k$ ) del modelo de Page-modificado, las curvas de secado se diferenciaron conforme transcurrió el tiempo. La duración del proceso para el café lavado fue de 170 horas, para el café miel fue de 170 horas y para el café natural fue de 280 horas.



**Figura 13.** Cinéticas de secado para el café *catuaí* procesado en la finca.

Se observó que la magnitud de la constante  $n$  para el café procesado en finca sigue la tendencia creciente desde el café natural hasta el café lavado (Cuadro 8). Las diferencias son menores entre los valores de  $n$  (0,1) en los tres tipos de procesamiento y el cruce de las líneas se observó entre las primeras horas del secado (Figura 16). El secado más rápido en finca ocurrió en el café lavado, asociado a un máximo exponente  $n$  (1,3163) y con el máximo valor en la rapidez de secado  $k$  (0,0221).

Los resultados y cálculos estadísticos obtenidos en el trabajo demuestran que la ecuación de Page modificada fue adecuada para describir el proceso de secado al sol, de granos provenientes de los beneficiados seco (natural), semi-seco (miel) y húmedo (lavado).

## 4.2 Torrefacción del café natural, miel y lavado

### 4.2.1 Tiempo de Tueste

En el Cuadro 11 se muestra el tiempo promedio para cada tipo de café beneficiado en las 3 temperaturas finales de tueste utilizadas para el experimento.

**Cuadro 11:** Duración del proceso de torrefacción (min).

Tueste	220 °C	225 °C	230 °C
Beneficiado	t.Prom (min)		
Lavado	8,1 ± 0,3	9,4 ± 0,6	9,7 ± 0,2
Miel	8,6 ± 0,4	9,2 ± 0,2	10,1 ± 0,1
Natural	9,7 ± 0,3	10,2 ± 0,2	11 ± 0,1

De los datos mostrados en el Cuadro 11 se observa que hay una diferencia en la duración del proceso de torrefacción entre los beneficiados donde el café lavado es el de menor duración para los tuestes a 220 y 230 °C. El tueste de 225 °C en café lavado tuvo una desviación estándar de 0,6 min indicando similitud con el café miel. El café natural presentó la mayor duración entre los tres tipos de beneficiados. Las duraciones del tueste están entre los 8 a 15 minutos cumpliendo con los tiempos de la norma ICO de tiempo de tueste.

### 4.2.2 Perfil de tueste de café lavado

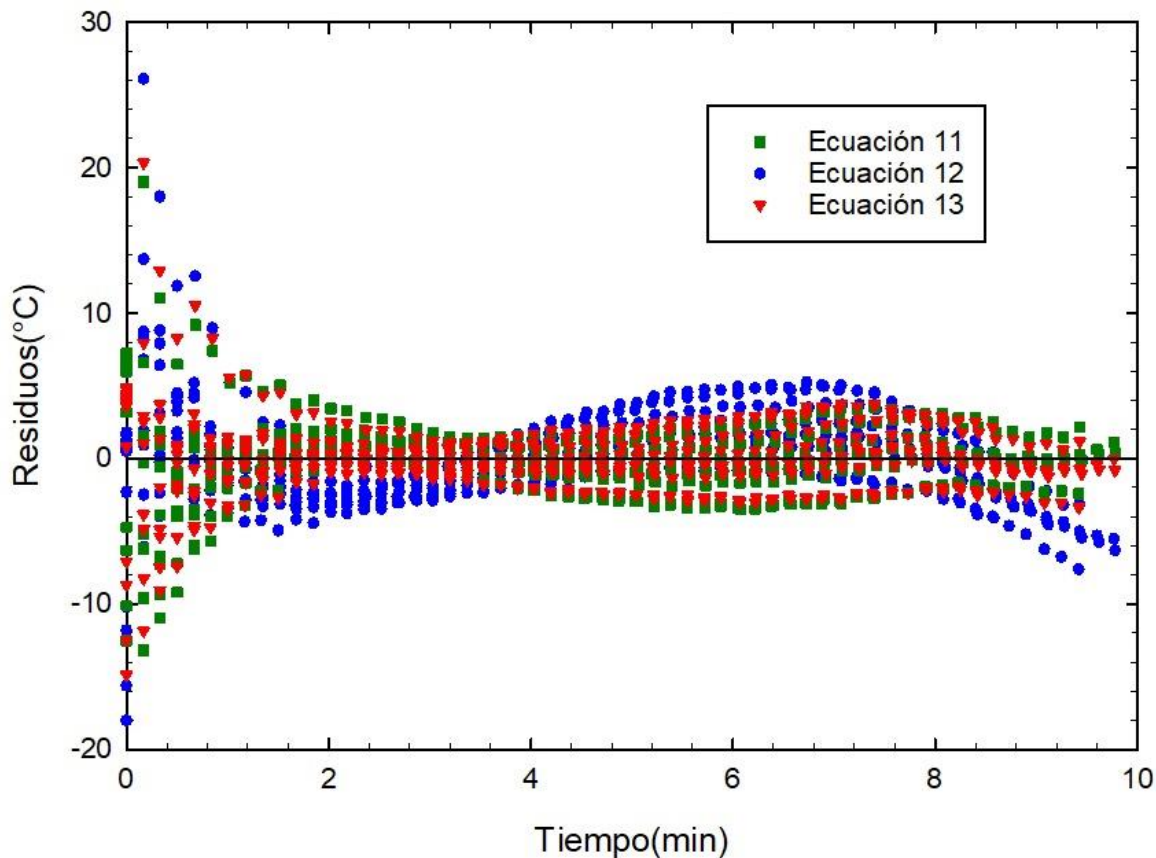
La duración de los tuestes aumentó con la temperatura final de tueste. De los datos obtenidos de la torrefacción del café lavado para ajustar el perfil de tueste se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro 12.

**Cuadro 12.** Análisis estadístico de las ecuaciones para el perfil de tueste en la torrefacción de café provenientes de beneficiado lavado.

Ecuación	$R^2_{adj}$	SEE	AR	P
Abarca, 2017 (11)	0,9770	2,7880	T	0
Barrantes et al, 2020 (12)	0,9645	3,4635	T	0
Propuesta (13)	0,9788	2,6781	A	0

SEE: error estándar de los estimados; AR: Análisis de residuos; P: cantidad de coeficientes que no pasaron el análisis del valor-p.

Se observa en el Cuadro 12 que las tres ecuaciones tuvieron un ajuste de  $R^2_{adj}$  superior a 0,96 y SEE menores a 3,5; la ecuación 19 tiene el mayor  $R^2_{adj}$  para los datos con un valor de 0,9788 y el mínimo SEE de 2,6781; la ecuación 17 obtiene un ajuste muy cercano con un  $R^2_{adj}$  0,9770 y SEE de 2,7880



**Figura 14.** Análisis de los residuos de café lavado para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de café en tostador convencional.

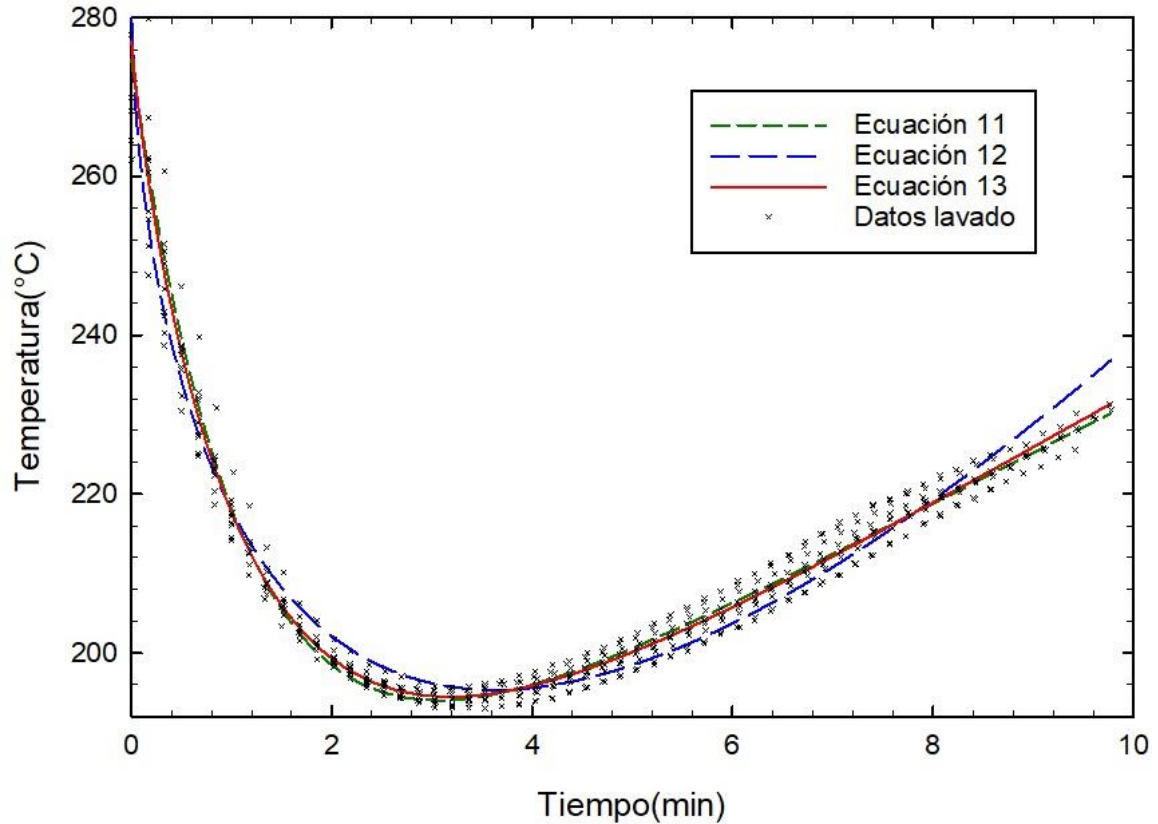
El análisis de residuos observados en la Figura 14 para la ecuación 11 y 12 es tendencioso y para la ecuación 13 es aleatorio y todos los coeficientes son estadísticamente relevantes para los modelos. En los primeros 2 minutos se observa en la Figura 14 que los residuos tienen un comportamiento de mayor magnitud para las tres ecuaciones utilizadas esto debido a que la temperatura del grano es 12 veces menor que la temperatura del aire del tostador y 14 veces menor que la pared del cilindro; Abarca (2017) obtuvo una diferencia de al menos 12 veces menor la temperatura del grano que la pared del cilindro usando el mismo tostador que en el presente trabajo; Vargas et al. (2016) determinó que el proceso es no isotérmico en los primeros 2,5 minutos en el tostador convencional rotativo con una masa de 350 g por lo cual los primeros minutos de la torrefacción ocurren en condiciones aleatorias, lo que

ocasiona un aumento en la complejidad del fenómeno de la transferencia de calor y la dificultad del modelo en ajustar en estos primeros momentos la temperatura del aire del tostador.

El análisis de residuos para el café lavado muestra que la ecuación 11 presenta un comportamiento tendencioso como se observa en la Figura 14 donde los residuos en los intervalos de tiempo de 2 a 4 se ubican más del lado positivo del eje y, 4 a 8 del lado negativo y 8 a 10 los residuos se ubican más del lado positivo. La ecuación 12 también presenta un comportamiento tendencioso pero contrario en los intervalos siendo en el intervalo de 2 a 4 negativo, 4 a 8 positivo y 8 a 10 negativo.

La ecuación 13 tiene un comportamiento aleatorio a lo largo del eje y donde sus valores de los residuos están distribuidos entre el lado positivo y negativo del eje y apegándose más a la forma de distribución de los residuos de igual manera en el lado positivo como negativo.

En la Figura 15 se muestra la tendencia del perfil de tueste para el café lavado con las temperaturas obtenidas en las tres repeticiones en el tostador convencional. Las líneas representan el ajuste para cada ecuación.



**Figura 15.** Ajustes para el perfil de tueste del café lavado en tostador convencional.

El valor mínimo registrado en el perfil de tueste fue de  $194,3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0$ , esto cumpliendo con la temperatura mínima debe exceder los  $190^{\circ}\text{C}$  por un mínimo periodo de tiempo para generar el ambiente necesario para el tueste según Schenker (2000); y para asegurar que ocurra un adecuado desarrollo del aroma y sabor del café la temperatura del perfil de tueste final debe ser mayor a  $190^{\circ}\text{C}$  según Schwartzberg (2013).

Se observa en la Figura 18 que la ecuación 12 no pasa por el centro de los datos obtenidos, las otras dos ecuaciones si pasan por el medio de los datos describiendo de forma gráfica el comportamiento del conjunto de datos obtenidos para el café lavado; lo cual coincide con las ecuaciones de mejor rendimiento estadístico de la ecuación 13 y la ecuación 11, siendo los valores ecuación 13 de  $R^2_{\text{adj}}$  de 0,9788 y un SEE de 2,6781; y la ecuación 11 un  $R^2_{\text{adj}}$  0,9770 y SEE de 2,7880.

### 4.2.3 Perfil de tueste de café miel

La duración de los tuestes aumentó con la temperatura final de tueste. De los datos obtenidos de la torrefacción del café miel para ajustar el perfil de tueste se obtuvo los resultados mostrados en el Cuadro 13.

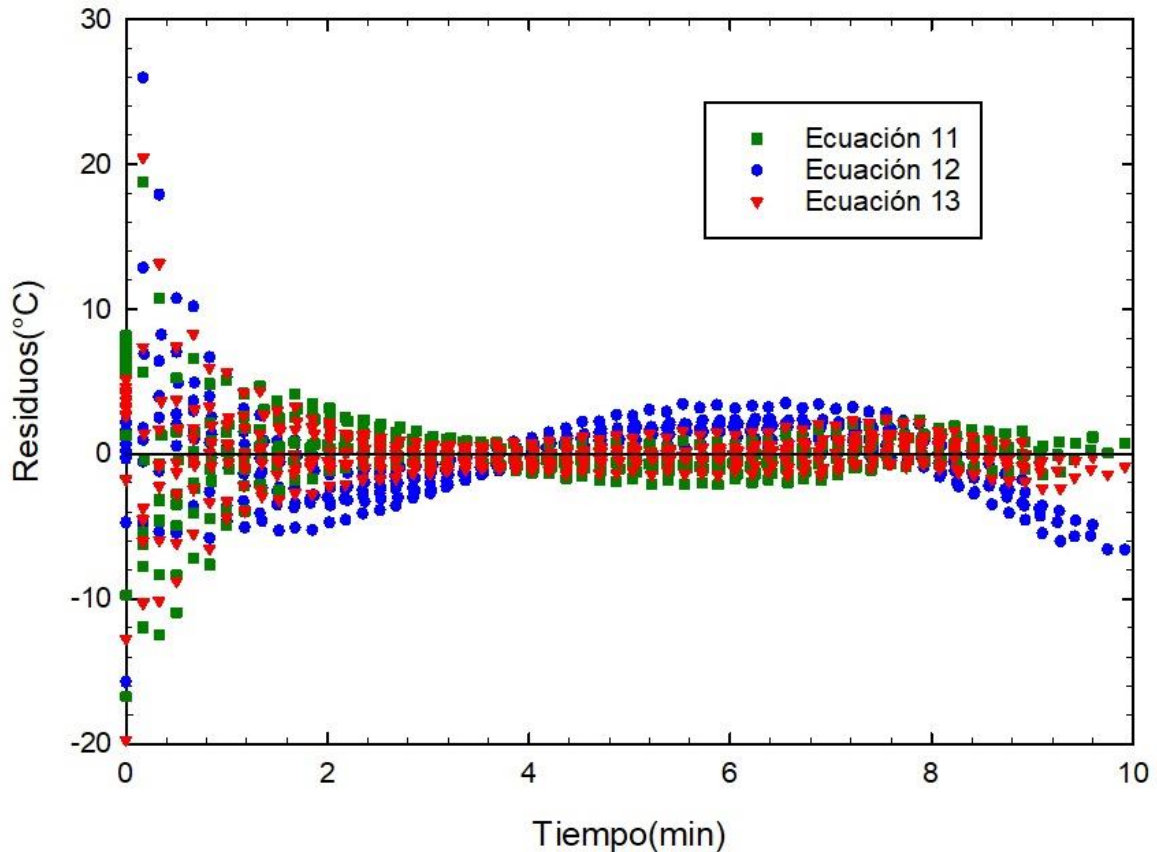
**Cuadro 13.** Análisis estadístico de las ecuaciones para el perfil de tueste en la torrefacción de café provenientes de beneficiado miel.

Ecuación	$R^2_{adj}$	SEE	AR	P
Abarca, 2017 (11)	0,9783	2,6880	T	0
Barrantes et al, 2020 (12)	0,9688	3,2249	T	0
Propuesta (13)	0,9811	2,5105	A	0

SEE: error estándar de los estimados; AR: Análisis de residuos; P: cantidad de coeficientes que no pasaron el análisis del valor-p.

Se observa en el Cuadro 13 que las tres ecuaciones tuvieron un ajuste de  $R^2_{adj}$  superior a 0,96 y SEE menores a 3,3; la ecuación 13 tiene el mayor  $R^2_{adj}$  para los datos con un valor de 0,9811 y el menor SEE de 0,5105; la ecuación 11 obtuvo un ajuste muy cercano con un  $R^2_{adj}$  0,9783 y SEE de 2,6880.



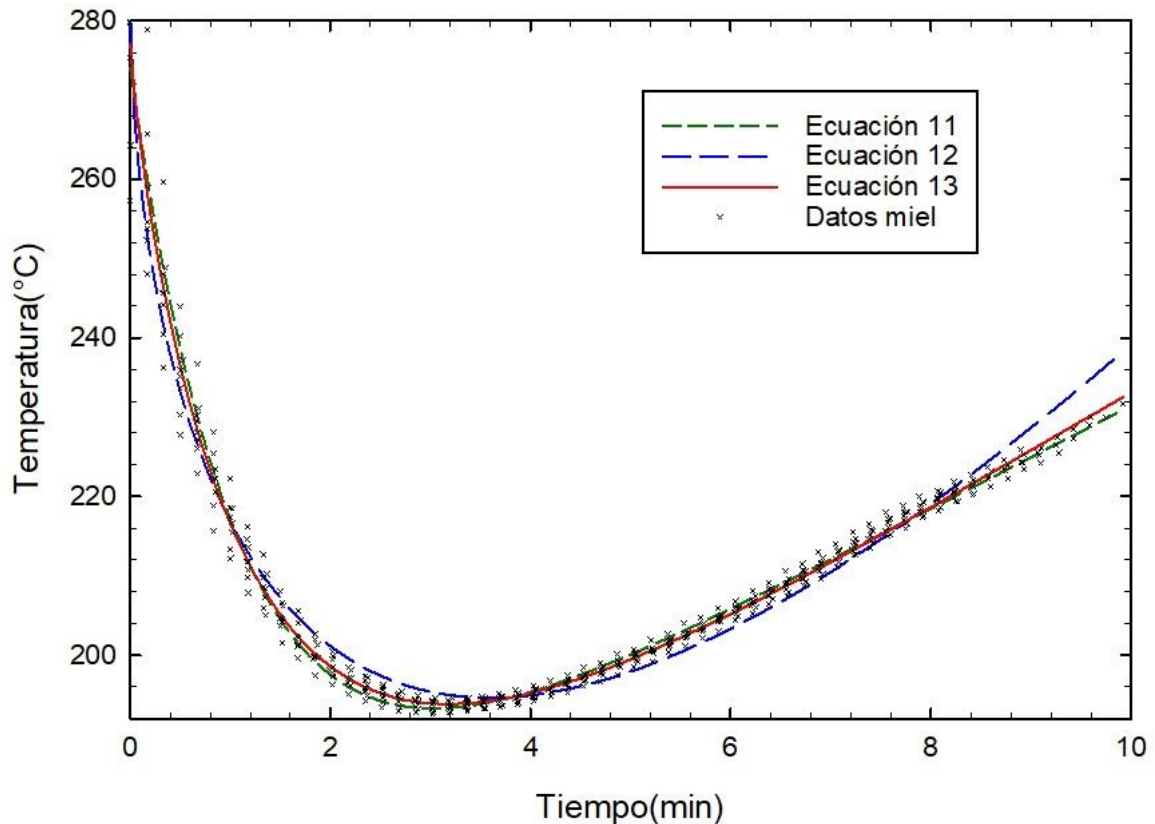


**Figura 16.** Análisis de los residuos de café miel para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de café en tostador convencional.

En el análisis de residuos mostrado en la Figura 16 se observa que para la ecuación 11 y 12 es tendencioso y para la ecuación 13 es aleatorio y todos los coeficientes de los modelos son estadísticamente relevantes para los modelos.

El análisis de residuos para el café miel muestra que para la ecuación 11 presenta un comportamiento tendencioso como se observa en la Figura 16 donde los residuos en los intervalos de tiempo de 2 a 4 se ubican más del lado positivo del eje y, 4 a 8 del lado negativo y 8 a 10 los residuos se ubican más del lado positivo. La ecuación 12 también presenta un comportamiento tendencioso pero contrario en los intervalos siendo en el intervalo de 2 a 4 negativo, 4 a 8 positivo y 8 a 10 negativo

La ecuación 13 tiene un comportamiento aleatorio a lo largo del eje y donde sus valores de los residuos están distribuidos entre el lado positivo y negativo del eje y apegándose más a la forma de distribución de los residuos de igual manera en el lado positivo como negativo.



**Figura 17.** Ajustes para el perfil de tueste del café miel en tostador convencional.

En la Figura 17 se muestra el ajuste resultante para cada ecuación a los datos del perfil de tueste obtenido para café miel en el tostador convencional. El valor mínimo registrado en el perfil de tueste fue de  $193,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,7$ , esto cumpliendo con la temperatura mínima debe exceder los  $190^{\circ}\text{C}$  por un mínimo periodo de tiempo para generar el ambiente necesario para el tueste según Schenker (2000); y para asegurar que ocurra un adecuado desarrollo del aroma y sabor del café la temperatura del perfil de tueste final debe ser mayor a  $190^{\circ}\text{C}$  según Schwartzberg (2013).

Se observa en la Figura 17 que la ecuación 12 no pasa por el centro de los datos obtenidos, las otras dos ecuaciones si pasan por el medio de los datos describiendo de forma gráfica el comportamiento del conjunto de datos obtenidos para el café miel; lo cual coincide con las ecuaciones de mejor rendimiento estadístico de la ecuación 13 y la ecuación 11, siendo los valores ecuación 13 de  $R^2_{adj}$  0,9811 y el menor SEE de 2,51; y la ecuación 11 un  $R^2_{adj}$  0,9783 y SEE de 2,69.

La ecuación 11 fue utilizada por Cerdas et al. (2020) para café *Red honey* y obtuvo en el ajuste del perfil de tueste con la apertura de gas total como en el presente trabajo de un  $R^2_{adj}$  de 0,9952, un SEE de 2,0006 resultados que indican un mejor ajuste a los obtenidos para la ecuación 11 en este trabajo tuvo un ajuste  $R^2_{adj}$  0,9783 y SEE de 2,6880.

#### 4.2.4 Perfil de tueste de café natural

De los datos obtenidos de la torrefacción del café natural para ajustar el perfil de tueste se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro 14.

**Cuadro 14.** Análisis estadístico de las ecuaciones para el perfil de tueste en la torrefacción de café provenientes de beneficiado natural.

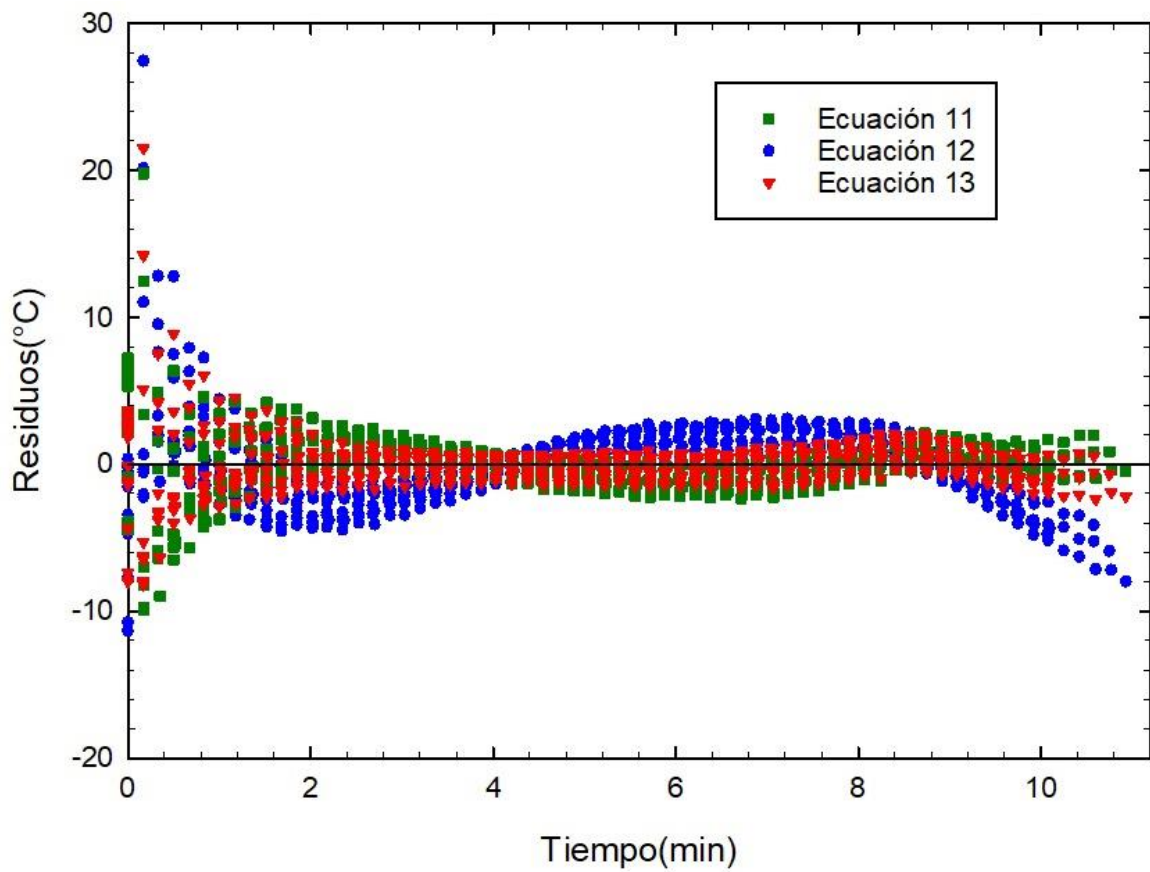
Ecuación	$R^2_{adj}$	SEE	AR	P
Abarca, 2017 (11)	0,9861	2,2641	T	0
Barrantes et al, 2020 (12)	0,9762	2,9591	T	0
Propuesta (13)	0,9892	1,9956	A	0

SEE: error estándar de los estimados; AR: Análisis de residuos; P: cantidad de coeficientes que no pasaron el análisis del valor-p.

Se observa en el Cuadro 14 que las tres ecuaciones tuvieron un ajuste de  $R^2_{adj}$  superior a 0,97 y SEE menores a 3,00; la ecuación 13 tiene el mayor  $R^2_{adj}$  para los datos con un valor de 0,9892 y el menor SEE de 2,00; la ecuación 11 obtuvo un ajuste muy cercano con un

$R^2_{adj}$  0,9861 y SEE de 2,2641; y todos los coeficientes de los modelos son estadísticamente relevantes para los modelos.

En el análisis de residuos mostrado en la Figura 18 se observó que para la ecuación 11 y 12 fue tendencioso, para la ecuación 13 es aleatorio; mostrando así su idoneidad para representar las temperaturas.

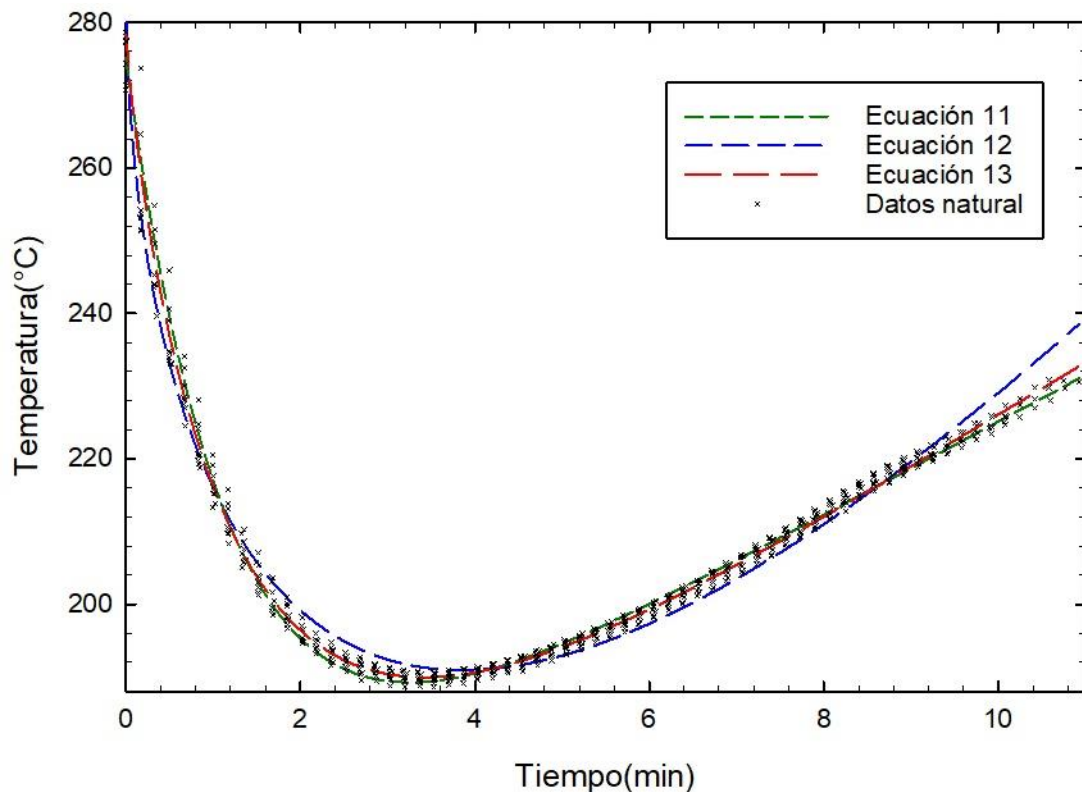


**Figura 18.** Análisis de los residuos de café natural para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de café en tostador convencional.

El análisis de residuos para el café natural muestra que para la ecuación 11 presenta un comportamiento tendencioso como se observa en la Figura 18 donde los residuos en los

intervalos de tiempo de 2 a 4 se ubican más del lado positivo del eje y, 4 a 8 del lado negativo y 8 a 10 los residuos se ubican más del lado positivo. La ecuación 12 también presenta un comportamiento tendencioso pero contrario en los intervalos siendo en el intervalo de 2 a 4 negativo, 4 a 8 positivo y 8 a 10 negativo.

La ecuación 13 tiene un comportamiento aleatorio a lo largo del eje y donde sus valores de los residuos están distribuidos entre el lado positivo y negativo del eje y apeándose más a la forma de distribución de los residuos de igual manera en el lado positivo como negativo.



**Figura 19.** Ajustes para el perfil de tueste del café natural en tostador convencional.

El valor mínimo registrado en el perfil de tueste fue de  $189,8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,7$ , esto por un momento breve de tiempo. Se observa en la Figura 19 que la ecuación 12 no pasa por el centro de los datos obtenidos, las otras dos ecuaciones si pasan por el medio de los datos describiendo de

forma gráfica el comportamiento del conjunto de datos obtenidos para el café natural; lo cual coincide con las ecuaciones de mejor rendimiento estadístico de la ecuación 13 y la ecuación 11, siendo los valores ecuación 13 de  $R^2_{adj}$  98,92 % y el menor SEE de 2,00; y la ecuación 11 un  $R^2_{adj}$  98,61 % y SEE de 2,26.

Los ajustes obtenidos de la ecuación 11 para describir el perfil de tueste para el tostador convencional en el trabajo de Abarca (2017) tuvo ajustes de  $R^2_{adj}$  superiores a 0,99, con SEE entre 1,00 y 1,66; también Barrantes et al. 2020 utilizaron la ecuación 11 y obtuvieron un  $R^2_{adj}$  de 0,995 y un SEE de 1,40; en el presente trabajo tuvo un ajuste de  $R^2_{adj}$  superiores a 0,97 y un SEE inferiores a 2,8.

La ecuación 12 fue utilizada por Barrantes et al. (2020) para café natural y obtuvo en el ajuste del perfil de tueste de café un  $R^2_{adj}$  de 0,9706, un SEE de 3,37 resultados muy similares a los obtenidos para la ecuación 12 en este trabajo los cuales tuvieron un ajuste  $R^2_{adj}$  superior a 0,96 y un SEE inferiores a 3,5.

Barrantes et al. (2020) obtuvieron para la ecuación 11 y 12 una tendencia aleatoria de los residuos y estos fueron graficados utilizando en el eje  $x$  la temperatura del tostador, en este trabajo se utiliza en el eje  $x$  el tiempo, esto debido a que los valores de las temperaturas se repiten a lo largo del proceso debido a la caída de temperatura del tostador al ingresar el café y la siguiente recuperación del calor durante la torrefacción lo que ocasiona que el análisis de residuos no sea tan claro al incluir dos partes del proceso; en cambio los tiempos tienen valores únicos en el proceso lo cual deja observar de forma más clara la tendencia de los residuos de cada ajuste.

#### **4.2.5 Análisis de las constantes de las ecuaciones para el perfil de tueste**

A continuación, se detallará en el Cuadro 15, 16 y 17 los valores obtenidos de las regresiones no lineales para las ecuaciones 17, 18 y 19.

**Cuadro 15.** Resumen de los coeficientes de la ecuación 11 para la torrefacción de café en un tostador convencional.

Beneficiado	Abarca, 2017 (11)			
	a (°C)	k (min <sup>-1</sup> )	b (°C/min)	c (°C)
Lavado	107,7640	0,8773	6,4789	166,8579
Miel	107,8768	0,8870	6,5282	166,1526
Natural	114,7305	0,8279	6,4628	160,4491

Donde  $a$ ,  $k$ ,  $b$  y  $c$  son coeficientes del modelo

Los coeficientes obtenidos mostrados en el Cuadro 15 son todos diferentes dependiendo del tipo de beneficiado del que vienen los granos. El valor de la ecuación 11 al momento 0 segundos, son los valores sumados de  $a$  y  $c$ , la ecuación respectivamente para lavado, miel y natural tendría valores de  $T$  iguales a: 274,6219; 274,0294 y 275,1796; valores los cuales sería la temperatura inicial del tueste teórica y muy cercanos a la real, siendo la temperatura real de inicio promedio de los tuestes de  $281,15 \text{ °C} \pm 0,61 \text{ °C}$ .

El coeficiente se relaciona inversamente con la velocidad del proceso, y la tendencia de los otros coeficientes no es clara; en el trabajo de Abarca (2017) el valor del coeficiente  $a$  también tiene este comportamiento, y además el coeficiente  $b$  y  $c$  son mayores entre más rápido es el proceso.

En el trabajo realizado por Abarca (2017) los coeficientes obtenidos para la ecuación 11 fueron respectivamente para los coeficientes  $a$ ,  $k$ ,  $b$  y  $c$ : 114,6875; 0,8170; 7,8544 y 164,7544; valores semejantes a los obtenidos en este trabajo para el café natural utilizado en el presente trabajo, el ajuste realizado por Abarca (2017) mencionado anteriormente y el presente trabajo fue realizado con muestras de 600 g de café.

Barrantes et al. (2020) utilizaron la ecuación 11 obteniendo valores de los coeficientes  $a$ ,  $k$ ,  $b$  y  $c$  de: 125,8995; 0,7844; 6,6034 y 157,2035; valores con diferencia a los obtenidos en el presente trabajo lo cual es esperable ya que este trabajo incluye los datos obtenidos por

Barrantes et al. (2020) junto con otras dos repeticiones más del experimento lo cual crea para el trabajo presente un set de datos más completo para generar un mejor ajuste de la ecuación 17.

Cerdas et al. (2020) también utilizaron la ecuación 11 con apertura total de gas y abertura parcial de gas con un café Catuaí rojo semi-seco red honey cultivado a 1800 msnm obteniendo valores de los coeficientes  $a$ ,  $k$ ,  $b$  y  $c$  respectivamente de: 129,6079; 0,7511; 4,8388; 157,0604 y 118,7918; 0,7850; 7,2805; 162,4012; los datos obtenidos son diferentes a los obtenidos en este trabajo, pero son particulares para el tipo de café y beneficiado utilizado.

**Cuadro 16.** Resumen de los coeficientes de la ecuación 12 para la torrefacción de café en un tostador convencional.

Beneficiado	Barrantes et al, 2020 (12)			
	$a$ (°C)	$k$ (min <sup>-1</sup> )	$d$	$b$ (°C/min)
Lavado	280,1278	0,3315	0,6200	16,8995
Miel	280,0325	0,3365	0,6130	16,8789
Natural	282,0449	0,3424	0,6053	15,8137

Donde  $a$ ,  $k$ ,  $d$  y  $b$  son coeficientes del modelo

Los coeficientes obtenidos mostrados en el Cuadro 16 son todos diferentes dependiendo del tipo de beneficiado del que vienen los granos. El valor de la ecuación 12 al momento 0 s es igual al coeficiente  $a$ , la ecuación respectivamente para lavado, miel y natural tendría valores de  $T$  iguales a: 280,1278; 280,0325 y 282,0449; valores los cuales sería la temperatura inicial del tueste teórica y muy cercanos a la real, siendo la temperatura real de inicio promedio de los tuestes de  $281,15 \text{ °C} \pm 0,61 \text{ °C}$ .

El coeficiente  $k$  es mayor entre más lento es el proceso y el coeficiente  $d$  y  $b$  son mayores entre más rápido es el proceso de tueste; en el trabajo realizado por Barrantes et al. (2020) los coeficientes obtenidos para la ecuación 12 fueron respectivamente para los coeficientes



$a$ ,  $k$ ,  $d$  y  $b$ : 290,7485; 0,3531; 0,6295 y 16,2184 ; valores semejantes a los obtenidos en este trabajo para el café natural utilizado en el presente trabajo, el ajuste realizado por Barrantes et al. (2020) y el presente trabajo fue realizado con muestras de 600 g y con café de la misma finca y cosecha.

**Cuadro 17.** Resumen de los coeficientes de la ecuación 13 para la torrefacción de café en un tostador convencional.

Beneficiado	Propuesta (13)				
	$a$ (°C)	$k$ (min <sup>-1</sup> )	$d$	$b$ (°C/min)	$c$ (°C)
Lavado	116,3597	0,8476	0,8874	7,2181	160,6314
Miel	119,0658	0,8456	0,8611	7,4909	157,9749
Natural	126,7289	0,8017	0,8552	7,3709	151,9527

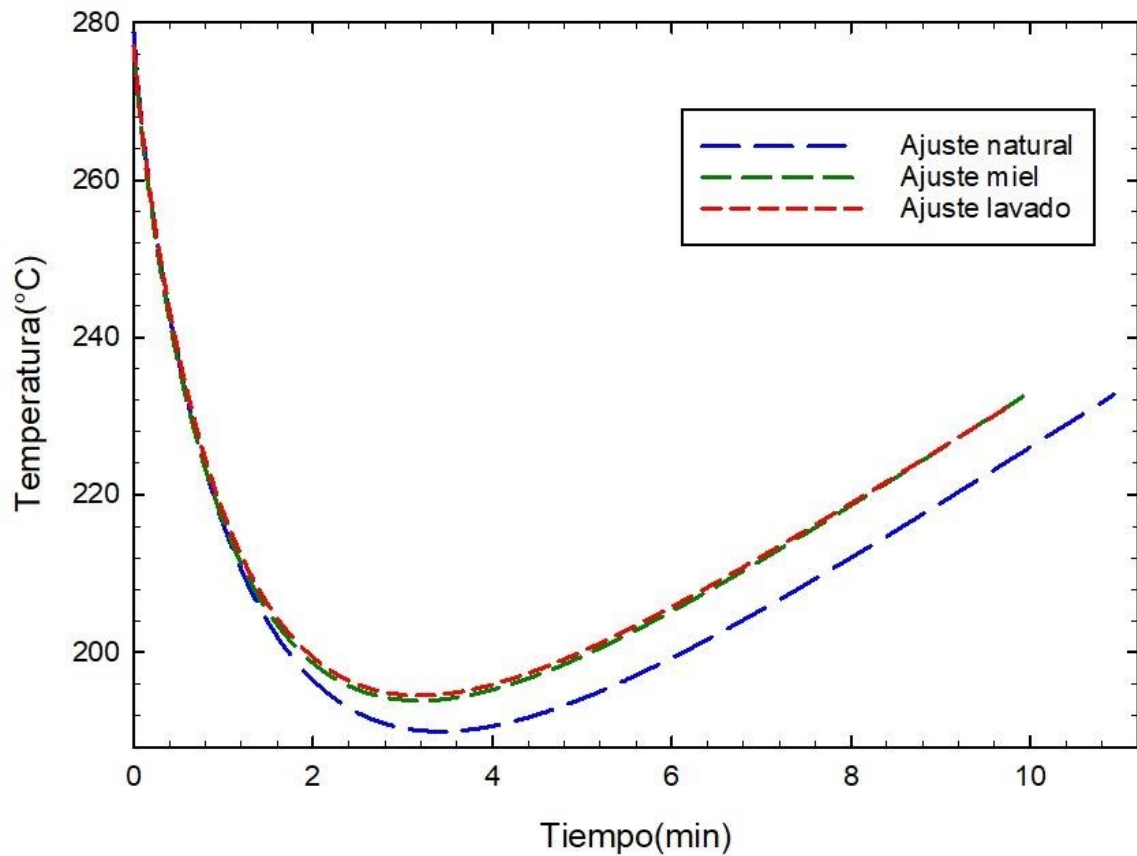
Donde  $a$ ,  $k$ ,  $d$ ,  $b$  y  $c$  son coeficientes del modelo

Los valores de todos los coeficientes de la ecuación 13 mostrados en el Cuadro 17 son diferentes para cada tipo de beneficiado realizado en las condiciones del experimento en un tostador convencional. Se observa para la ecuación 13 que el comportamiento del coeficiente  $k$ ,  $d$  y  $c$  incrementan proporcionalmente a la rapidez del proceso de tueste; y el coeficiente  $a$  es inversamente proporcional a la rapidez del proceso del tueste el tueste.

El valor de la ecuación 13 al momento 0 s es igual al coeficiente  $a$ , la ecuación respectivamente para lavado, miel y natural tendría valores de  $T$  iguales a: 276,991; 277,0407 y 278,6816; valores los cuales sería la temperatura inicial del tueste teórica y más cercanos a la real que la ecuación 11, siendo la temperatura real de inicio promedio de los tuestes de  $281,15 \pm 0,61$  °C.

La ecuación 13 es propuesta en este trabajo para corregir el comportamiento de los residuos observados en las Figuras 19, 20 y 21, el símbolo asignado a cada coeficiente son los mismos que para las ecuaciones 11 y 12 para mantener la uniformidad y facilitar su comparación. Debido a esto se puede observar si los comportamientos de las constantes en

la ecuación 11 y 12 se conservan o cambian en la ecuación 13. En las tres ecuaciones trabajadas el coeficiente  $a$  es mayor entre más dure el tueste, el coeficiente  $c$  es mayor entre más rápido sea el tueste en la ecuación 11 y 13; y el coeficiente  $d$  es mayor entre más rápido sea el tueste en la ecuación 12 y 13.



**Figura 20.** Perfil de tueste descrito por la ecuación 3 propuesta para la torrefacción en tostador convencional de los granos de café procesado en tres métodos.

En la Figura 20 se muestra el resultado del ajuste de la ecuación 13 para cada tipo de grano beneficiado utilizado, se observa que la caída de la temperatura del aire en el tostador tiene una caída de 87 °C y 88 °C para el miel y el lavado respectivamente a los 3 min y 91 °C para el natural a los 3,5 minutos, resultado obtenido por Abarca (2017) con una masa de

600 g es de una caída de temperatura de 74 °C y para 800g de 91 °C siendo este resultado más cercano al obtenido en el experimento realizado en este trabajo.

La concavidad de las curvas obtenidas para el tueste de café proveniente de distintos tipos de beneficiado es semejante a datos obtenidos de tueste de granos de café realizados por Abarca (2017) con la ecuación 11 para un mismo café con una masa de 600 g y un tiempo de tueste de 10 minutos obtuvo una temperatura cercana a los 245 °C; bajo las mismas condiciones de masa, el mismo tostador y un tiempo de tueste de 10 minutos se obtuvo para el café natural una temperatura de 225 °C y para el café miel y lavado el proceso de tueste tuvo duraciones inferiores a los 10 minutos y con temperatura final de 230 °C.

Vargas (2019) obtuvo semillas de cacao en el mismo tostador y una masa de 500 g curvas cóncavas con la ecuación 11 obteniendo una concavidad más leve con temperaturas finales cercana al tueste de 220 °C debido a las características físicas del grano.

De los resultados discutidos para café lavado, miel y natural se observó que el rendimiento de la ecuación 13 tuvo un mejor ajuste a los datos obtenidos de la torrefacción del grano con los tres tipos de procesamiento de café usados; además se resalta que los tres modelos obtuvieron un mejor resultado de ajuste para el café natural luego para el café miel y por último para el café lavado.

#### **4.2.6 El calentamiento de los granos durante el tueste**

En el Cuadro 18 se muestra el resumen de los resultados estadísticos obtenidos al ajustar la ecuación 14 y 15 a los datos obtenidos para el calentamiento de los granos durante la torrefacción en un horno convencional. La temperatura inicial de los granos es de 23,1 °C y la temperatura de la pared del tostador al momento de introducir los granos es de 320 °C.

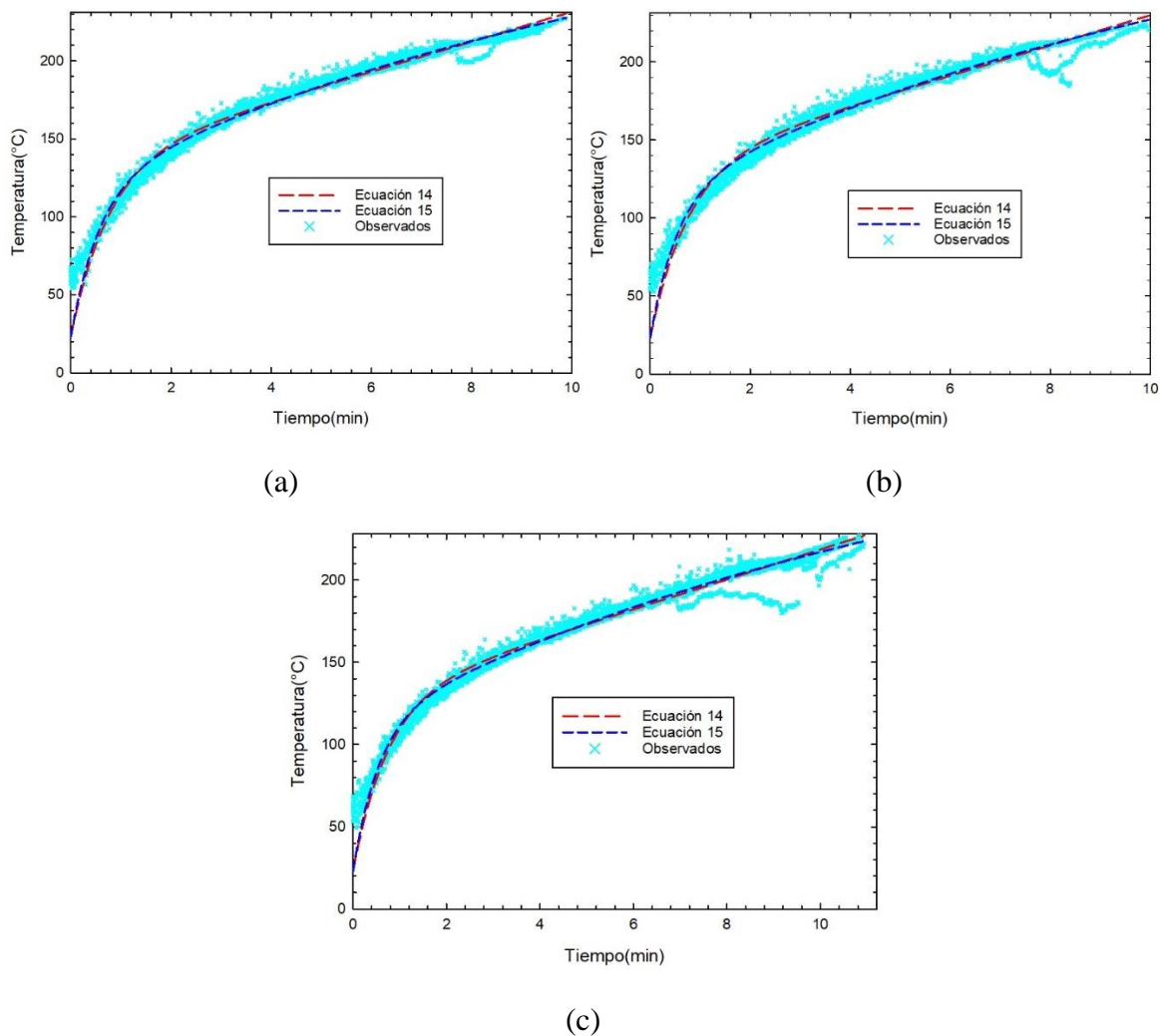
**Cuadro 18.** Análisis estadístico del ajuste del perfil de tueste en la torrefacción de café provenientes de tres tipos de beneficiado.

Ecuación	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	SEE	AR	P
Lavado				
Abarca, 2017 (14)	0,9735	6,1037	A	0
Vargas, 2014 (15)	0,9775	5,6335	A	0
Miel				
Abarca, 2017 (14)	0,9666	6,9996	A	0
Vargas, 2014 (15)	0,9714	6,4749	A	0
Natural				
Abarca, 2017 (14)	0,9704	6,4707	A	0
Vargas, 2014 (15)	0,9747	5,9889	A	0

SEE: error estándar de los estimados; AR: Análisis de residuos; P: cantidad de coeficientes que no pasaron el análisis del valor-p.

Se observa en el Cuadro 18 que el R<sup>2</sup><sub>adj</sub> es muy similar para las dos ecuaciones, siendo superior el R<sup>2</sup><sub>adj</sub> de la ecuación 15 en todos los casos evaluados, la ecuación 15 es la que tiene la menor cantidad de coeficientes. El error estándar de los estimados es menor en todos los beneficiados para la ecuación 15 y todos los coeficientes de la ecuación son estadísticamente relevantes con un P<0,0001.

Abarca (2017) obtuvo para la ecuación 14 un R<sup>2</sup><sub>adj</sub> de 0,9947 y SEE de 3,2930 datos que representan un mejor ajuste a los datos medidos en el presente trabajo. Para la ecuación 14 Abarca obtuvo un R<sup>2</sup><sub>adj</sub> de 0,9961 y un SEE de 2,8053 un ajuste más alto que el obtenido en el presente trabajo, las condiciones de trabajo del tostador registradas por abarca fue una temperatura inicial de los granos de 24,7 °C y de la pared del tostador de 333,6 °C las cuales en los dos casos son mayores a las utilizadas de 23,1 °C y 320 °C respectivamente. En las Figuras 21 se muestra el ajuste con los datos obtenidos durante el experimento realizado para las ecuaciones 14 y 15 para cada tipo de beneficiado.

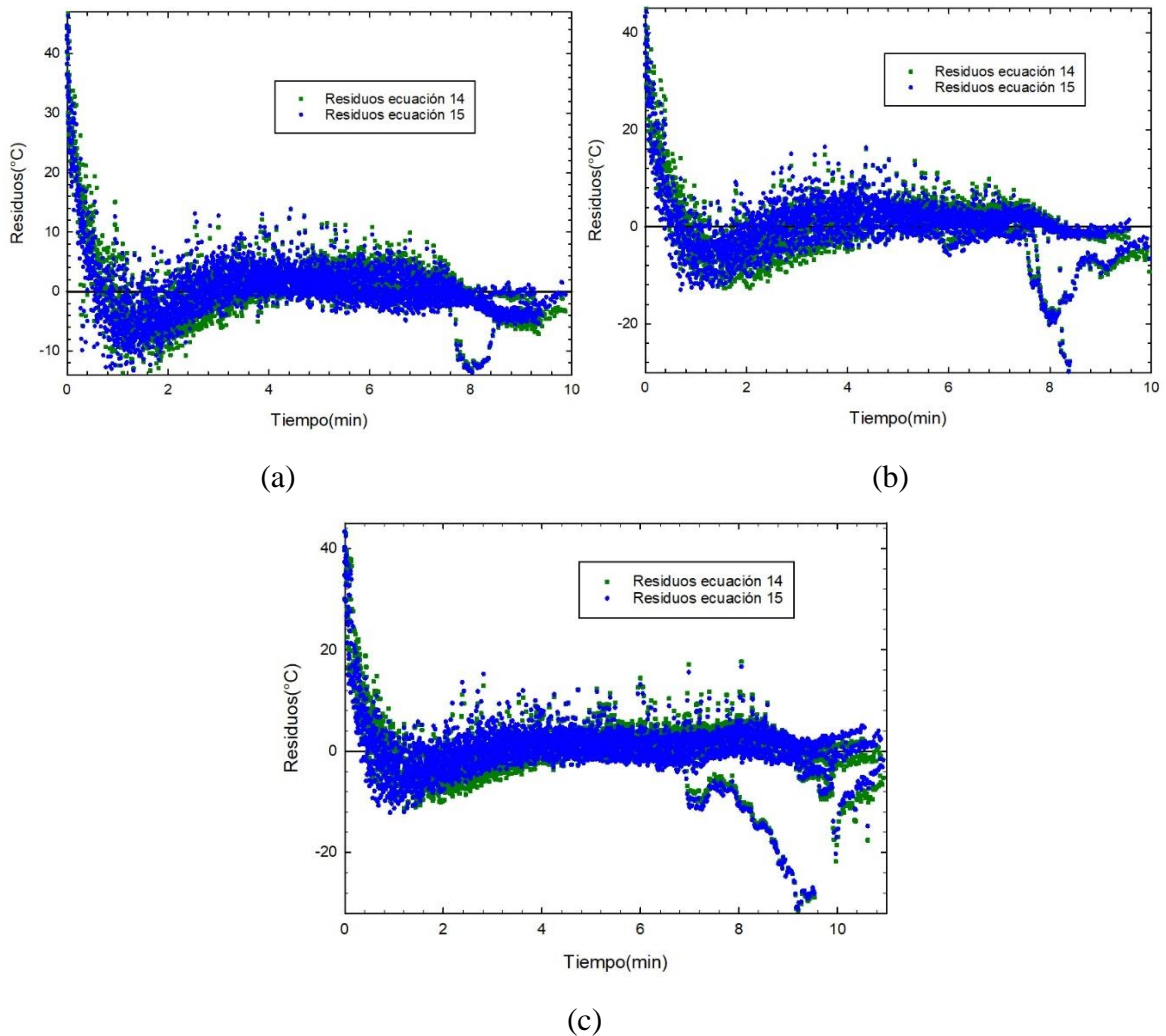


**Figura 21.** Ajuste del calentamiento de los granos para el café: (a) lavado (b) miel y (c) natural.

Las dos ecuaciones utilizadas describen de una manera adecuada los datos obtenidos, al observarlas gráficamente se dificulta su diferenciación debido a esto. Según los resultados estadísticos mostrados la ecuación con el mejor ajuste a los datos es la ecuación 15.

#### 4.2.7 Análisis de residuos del calentamiento de los granos

En la Figura 22 se muestra el análisis de residuos realizado para las ecuaciones 14 y 15 para cada tipo de beneficiado.



**Figura 22.** Análisis de los residuos para el calentamiento del café: (a) lavado (b) miel y (c) natural.

En la Figura 22 se observó el comportamiento aleatorio de los residuos para el calentamiento de los granos durante el tueste siendo los datos distribuidos alrededor del valor 0 en el eje en su mayoría, se destaca el comportamiento de las gráficas de residuos en los primeros 25 segundos de tueste donde se observa que el valor obtenido por los ajustes es mucho menor al medido con el láser teniendo una diferencia en el momento inicial de 40 °C con una

tendencia a infravalorar la temperatura del tueste, esta diferencia tiene un comportamiento descendiente durante el transcurso de estos primeros 25 segundos, Abarca (2017) concluye que los datos obtenidos al inicio de tueste no se ajustan necesariamente al modelo, debido a que hay un comportamiento poco uniforme al inicio del proceso de torrefacción. Estos son valores más altos que los calculados por el ajuste debido a que los ajustes calculan el incremento de temperatura de los granos desde su valor inicial medido antes de introducirlos al tostador el cual es de 23,1 °C lo que quiere decir que debido a la inestabilidad del proceso al inicio del tueste donde los granos con esta temperatura entran al horno el cual tiene una temperatura en su pared interna de 320 °C y una temperatura del aire de 280 °C condiciones las cuales generan reacciones. Bustos (2015) menciona que son ocasionados por fuentes de ganancia o pérdida de energía causando que los modelos subestimen o sobreestimen el valor de la temperatura del grano principalmente en los momentos iniciales de la torrefacción.

Los residuos a partir de transcurridos 25 segundos tienen un comportamiento aleatorio, además se observó que cuando la medición de los datos se estabiliza esta registra el momento en que la temperatura de los granos ya supera los 50 °C.

Se observó que después de los 8 minutos en una de las repeticiones los datos obtenidos por el medidor láser presentaron una caída en la temperatura, esto sucedió en cada caso en 1 de los 9 tuestes utilizados para los ajustes de los beneficiados, este comportamiento anormal puede ser debido a un desajuste de la posición del medidor por el movimiento de la mesa donde está ubicado el equipo ya que es un comportamiento anómalo con respecto al conjunto de datos.

#### **4.2.8 Resumen del análisis estadístico del calentamiento de los granos**

En los Cuadros 19 y 20 se muestran el valor de los coeficientes obtenidos para las ecuaciones 14 y 15 al ser ajustadas a los datos de la torrefacción del café.

**Cuadro 19.** Coeficientes del ajuste de la ecuación 14 para calentamiento de los granos en la torrefacción de café provenientes de tres tipos de beneficiado.

Abarca, 2017 (14)	Coeficientes			
	a (°C/min)	b (min <sup>-1</sup> )	K <sub>0</sub> (°C/min)	T <sub>0</sub> (°C)
Lavado	-146,4725	1,3023	9,5987	23,1
Miel	-145,1376	1,3187	9,6807	23,1
Natural	-140,9280	1,3470	9,0954	23,1

Donde  $a$ ,  $b$ ,  $K_0$  y  $T_0$  son coeficientes del modelo

Se observa en el Cuadro 19 que las variables son diferentes para los tres tipos de beneficiado, el coeficiente  $b$  incrementa inversamente proporcional a la rapidez de tueste y el coeficiente  $a$  incrementa inversamente proporcional a la rapidez del tueste.

Abarca (2017) obtuvo valores para  $a$ ,  $b$  y  $K_0$  utilizando 600 g de masa y con temperatura inicial de tueste de 280°C, fueron respectivamente de -119,2672; 1,0210 y 11,3073 y el valor de  $T_0$  fue de 24,7°C. La temperatura inicial del grano es mayor a los datos registrados en el experimento que fueron de 23,1°C y 320°C.

**Cuadro 20.** Coeficientes del ajuste de la ecuación 15 para calentamiento de los granos en la torrefacción de café provenientes de tres tipos de beneficiado.

Vargas, 2014 (15)	Coeficientes				
	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	S (°C/min)	B (min <sup>-1</sup> )	K (min <sup>-1</sup> )
Lavado	23,1	320,0	158,0226	0,0792	1,7459
Miel	23,1	320,0	161,2349	0,0795	1,8428
Natural	23,1	320,0	155,0479	0,0706	1,8221

Donde  $T_0$ ,  $T_a$ ,  $S$ ,  $B$  y  $K$  son coeficientes del modelo

Abarca (2017) obtuvo valores para  $S$ ,  $B$  y  $K$  utilizando 600 g de masa y con temperatura inicial de tueste de 280°C, fueron respectivamente de 121,4838; 0,0984 y 1,4887 y los valores  $T_0$  y  $T_a$  fueron de 24,7°C y 333,6°C. Tanto la temperatura inicial del grano como la



temperatura de la pared del tostador son mayores a los datos registrados en el experimento que fueron de 23,1°C y 320°C.

Se observa en el Cuadro 20 que las variables son diferentes para los tres tipos de beneficiado, el coeficiente B tiene un valor más elevado para los casos del café miel y lavado con una diferencia de 0,0003 min<sup>-1</sup> y el coeficiente S y K no tienen una tendencia observable pero su valor más alto se da en ambos casos para el café miel.

**Cuadro 21.** Coeficientes del ajuste del calentamiento de los granos en la torrefacción de café provenientes de tres tipos de beneficiado.

Abarca (2017)				
M(g) en el tostador	S (°C/min)	B (min <sup>-1</sup> )	K (min <sup>-1</sup> )	Z (°C)
400	160,9260	0,1558	2,0368	-85,5534
600	121,4828	0,0984	1,4887	-87,3788
800	102,0262	0,0751	1,3426	-80,4940
1000	84,0038	0,0575	1,1132	-79,5717
Vargas(2014)				
T(°C) de tueste	S (°C/min)	B (min <sup>-1</sup> )	K (min <sup>-1</sup> )	Z (°C)
380	1750,1201	0,1016	18,6636	-94,2851
345	623,7103	0,0699	7,2128	-87,3189
310	575,3081	0,0539	6,5047	-89,1840
290	252,0365	0,0482	3,3079	-77,3189
Presente trabajo				
Beneficiado	S (°C/min)	B (min <sup>-1</sup> )	K (min <sup>-1</sup> )	Z (°C)
Lavado	158,0226	0,0792	1,7459	-94,8117
Miel	161,2349	0,0795	1,8428	-91,4393
Natural	155,0479	0,0706	1,8221	-88,5229

En el Cuadro 21 se muestran los resultados obtenidos por Abarca (2017) y Vargas (2014) juntos con los del presente trabajo para los valores de los coeficientes S, B y K, además se calculó para cada uno los valores del coeficiente Z propuesto en este trabajo. Se observa que los valores más altos de Z en cada experimento siendo estos -79,5717; -77,3189 y -

88,5229 pertenecen al tueste que dura más tiempo en terminar siendo respectivamente la masa de 1000 g de granos, la temperatura de tueste de 290°C y el beneficiado natural respectivamente para las variables observadas en cada uno de los experimentos.

En la ecuación 15 el valor S, B y K no parecen tener una relación clara producto de la diferencia de sus propiedades físicas ocasionadas por el diferente tratamiento de beneficiado recibido; se observa que los coeficiente S, B y K se encuentran agrupados de la forma  $S/(B-K)$  el valor de esta operación tiene como resultado para el tueste de café lavado, miel y natural respectivamente a -94,8817, -91,4393 y -88,5229, este valor sí tiene un comportamiento a incrementar entre más tarda en completarse el tueste y se le llamará el coeficiente Z.

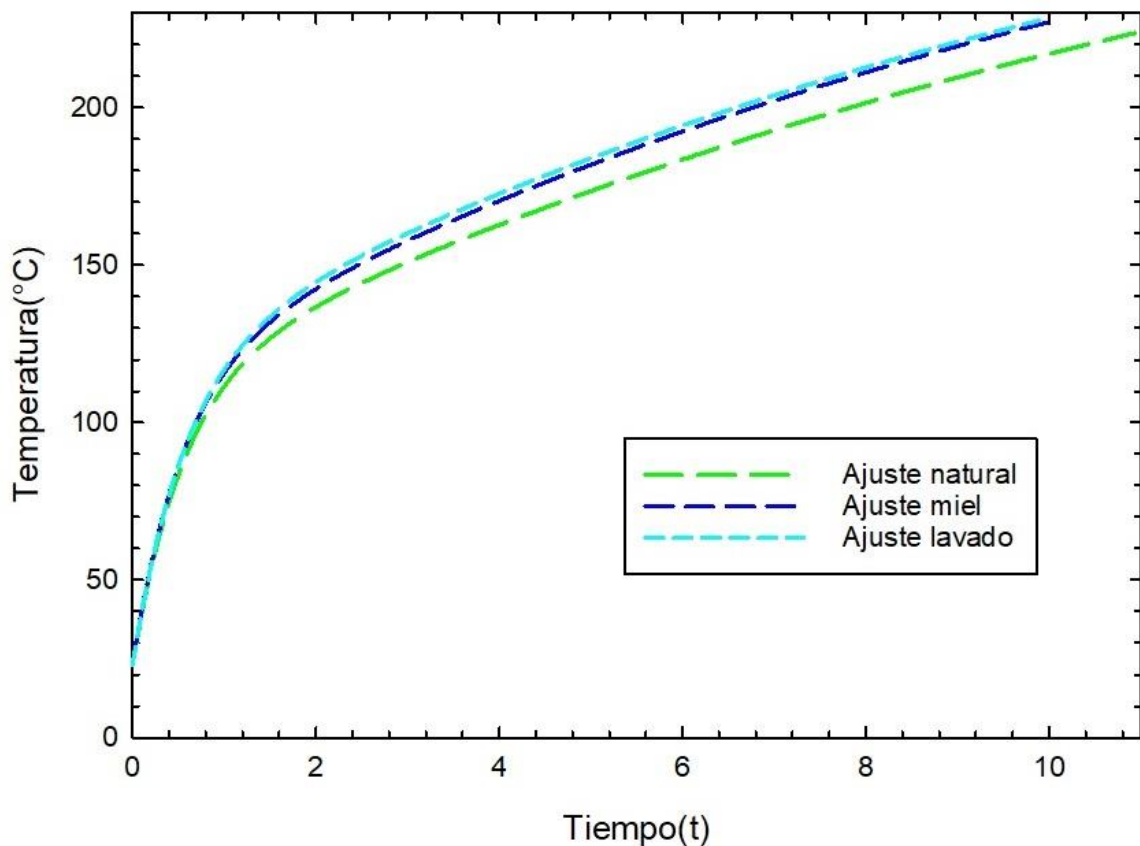
En los valores obtenidos del coeficiente Z con los datos de Abarca (2017) hay una tendencia creciente al aumentar la masa en el tostado y el tiempo de tueste si solo se observa los valores para un conjunto de 3 de las masas utilizadas ya que al observar las dos masas más pequeñas utilizadas el coeficiente Z entre la masa de 400 g y 600 g no presenta este comportamiento creciente.

En los valores obtenidos del coeficiente Z con los datos de Vargas (2014) hay una tendencia creciente al usar una temperatura de tueste menor lo cual aumenta la duración del tueste si solo se observar los valores de temperatura de tueste extremos, al observar las temperaturas de tueste intermedias se ve que el coeficiente Z entre la temperatura de tueste de 345 °C y 310 °C no presenta este comportamiento creciente.

De igual forma ocurre en los datos obtenidos para la torrefacción de café natural, miel y lavado donde el valor Z del café natural es mayor y es el tipo de café que requiere de más tiempo en completar el tueste, el café lavado tiene una menor resistencia a la transferencia de calor por lo cual completa su proceso de torrefacción en menos tiempo.

El valor de Z es determinado utilizando los coeficientes S y B definidos por Pabis, Jayas, & Cenkowski (1998) como una sustitución para simplificar la ecuación 5, siendo el valor de estos asociados a propiedades físicas y térmicas del material que se calienta y del ambiente y el valor K es la constante de secado del modelo. De estos tres experimentos y de los factores teóricos que están representado en el coeficiente Z se puede concluir que el comportamiento de Z puede asociarse a la resistencia a la transferencia de calor y masa de los granos que ocurre en la torrefacción.

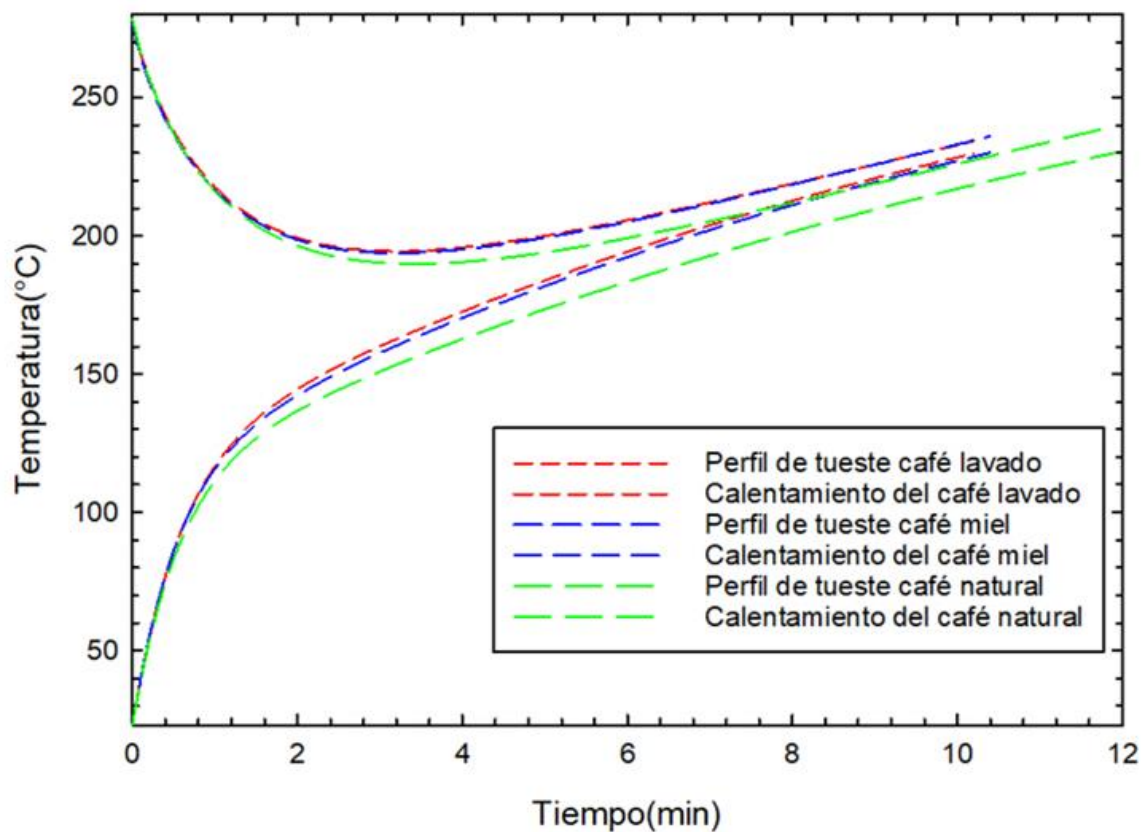
En la Figura 23 se muestra los ajustes realizados a la ecuación 21 de cada uno de los casos de estudiados.



**Figura 23.** Ajuste del calentamiento de los granos de tres tipos de beneficiado para la ecuación 15.

Se mantiene la relación observada en la Figura 20 en la Figura 23 notándose que el proceso de torrefacción fue particular para cada una de las formas de beneficiado de los granos, en la Figura 23 se observa la diferencia del ajuste de la ecuación 15 para el calentamiento de los granos hasta una temperatura final de tueste de 230 °C.

En la Figura 24 se resumen los ajustes obtenidos del perfil de tueste y del calentamiento de los granos.



**Figura 24.** Ajuste del perfil de tueste y del calentamiento de los granos provenientes de tres tipos de beneficiado para la ecuación 13 y 15.

En la Figura 24 se resalta el comportamiento constante de la diferenciación entre cada uno de los beneficiados siendo los ajustes para el café lavado los que registran un aumento de la temperatura más rápido y el café natural el que dura más en subir su temperatura.

Se resalta en la Figura 24 que la temperatura del perfil de tueste siempre es mayor que la temperatura del grano, durante el tostado, estas se acercan a un equilibrio térmico entre el grano y el aire del tostador; la diferencia de temperatura entre el grano y el aire del tostador al final del tueste de 230 °C para el café lavado, miel y natural es respectivamente de 4,5; 6 y 9 °C este comportamiento es diferente del obtenido por Schwartzberg (2002) donde las gráficas se intersecan y después la temperatura medida del grano es menor a la temperatura registrada en el perfil de tueste y Schwartzberg (2013) obtiene un resultado semejante. Los trabajos realizados por Schwartzberg (2002) y Schwartzberg (2013) fueron realizados con tostadores donde el flujo de aire calentado por el gas fue directo a la cámara de tueste, en el caso del tostador utilizado en este trabajo la transferencia de calor de la combustión del gas pasa por la pared metálica en contacto con los granos.

En el Cuadro 22 se adjunta un resumen con los modelos seleccionados para los procesos de secado y torrefacción.

**Cuadro 22.** Modelos seleccionados para describir los procesos de secado y torrefacción.

Proceso	Ecuación			
Secado	Page modificada (Ecuación 10)			
	$RX(t) = \exp(-(k * t)^n)$			
Laboratorio	Coefficientes	Lavado	Miel	Natural
	n	1,6372	1,1098	0,9307
Finca	k(1/h)	0,0107	0,0122	0,0137
	n	1,3163	1,2228	1,1435
Finca	k(1/h)	0,0221	0,0208	0,0168
	Propuesta (Ecuación 13)			
$T(t) = a * \exp^{-k*t^d} + b * t + c$				
Perfil de tueste	Coefficientes	Lavado	Miel	Natural
	a (°C)	116,3597	119,0658	126,7289
	k (min <sup>-1</sup> )	0,8476	0,8456	0,8017
	d	0,8874	0,8611	0,8552
	b (°C/min)	7,2181	7,4909	7,3709
	c (°C)	160,6314	157,9749	151,9527
Vargas, 2014 (Ecuación 15)				
$T(t) = T_a + \frac{S}{B-K} * [\exp(-K * t) - \exp(-B * t)] + (T_0 - T_a) * \exp(-B * t)$				
Calentamiento	Coefficientes	Lavado	Miel	Natural
	T0 (°C)	23,1	23,1	23,1
	Ta (°C)	320	320	320
	S (°C/min)	158,0226	161,2349	155,0479
	B (min <sup>-1</sup> )	0,0792	0,0795	0,0706
	K (min <sup>-1</sup> )	1,7459	1,8428	1,8221

### 4.3 Análisis de las propiedades físicas de los granos de café

#### 4.3.1 Secado en laboratorio (CIGRAS)

Durante el proceso de secado solar en laboratorio se registró con el termo higo registrador una humedad relativa promedio de  $71,4 \pm 5,5$  %, con la que se utilizó la ecuación para calcular el contenido de humedad de equilibrio a la hora de cada medición del experimento de secado y se encontró que el promedio de esta fue de  $13,6 \pm 1,8$  % para café miel y lavado, y de  $13,8 \pm 1,8$  % para el café natural, además se obtuvo los datos de la estación para el

secado en laboratorio la temperatura fue de 19,8 °C, no se registró lluvias, la humedad fue de 71,74 % y rapidez del viento de 8,5 km/h; se observa que la humedad relativa obtenida por la estación meteorológica y el hobo son semejantes entre sí. Con los datos de la humedad de equilibrio del café en el secado se obtiene por la ecuación la humedad al inicio del secado que se muestran en el Cuadro 23.

**Cuadro 23.** Contenidos de humedad teóricos para el café secado solar laboratorio.

Fuente	Presente trabajo		Montilla et al. (2008)	Gómez (2019)
	CHi	CHf	CHi (%b.h)	CHi
Natural	66,76 ± 1,28	13,83	67,5 - 70,20	64,54 ± 0,79
Miel	56,77 ± 0,20	13,62	57,12 - 59,67	52,81 ± 0,36
Lavado	49,72 ± 0,27	13,62	50,40 - 50,91	49,08 ± 0,77

El contenido de humedad de equilibrio para el café pergamino obtenido por el beneficiado fue calculado en 13,62 % b.h. (ecuación 13), usado como el equilibrio teórico para los beneficiados miel y natural, se obtiene que los contenidos de humedad final mostrados en el Cuadro 23 sean superiores al recomendado para almacenamiento es un 12,0 % b.h. sin embargo, su uso fue inmediato. (IICA, 2010)

El contenido de humedad inicial mostrado en el Cuadro 23 fue estimado con la pérdida de masa, se obtuvo que el natural presentó mayor contenido de humedad, seguido de miel y con el menor valor el café lavado; el café natural conserva toda la cobertura del fruto, el miel una parte del mucílago y el lavado no conserva nada del mucílago, estos resultados son aproximados a los rangos presentado por Montilla et al. (2008) y Gómez (2019).

La duración del secado en laboratorio registrada para el proceso natural fue de 400 horas, para el proceso miel de 300 h y para el proceso lavado de 230 h, coincide con que el producto que inicialmente tenía más humedad al inicio del secado requiere de más tiempo, resultado que coincide con la observación realizada por Siqueira et al. (2017) donde en el secado de

café natural y el secado de café desmucilaginado utilizaron aire forzado, también se observó que a una misma temperatura el café con contenido de humedad inicial más alto requirió de más tiempo para terminar el secado con variaciones de incremento de 1 a 2 horas entre las humedades iniciales de 17, 22, 29 y 36 % b.h. obtenidos con una temperatura del aire de 40 C, a una temperatura de aire de 35 C se obtuvo diferencias entre 2 a 6 horas entre las humedades iniciales.

**Cuadro 24.** Características físicas del café antes y después del secado solar en laboratorio.

Secado	$\rho_{pre}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{cru}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta\rho$ (%)	$\Delta M$ (%)	$\Psi_a$ (%)
Natural	595,62 ± 8,7	448,52 ± 4,6	24,70	59,95 ± 1,47	- 48,81 ± 1,95
Miel	738,88 ± 68,6	385,05 ± 5,7	47,89	48,96 ± 0,26	- 2,07 ± 0,50
Lavado	619,84 ± 3,9	416,86 ± 6,1	32,75	39,36 ± 0,99	- 9,83 ± 1,47

En el Cuadro 24 se observa la densidad aparente del fruto ( $\rho_{pre}$ ) y después del secado ( $\rho_{cru}$ ), en el caso del café natural antes del secado fue de 595,62 kg/m<sup>3</sup> valor aproximado a Montilla et al. (2008) y Uribe (1977), con valores de 621,6 y 600,0 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

La densidad aparente del café miel húmedo fue de 738,88 kg/m<sup>3</sup>, similar a los obtenidos por Gómez (2019) de 779,4 kg/m<sup>3</sup> y con una diferencia muy marcada con los de Montilla et al. (2008) que obtuvieron una densidad aparente de 826,71 kg/m<sup>3</sup>; estos resultados con cafés de variedad colombiana y Uribe (1977) obtuvo una densidad aparente de 800 kg/m<sup>3</sup>.

La densidad del producto antes del secado ( $\rho_{pre}$ ) del café lavado es de 619,84 kg/m<sup>3</sup> valor que es cercano a los obtenidos por Gómez (2019) de 647,2 kg/m<sup>3</sup> y con una diferencia muy marcada con los de Montilla et al. (2008) que obtuvieron una densidad aparente de 701,87 kg/m<sup>3</sup> estos resultados con cafés de variedad colombiana y Uribe (1977) obtuvo una densidad aparente de 650 kg/m<sup>3</sup>.



En el café pergamino se observó que se obtiene una menor densidad aparente para el café miel de  $385,05 \text{ kg/m}^3$  y una mayor densidad aparente para el café natural de  $448,52 \text{ kg/m}^3$  y para el café lavado de  $416,86 \text{ kg/m}^3$  estos resultados concuerdan con el rango de densidades indicado por Alfaro (2015) para beneficios en la zona de Los Santos de  $405,56$  y  $432,89 \text{ kg/m}^3$  densidades obtenidas con café de diferentes variedades y tipos de procesamiento siendo discriminados por altitud; Gómez (2019) obtuvo una densidad aparente para café pergamino de beneficio lavado de  $418,0 \text{ kg/m}^3$ .

En el Cuadro 24 se observa una pérdida de masa directamente proporcional a las coberturas de los granos durante el proceso de secado, se observa que el café natural pierde  $59,95\%$  de su masa inicial, el café miel con  $48,96\%$  y el café lavado pierde un  $39,36\%$ . Es importante que el café lavado sea acompañado de un escurrimiento efectivo, ya que los valores difieren por los reportados por Gómez (2019) que reportó que un café lavado y secado industrialmente pierde el  $46,5\%$  y Jurado-Chaná et al. (2009) reportó que en un proceso lavado con secado solar un cambio de masa de  $47,75\%$  teniendo una diferencia de  $8\%$  con la pérdida de masa obtenida por el secado solar en el laboratorio.

La pérdida de masa durante el secado está relacionada con la contracción volumétrica aparente, la máxima contracción fue para el café natural con aproximadamente  $49\%$ ; mientras el café lavado presentó una reducción del volumen aparente de  $9,8\%$ .

#### **4.3.2 Secado en finca (Terciopelo)**

Se comprueba en el caso laboratorio que el dato de la humedad relativa obtenida por un termo higro registrador ubicado en las cercanías del experimento y los datos obtenidos por la estación meteorológica para la zona tienen una diferencia de  $0,34\%$ , lo cual permite para el caso en finca hacer uso de la estación meteorológica de la zona al no poder trasladar el equipo a la finca.

Se obtuvo los datos de las condiciones atmosféricas en una estación meteorológica cercanas a la ubicación del experimento; durante el tiempo del secado se registró una temperatura de 24,66 °C, con 6,60 mm de precipitación, una humedad 61% y vientos de 1,8 km/h. Con los datos de la humedad de equilibrio del café en el secado se obtiene la humedad al inicio del secado y final del secado de forma teórica que se muestran en el Cuadro 3 junto con los datos reportados de humedad del grano oro.

**Cuadro 25.** Contenidos de humedad teóricos para el café secado solar en finca

Secado	CHi teorico (%b.h)	CHi finca (%b.h)	CHf teorico (%b.h)	CHf finca (%b.h)	$\Delta M$ (%)	$\rho_{oro}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Natural	70,02 ± 0,05	70,55 ± 0,04	11,84	13,40 ± 0,45	66,00 ± 0,06	699,92 ± 1,74
Miel	51,89 ± 3,53	52,80 ± 3,47	11,84	13,50 ± 0,10	45,44 ± 4,01	710,15 ± 3,67
Lavado	49,50 ± 2,32	48,62 ± 2,36	11,84	10,30 ± 0,00	42,71 ± 2,62	720,54 ± 2,03

Se observa en el Cuadro 25 que el contenido de humedad inicial obtenido por el método teórico y experimental en finca presenta una diferencia de 0,53 a 0,91 % b.h para el caso del secado de café natural y el miel, para el café lavado la diferencia es de un 0,88 % b.h; los resultados obtenidos son cercanos a los rangos presentados por Montilla et al. (2008) donde la humedad del café cereza(natural) está entre los rangos 67,5 a 70,2 % b.h., para el café con mucílago (miel) entre 57,12 a 59,67 % b.h y para el café lavado entre 50,40 y 50,91 % b.h; también son cercanos a los obtenidos por Gómez (2019) con una humedad para la cereza (natural) de 64,54 % b.h, café con mucílago de 52,81% b.h y para el lavado de 49,08 % b.h; y son cercanos a los obtenido en el laboratorio siendo para café natural de 66,76 % b.h , café miel de 56,77 % b.h y café lavado de 49,72 % b.h; lo cual es congruente con la observación realizada que el fruto presentó mayor contenido de humedad, seguido de miel y con el menor valor de humedad el café lavado.

Montilla et al. (2008) determinaron que el café oro producto del secado tiene una densidad aparente de 709,99 kg/m<sup>3</sup> de forma general para los tres tipos de beneficiado, Gómez (2019) determinó que para un café lavado oro la densidad aparente de 706,34 14 kg/m<sup>3</sup> y Alfaro

(2015) indicó que la densidad del café oro tomando en cuenta un rango variado de muestras de varios beneficios en el país que un intervalo de densidades entre 691,85 y 713,14 kg/m<sup>3</sup>; Los datos obtenidos en este trabajo para café oro proveniente de café natural, miel y lavado coinciden con los obtenidos por estos investigadores.

Hena Arismendy (2015), determinó que los cafés secados al sol tienen una mayor densidad aparente de grano oro que los obtenidos con secado mecánico debido a que el secado mecánico tiene una tasa de remoción de agua más alta y una mayor tendencia a la contracción y a la pérdida de peso que un secado lento para un mismo café particular. En esta investigación se observa que hay un comportamiento creciente en los valores de la densidad aparente del grano oro correspondiendo con el beneficiado que tiene menos humedad inicial al momento del inicio del secado, con una cantidad de cubierta de la fruta menor al momento inicial del secado y menor duración de secado para un mismo café particular procesado previo al secado solar.

En el Cuadro 25 se muestra el cambio de masa que ocurre durante el proceso de secado masa que se considera en su totalidad como la pérdida de agua ocurrida durante el secado, se observa que el café natural pierde 66 % de su masa inicial, el café miel pierde, 45,44% y el café lavado pierde un 42,71 % y en el secado en laboratorio se reportó para el café natural un 59,95 %, el café miel pierde 48,96 % y el café lavado pierde un 39,36 %. La diferencia entre resultados en la pérdida de masa entre el experimento en finca y laboratorio para el café natural es de 6,05 %, para el café miel es de 3,52 % y para el café lavado es de 3,35 %.

El contenido de humedad evaluado en finca para el café oro lavado es un 3% más bajo que para el café miel y natural, y un 4,5% inferior al obtenido por la ecuación 3, teniendo este un valor de 10,3 % resultado que según Jiménez & Valverde, (1999) corresponden para un café oro lavado en el equilibrio a una humedad relativa de 51 % , este valor tiene una diferencia de la humedad relativa medida en la estación meteorológica de un 10 %, esto

puede ser ocasionado por una condición de microclima en la finca que se encuentra ubicada a 1,4 km.

Para el café miel y natural un valor de 13,4 y 13,5% b.h en el grano seco la comparación con estos valores presenta la condición de que las ecuaciones planteadas en el trabajo de Jiménez & Valverde, (1999) son para el grano lavado y en condiciones de oro y pergamino las cuales están bien definidas para este tipo de proceso, para el caso de miel y natural en este trabajo el contenido de humedad en finca fue medido y difiere en un valor de 1,56 y 1,66% b.h para una condición de humedad relativa de 61%, y en el caso de haberse presentado un micro clima de 51 % la diferencia sería de un valor de 3,1 y 3,2 % , en ambos casos siendo el contenido medido experimentalmente mayor que el teórico. La diferencia en los contenidos de humedad medidos se debe a que la medición realizada al café natural y miel estos conservan el mucílago seco y cáscara de la fruta de café seca lo cual al momento de la medición incrementará el resultado obtenido y la medición es consistente para el café miel y natural.

#### 4.3.3 Torrefacción de café (Aromas del alto)

Los granos de café cambian significativamente el contenido de humedad después del tueste como se muestra en el Cuadro 26.

**Cuadro 26.** Contenido de humedad de café lavado, miel y natural antes y después de la torrefacción.

Grano	Chi	CHf 220°C	CHf 225°C	CHf 230°C
		(%b.h)		
Lavado	10,95 ± 0,25	3,74 ± 0,18	2,57 ± 0,04	1,95 ± 0,07
Miel	11,03 ± 0,07	3,16 ± 0,09	2,35 ± 0,23	2,31 ± 0,15
Natural	12,76 ± 0,07	3,42 ± 0,06	2,58 ± 0,22	2,24 ± 0,17

A una temperatura del perfil de tueste de 230 °C le corresponde una temperatura del grano de 225,5 °C, el café lavado disminuyó su contenido de humedad a un valor de 1,95 % b.h; el cual se aproximó a 1,70 % b.h reportado por Vargas (2014) donde encontró que los granos alcanzaron un equilibrio entre la producción de agua de forma química y su evaporación, para el tueste de café lavado cuando superó la pérdida de masa del 12,5% y la temperatura de los granos superó los 225 °C. Mientras, que el contenido de humedad del café lavado tuvo similitud con el experimento citado en 0,25 % b.h, el café miel y natural presentaron diferencias de 0,61 y 0,54 % b.h., respectivamente.

El contenido de agua disminuyó en proporción al aumento de la temperatura en el tostador en los tres lotes, Illy & Viany (1995) informaron que el contenido de humedad de equilibrio es de 1,0% b.h.; debido a la formación de vapor de agua que es generado continuamente en las reacciones de pirólisis.

Se observa en el Cuadro 26 que al aumentar la temperatura del tueste también crece el cambio de masa en la torrefacción de café; Vargas et al. (2016) determinaron que la pérdida de masa está directamente relacionada con el grado de tueste.

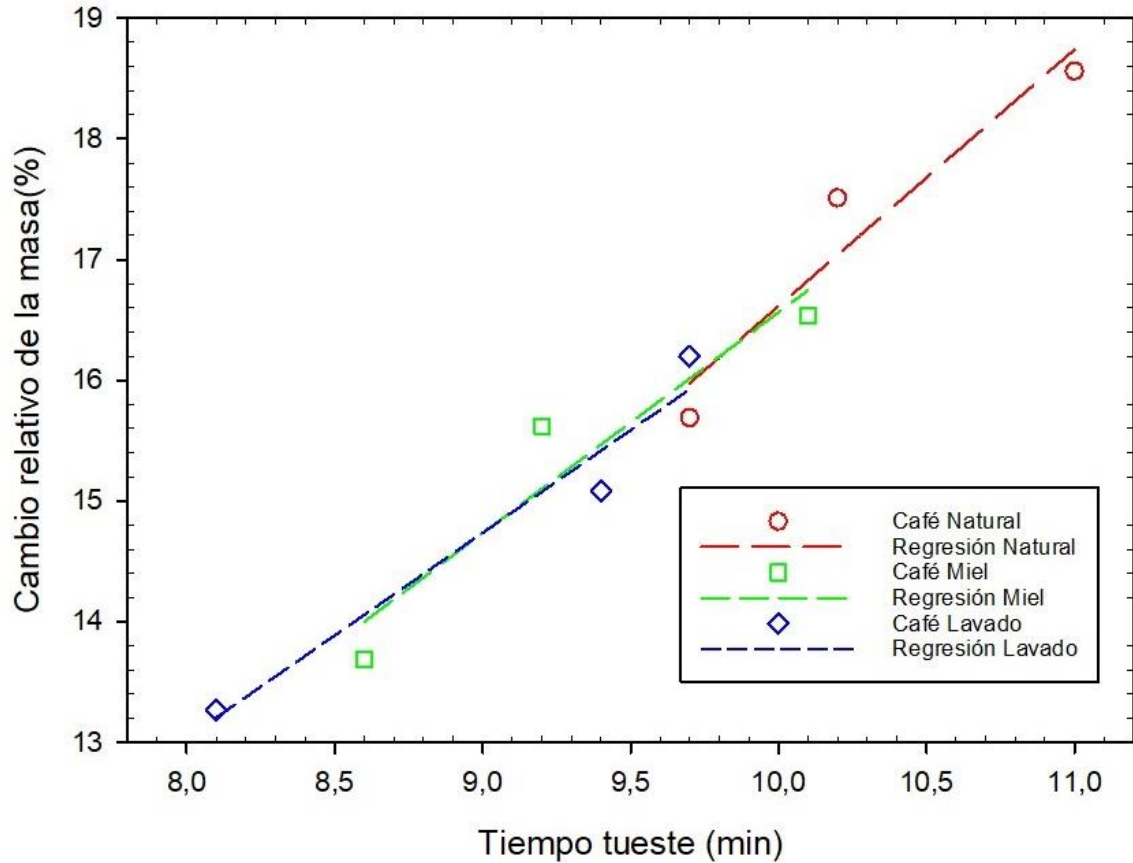
**Cuadro 27.** Características físicas del café durante el tueste a tres temperaturas.

Tueste	$\rho_{\text{cru}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{tor}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta\rho$ (%)	$\Delta M$ (%)	$\Psi_a$ (%)
Natural 220°C	680,27 ± 23,17	414,04 ± 8,25	39,14 ± 1,37	15,69 ± 0,49	38,56 ± 2,44
Natural 225°C	680,27 ± 23,17	382,96 ± 13,89	43,70 ± 0,73	17,51 ± 0,13	46,55 ± 1,74
Natural 230°C	680,27 ± 23,17	361,69 ± 3,96	46,83 ± 0,46	18,56 ± 0,19	53,18 ± 1,03
Miel 220°C	714,54 ± 8,54	414,84 ± 8,79	41,94 ± 1,42	13,69 ± 0,25	48,71 ± 3,28
Miel 225°C	714,54 ± 8,54	384,64 ± 6,38	46,17 ± 1,01	15,62 ± 0,21	56,78 ± 2,57
Miel 230°C	714,54 ± 8,54	369,47 ± 4,18	48,29 ± 0,66	16,54 ± 0,21	61,22 ± 2,45
Lavado 220°C	708,51 ± 7,51	398,34 ± 18,03	43,78 ± 3,00	13,27 ± 0,73	54,54 ± 7,71
Lavado 225°C	708,51 ± 7,51	371,50 ± 13,24	47,57 ± 2,18	15,08 ± 0,67	62,13 ± 6,36
Lavado 230°C	708,51 ± 7,51	350,27 ± 9,73	50,56 ± 1,60	16,20 ± 0,68	69,63 ± 5,91

Vargas (2014) reportó que para el tueste de café lavado de la variedad Catuaí amarillo con pérdida de masa superior al 12,5% y con una expansión de un 55% y temperatura del grano de 225 °C como parte de las condiciones en el equilibrio entre la producción de agua de forma química y la evaporación; en el presente trabajo con café de la variedad Catuaí rojo se obtuvo un valor de temperatura de los granos final para el café lavado de 225,5°C en la condición de tueste final de 230 °C, se encontraron pérdida de masa superiores a 16,20 % y expansión aparente de los granos de 69,63% , según los datos del Cuadro 27 se observó que para una temperatura de grano con una diferencias de 0,5°C los granos pierden un porcentaje diferente de su masa inicial y expanden un porcentaje diferente de su volumen inicial, la cual se atribuye a la diferencia de la variedad del grano utilizado y la condiciones del tueste.

Independientemente de la temperatura del tostador una diferencia de la pérdida de masa superior a los 0,8 % indica una diferencia significativa en el grado de tueste según lo encontrado por Vargas et al. (2016); en el Cuadro 27 se observó que la diferencias entre las masas para las temperaturas de tueste 220 - 225 °C en el café natural fue de 1,82 % y para 225 - 230 °C de 1,05 %, para el café miel respectivamente las diferencias entre masas fueron de 1,93 y 0,92 %, y para el café lavado fue de 1,81 y 1,12 %; se determinó que con una diferencia de 5 °C se obtuvo efectivamente tres tipos de tuestes diferentes para los de granos de café natural, miel y lavado. Este resultado concuerda con el estudio de Porras et al., (2019) donde obtuvo diferencias en el nivel de tueste con 5 °C entre las muestras con el mismo tostador.

La pérdida de masa es similar y con tendencia lineal entre los tres lotes como se observa en la Figura 25, la principal diferencia radica en el tiempo de tueste, obteniendo que entre mayor contenido de humedad inicial en los granos se requiere de más tiempo y se produce un desfase según el contenido de humedad inicial del café natural, miel y lavado.



**Figura 25** Cambio porcentual de la pérdida de masa de los granos de café según el tiempo de tueste.

Vargas et al. (2016) utilizó un café proveniente de beneficiado húmedo y obtuvieron una ecuación lineal a una misma temperatura de la pared del tostado la cual puede describir la pérdida de masa en el tueste con respecto al tiempo de tueste, y Abarca (2017) obtuvo una ecuación lineal diferente de cambio relativo de masa con respecto al tiempo dependiendo de la masa utilizada en el tueste, en el presente trabajo se encontró que si a una misma temperatura de trabajo de la pared del tostador y con la misma variedad de café, las pérdidas de masa provenientes de un proceso natural, miel o lavado tendrán un comportamiento diferente ante una misma temperatura final de tueste como se observa en la Figura 25. Las regresiones lineales de la pérdida de masa se observan en el Cuadro 28, donde los valores del coeficiente de determinación son mayores a 0,90.

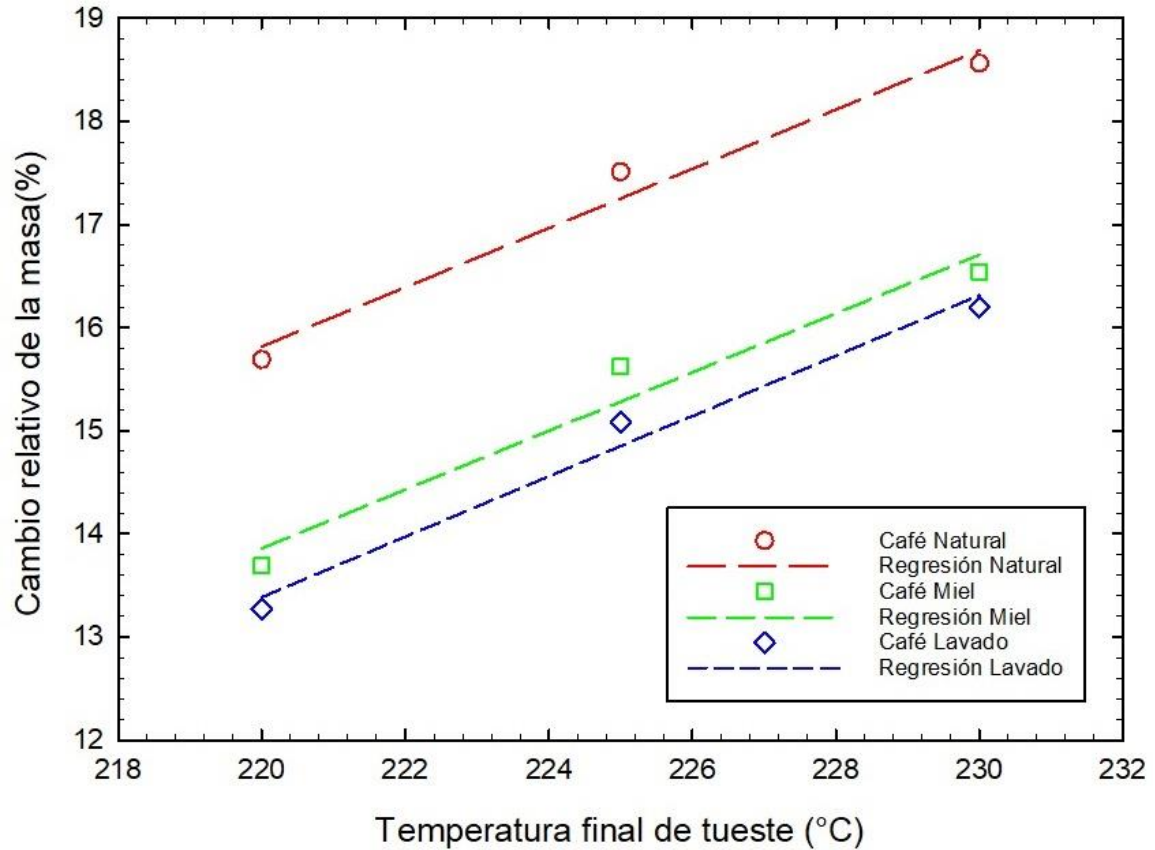
**Cuadro 28.** Resultados estadísticos y coeficientes de la ecuación lineal de cambio relativo de masa en el tueste de café natural, miel y lavado en función del tiempo.

Tueste(220-230°C)	R <sup>2</sup>	SEE	y <sub>p</sub> (%)	a <sub>m</sub> (% / min)
Natural	0,9203	0,5796	-4,6282	2,1244
Miel	0,9030	0,6408	-1,7422	1,8307
Lavado	0,9561	0,4383	-0,5612	1,6998

SEE: error estándar de los estimados; y<sub>m</sub> y a<sub>m</sub> son coeficientes del modelo

El cambio porcentual de la masa está relacionado linealmente con la temperatura de tueste (Figura 26), debido a que presenta mejores resultados de ajuste estadístico de R<sup>2</sup> y SEE con valores respectivamente para café natural, miel y lavado de 0,9766 y 0,3144 , 0,9598 y 0,4123 y 0,9818 y 0,2817, este tipo de análisis se realiza con base al trabajo realizado por Vargas (2011), donde asocia un porcentaje de pérdida de masa a un grado de tueste y Vargas (2014), determinó que la temperatura de los granos está relacionada con el grado de tueste, en este trabajo; se observó que a una misma temperatura de tueste se obtienen pérdidas de masa diferente, cuando los granos provienen de lotes diferentes como el café natural, miel o lavado.





**Figura 26:** Cambio porcentual de la pérdida de masa de los granos de café según la temperatura final de tueste.

Se muestran en el Cuadro 29 los resultados estadísticos de la regresión lineal entre el cambio relativo de la masa y la temperatura del tueste.

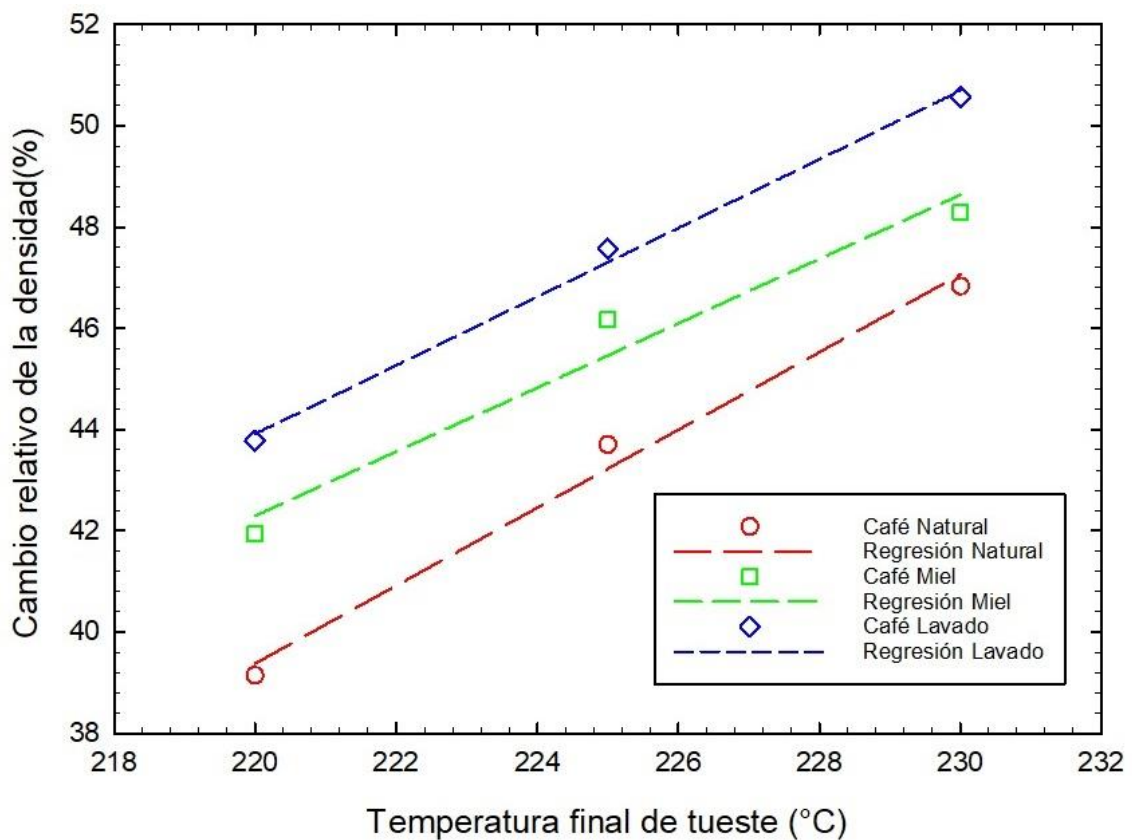
**Cuadro 29.** Resultados estadísticos y coeficientes del ajuste lineal para el cambio relativo de masa (%) en el tueste de café en función de la temperatura.

Tueste(220-230°C)	R <sup>2</sup>	SEE	y <sub>m</sub> (%)	a <sub>m</sub> (% / °C)
Natural	0,9766	0,3144	-47,3217	0,2870
Miel	0,9598	0,4123	-48,8417	0,2850
Lavado	0,9818	0,2817	-51,0750	0,2930

SEE: error estándar de los estimados; y<sub>m</sub> y a<sub>m</sub> son coeficientes del modelo

En el presente trabajo, la ecuación lineal de cambio relativo de masa en función de la temperatura final de tueste presenta una razón constante para el café lavado, miel y natural, y la máxima fue  $0,2930 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$  para el café lavado. Se observa que las unidades del coeficiente  $a_m$  son de  $\text{\%/}^{\circ}\text{C}$  lo cual indica que por cada  $1^{\circ}\text{C}$  que se incremente la temperatura de tueste se perderá  $1 \text{ \%}$  de masa inicial, o por cada  $4^{\circ}\text{C}$  un valor cercano a los  $1,15 \pm 0,02\%$  lo cual es un valor suficiente para garantizar un cambio en el grado de tueste según Vargas et al. (2016) y Abarca (2017), resultado el cual es cercano a lo encontrado por Porras et al., (2019) donde obtuvo diferencias en el nivel de tueste con  $5^{\circ}\text{C}$ .

El cambio relativo de la densidad aparente aumentó conforme aumentó la temperatura de tueste como se muestra en la Figura 27.



**Figura 27.** Cambio relativo de la densidad aparente (%) de los granos de café según la temperatura final de tueste.

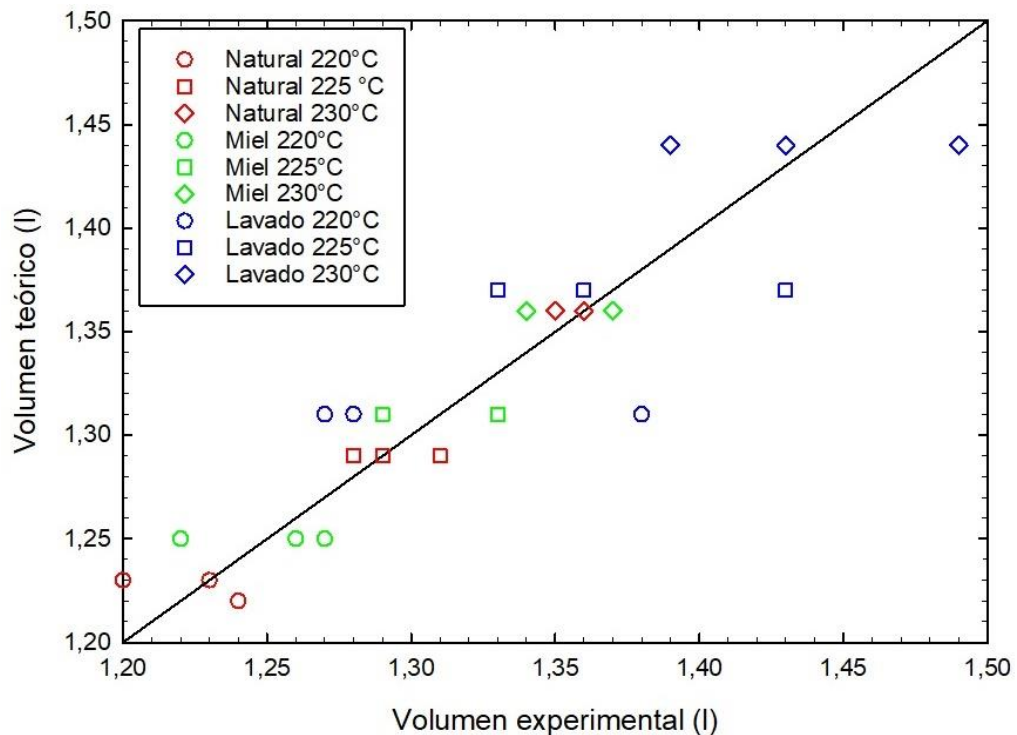
El ajuste de la regresión lineal muestra un coeficiente de determinación superior a 0,96 para los tres tipos de café. Se muestran los resultados estadísticos del cambio relativo de densidad en el tueste en el Cuadro 30.

**Cuadro 30.** Resultados estadísticos y coeficientes de la ecuación lineal de cambio relativo de densidad aparente en el tueste en función de la temperatura de tueste.

Tueste(220-230°C)	R <sup>2</sup>	SEE	y <sub>p</sub> (%)	a <sub>p</sub> (% / °C)
Natural	0,9886	0,5838	-129,8017	0,7690
Miel	0,9645	0,8614	-97,4083	0,6350
Lavado	0,9954	0,3266	-105,2467	0,6780

SEE: error estándar de los estimados; y<sub>p</sub> y a<sub>p</sub> son coeficientes del modelo

En la Figura 28 se presenta una comparación de los valores obtenidos de forma teórica con las ecuaciones propuestas y los valores medidos en el experimento.



**Figura 28.** Predicción del volumen del café tostado dependiendo de la temperatura.

Se observa en la Figura 28 que los valores obtenidos presentan residuos en el café lavado que tienen un valor en un intervalo de 0,08 a 0,01 L, en café miel de 0,03 a 0,01 L y en café natural de 0,03 a 0 L; estos serían los residuos extremos mínimos y máximos absolutos; el promedio de los residuos absolutos tiene valores para el café lavado de 0,04 L, para el café miel de 0,02 L y para el café natural de 0,01 L. Estos datos indican que al momento de realizar un cálculo del volumen final aparente después del tueste del café utilizado en este experimento con esta ecuación las predicciones pueden diferir del valor real de volumen en un promedio de 40 ml para café lavado, 20 ml para café miel y en 10 ml para café natural según lo observado en este experimento.

## **5 CONCLUSIONES**

### **Secado**

La rapidez del secado solar de café en capa delgada proveniente de los procesos de beneficiado lavado, miel y natural desarrollado en este trabajo fue descrita adecuadamente por el modelo de Page modificado tanto en finca como a nivel de laboratorio.

La ubicación afectó las condiciones ambientales del experimento por esa razón los coeficientes obtenidos para el modelo de Page modificado fueron diferentes para el secado realizado en finca y en el laboratorio.

El tiempo de secado aumentó en orden creciente, el menor tiempo de secado fue para el beneficiado húmedo (lavado), seguido del semi-seco (miel) y el mayor tiempo para el seco (natural), este comportamiento es proporcional a la presencia de capas del grano (pergamino, mucílago y cáscara).

### **Torrefacción**

Se determinó la cinética de la temperatura durante el tueste por medio de dos métodos, el primero se utilizó la temperatura del grano (calentamiento) y el segundo con la temperatura del tostador (perfil de tueste) para los tres tipos de café.

El calentamiento de los granos durante el tueste del café natural, miel y lavado fue descrito adecuadamente con una tendencia exponencialmente creciente, los coeficientes fueron diferentes para cada uno de los beneficiados.

Se propuso una modificación a la ecuación original perfil de tueste que mejoró su ajuste, la cual quedó compuesta por 3 términos y 5 coeficientes para la aplicación en los granos provenientes de los beneficiados seco, semi-seco y húmedo.

### **Características físicas**

Se analizó que el tipo de beneficiado tuvo efecto en las propiedades físicas de los granos tanto secos como tostados.

Se determinó que una diferencia de 4 °C en la temperatura final de tueste fue suficiente para generar un cambio significativo en la densidad aparente, masa final y grado de tueste del café.

Se generó un modelo lineal del cambio de masa relativo y de cambio de densidad aparente en los granos con diferentes niveles de tueste para grano natural, lavado y miel en función de la temperatura final del aire en un tostador convencional.

Se demostró que las funciones para representar los cambios físicos como la pérdida de masa, cambio relativo de la densidad aparente y la expansión en los granos tostados en función de la variable de temperatura de tueste, tuvieron mejor desempeño con respecto al tiempo.

Los cambios físicos producidos durante el tueste (como la pérdida de masa, el cambio tanto en la densidad aparente como en el volumen) se correlacionaron mejor con la variable temperatura que con el tiempo, por lo tanto, los modelos de predicción basados en la temperatura tienen un mayor potencial para la producción de diferentes niveles de tueste.

El nivel de tueste logró predecirse con la temperatura tanto del perfil de tueste como del calentamiento del grano para un mismo lote de café bajo las condiciones en las que se realizó el trabajo.

Se demostró que tanto el sistema de secado como el proceso de torrefacción se puede tecnificar para garantizar la homogeneidad en la producción de café tostado de calidad, sin embargo, la modelación matemática mostró que en cada proceso hubo influencia del tipo de procesamiento y del microclima, lo cual refuerza la particularidad de la calidad en la producción de microlotes.

## **6 RECOMENDACIONES**

Para una implementación a nivel industrial se debe realizar una comprobación en el beneficio o microbeneficio según la materia prima utilizada y las condiciones particulares del lugar.

La temperatura en la torrefacción de los granos como la del tostador es un indicador el cual se recomienda controlar ya que está asociado a un nivel de tueste específico para cada grano permitiendo la predicción de una forma matemática del producto final obtenido.

La efectividad de los modelos depende de la similitud con las condiciones con las cuales se obtuvo el modelo, como la ubicación, equipo utilizado y el tipo de café. Por lo cual se recomienda el ajuste de los modelos para cada variación de las condiciones mencionadas.

Se sugiere incluir un análisis sensorial para contrastar con los resultados obtenidos en las características físicas.



## 7 BIBLIOGRAFÍA

Abarca, R. (2017). Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional. 124. Recuperado de: <http://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2017/06/Tesis-RoynerAbarca.pdf>

Alfaro, V. (2015). *Efectos de la altitud sobre las características físicas y organolépticas del café de la zona de Los Santos (Tesis de licenciatura)*. 147. Recuperado de :<https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2016/02/tesis-veronica-alfaro.pdf>

Alves, Euripedes, G., Isquierdo, E. P., Borém, F. M., Siqueira, V. C., Oliveira, P. D., & Andrade, E. T. (2013). Drying kinetics of natural coffee for different temperatures and low relative humidity. *Coffee Science*, 8(2), 238–247. Recuperado de: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/422>

Archontoulis, Sotirios V., y Fernando E. Miguez. 2015. “Nonlinear Regression Models and Applications in Agricultural Research.” *Agronomy Journal* 107(2):786–98. doi: 10.2134/agronj2012.0506.

Akpınar, E. K. (2006). Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 864–870. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.014>

Akpınar, E. K. (2010). Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2407–2418. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.05.005>

Barrantes, S., Vargas-Elías, G., Rojas B, S., Castro, I., & Castillo, J. (2020). Ajuste Matemático del Perfil de Tueste para el Café Natural. XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2020. Recuperado de: <https://www.conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2020/livros-2020/ciencia-e->

[tecnologia-pos-colheita-ctp-2/2525-ajuste-matematico-del-perfil-de-tueste-para-cafe-natural/file](#)

Barrozo M. (1995). Heat and mass transfer between air and in soybean seed in a sliding and crossflow bed. PPG-EQ/UFSCar., 1(1): 1163-1178.

Bendig. (19 de enero de 2020). Torrefacción-Tostadores. Obtenido de Bendig Maquinaria S.A.:\_Recuperado de: [www.bendig.co.cr](http://www.bendig.co.cr)

Bruce, D. (1985). Exposed- layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C. Journal of Agricultural Engineering. 32(1):337-347.

Bustos, J. D. (2015). Modelagem das propriedades físicas e da transferência de calor e massa dos grãos de café durante a torrefação. Tesis de Maestría. Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Viçosa.

Castillo, Muñoz, M., & Engler, F. (2016). Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café. Swisscontact / MIPRO, 15. Recuperado de: [http://www.swisscontact.org/fileadmin/user\\_upload/COUNTRIES/Ecuador/Documents/Content/ManualTuesteCafe.pdf](http://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES/Ecuador/Documents/Content/ManualTuesteCafe.pdf)

Cerdas, C., Vargas-Elías, G., Rojas, F., Castillo, J., & Barrantes, S. (2020). Efecto del Tostador en el Perfil de Tueste en Café Especial Con Diferente Tamaño. XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2020. Recuperado de: <https://www.conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2020/anais-2020/ciencia-e-tecnologia-pos-colheita-ctp-1/2634-efecto-del-tostador-en-el-perfil-de-tueste-en-cafe-especial-con-diferente-tamano/file>

Chen, H., Siebenmorgen, T. J., & Marks, B. P. (1997). Relating drying rate constant to head rice yield reduction of long-grain rice. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 40(4), 1133–1139. Recuperado de: <https://doi.org/10.13031/2013.21331>

Clarke, R. J., & Macrae, R. (1987). *Coffee Volume 2: Technology*. ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD Crown House, Linton Road, Barking, Essex IG11 8JU, England. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3417->

Cole-Palmer. (19 de enero de 2020). Discontinued Items. Obtenido de Cole-Palmer scientific experts: [coleparmer.com](http://coleparmer.com)

Collazo, P. L., Morejón, Y., & Fernández, L. (2018). Mathematical and Experimental Models for the Analysis of Solar Seed Drying, *27*(1), 89–98.

Corrêa, P. C., Resende, O., & Ribeiro, D. M. (2006). Drying Characteristics and Kinetics of Coffee Berry. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, *8*(1), 1–10. Recuperado de: <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v8n1p1-10>

Deribe, Habtamu. Review on Factors which Affect Coffee (*Coffea Arabica* L.) Quality in South Western, Ethiopia. *International Journal of Forestry and Horticulture*, v. 5, n. 1, p. 12–19, 2019. DOI: 10.20431/2454-9487.0501003. Recuperado de : <https://www.arcjournals.org/pdfs/ijfh/v5-i1/3.pdf>.

Duarte Goneli, A. L., Corrêa, P. C., Afonso Júnior, P. C., & Horta de Oliveira, G. henrique. (2009). Cinética Secagem Graos Cafe Descascados Camada Delgada. *Revista Brasileira de Armazenamento*, 64–73.

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

Ertckin, C., Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of food Engineering*. *63*(1):349-359.

Ertekin, C., & Firat, M. Z. (2015). A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(4), 701–717. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493>

Esper, A. and Muhlbauer, W. (1998) Solar Drying—An Effective Means of Food Preservation. *Renew Energy*, 15, 95-100. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00143-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00143-8)

Fonseca, S. F., Abdala, L., Ferrero, V., Pantoja, J., & Torres, A. (2003). Estudio comparativo del secado solar del café en plazoletas tradicionales y ennegrecidas. *Tecnología química*, XXIII(3), 48–54

Gómez, J. M. (2019). Modelación del procesamiento agroindustrial del café desde la fruta hasta el café oro. Universidad de Costa Rica. Recuperado de: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/79794>

Henaó Arismendy, J. (2015). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*. 100. Recuperado de : <http://www.bdigital.unal.edu.co/51841/1/1128270450.2016.pdf%0Ahttp://www.bdigital.unal.edu.co/51841/>

Henderson M. (1974) Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans. ASAE.*, 17(1):1167-1168.

Henderson, M., Pabis, S. (1961). Grain Drying Theory II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural*. 44(1): 1111-1122.

Hii, C., Law, C., Cloke, M. (2009). Modeling used a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal Food Engineering*. 90(1):191-198.

ICAFFE. (Enero de 2016). Nuestro Café. Obtenido de Instituto del Café de Costa Rica: <http://www.icafe.go.cr>

IICA. (2010). Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen. Recuperado de: <http://opackoha.iica.int/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=1686>

Illy, A., & Viani, R. (1995). Espresso Coffee: The Chemistry of Quality. London: Academic Press.

Illy, A., & Viani, R. (2005). Espresso Coffee \_ The science of quality. In Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53, Issue 9). Recuperado de: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

INTECO. (2011). INTE ISO 6673:2011. Café verde. — Determinación de la pérdida de masa a 105°C. Segunda Edición. Costa Rica: Secretaría: INTECO.

ISO. (2000). Quality management systems, principles and terminology. ISO 9000: 2000. Geneva: International Organization for Standardization.

International Coffee Organization. 2009. “Code of Practice for Prevention and Reduction of Ochratoxin A Contamination in Coffee.” 69(September):1–10.

ISO. (2000). Quality management systems, principles and terminology. ISO 9000: 2000. Geneva: International Organization for Standardization.

Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques— Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 08(02), 27–48. Recuperado de: <https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003>

Jiménez, R. y Valverde, R. 1999. Relaciones de humedad de equilibrio para café (*Coffea arabica*) de primera calidad en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*. 13, 2 (mar. 2019), Pág. 61-69. Recuperado de: [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/4144/3743](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4144/3743)

Jordan, R. A., Siqueira, V. C., Cavalcanti, M. E. R. M., Hoscher, R. H., Mabasso, G. A., Motomiya, A. V. de A., Oliveira, F. C. de, Martins, E. A. S., Santos, R. C., & Quequeto, W. D. (2020). Cinética de secagem de café natural e descascado a baixa temperatura e umidade relativa com emprego de uma bomba de calor. *Research, Society and Development*, 9(8), e388985528. Recuperado de: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5528>

Kuit, M., Jasen, D. M., & Van Thiet, N. (2004). Manual for Arabica cultivation. Tan Lam Agricultural Product Joint Stock Company.

Lantz, I.; Ternité, R.; Wilkens, J.; Hoenicke, K.; Guenther, H.; Van Der Stegen, G. H. D. Studies on acrylamide levels in roasting, storage and brewing of coffee. *Molecular Nutrition and Food Research*, v. 50, n. 11, p. 1039–1046, 2006. Recuperado de: <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600069>

Liny, P. (2013). Geometric and gravimetric characteristics of black gram. *International Journal of Development Research*, 3(9), 13–16.

Madamba, Ponciano S., Robert H. Driscoll, and Ken A. Buckle. 1996. “The Thin-Layer Drying Characteristics of Garlic Slices.” *Journal of Food Engineering* 29(1):75–97. doi: 10.1016/0260-8774(95)00062-3.

Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373–386. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4)

Menchu, J. (1966). Descripción y origen de los principales defectos físicos en el grano de café, 14–16.

Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002) A new model for single layer drying of some vegetables. *Drying Technology*. 20(1): 1503-1513.

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). Applied Statistics and Probability for Engineers. In European Journal of Engineering Education (3rd Edition, Vol. 19, Issue 3). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1080/03043799408928333>

Montilla, J., Arcila, J., Aristizábal, M., Montoya, E. C., Puerta, G. I., Oliveros, C. E., & Cadena, G. (2008). Caracterización De Algunas Propiedades Físicas Y Factores De Conversión Del Café Durante El Proceso De Beneficio Húmedo Tradicional. *Cenicafé*, 59(2), 120–142. Recuperado de: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc059\(02\)120-142.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc059(02)120-142.pdf)

Mohsenin, N. (1986). Physical properties of plant and animal materials. New York: Seconded Gordon and Breach Science Publishers

Moreira, S. M. C., Chaves, M. A., & Oliveira, L. M. (1985). Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. *Revista Brasileira de Armazenamento*, 9-10(1-2), 22–24.

Organización Internacional del Café (OIC). Acerca del Café: Torrefacción y Preparación. (2017). <[http://www.ico.org/es/making\\_coffeec.asp?sect%20ion=Acerca\\_del\\_caf%E9](http://www.ico.org/es/making_coffeec.asp?sect%20ion=Acerca_del_caf%E9)> Acceso: 6/3/21.

Pabis, S., Jayas, D., & Cenkowski, S. (1998). Grain Drying, Theory and Practice. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Page, G. (1949) Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. [Tesis Maestría], Indiana, USA. Purdue University.

Phitakwinai, S., Thepa, S., & Nilnont, W. (2019). Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity. *Food Science and Nutrition*, 7(9), 2921–2931. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1144>

Pittia, P., Dalla Rosa, M., & Lerici, C. R. (2001). Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. *Lebensmittel- Wissenschaft Und- Technologie*, 34(3), 168–175.

Poltronieri, P., & Rossi, F. (2016). Challenges in Specialty Coffee Processing and Quality Assurance. *Challenges*, 7(2), 19. <https://doi.org/10.3390/challe7020019>

Porras, M. C., Vargas-Elías, G., Araúz, L., & Abarca, Y. N. (2019). Efecto de la temperatura en la rapidez del tostado de café. *Revista Tecnología En Marcha*, 32, 20–27. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4255>

Ratti, C. (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 23(1), 91–105. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90125-2)

Rebelles, P., Luz da Cunha, R., & Rodrigues Carvalho, G. (2011). Café Arábica: da Pós Colheita ao Consumo. 2, 734.

Sánchez, N. (2018). Optimización de la cinética de secado en semillas de papaya [Tesis Licenciatura]. 85. Recuperado de: <http://www.inii2.ucr.ac.cr/RIINII/pdf/IB/IB-8140.pdf>

Sandoval, S., Rodríguez, J., Méndez, L., & Sánchez, J. (2006). Rapidez de secado reducida: Una aplicación al secado convectivo de plátano roatán. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5, 38. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62009907>

Schwartzberg, H. G. (2002). Modeling Bean Heating during Batch Roasting of Coffee Beans. In *Engineering and Food for the 21st Century*, 1036.

Schwartzberg H. (2013) Batch Coffee Roasting; Roasting Energy Use; Reducing That Use. In: Yanniotis S., Taoukis P., Stoforos N., Karathanos V. (eds) *Advances in Food Process Engineering Research and Applications*, C.10. Food Engineering Series. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2_10).



Siqueira, V., Borém, F., Alves, G., Isquierdo, E., Pinto, A., Ribeiro, D., & Ribeiro, F. (2017). Drying Kinetics of Processed Natural Coffee with High Moisture Content. *Coffee Science*, 12(3), 400–409.

Siqueira, V. C., Resende, O., & Chaves, T. H. (2012). *Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying.* 2005, 231–238. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v34i3.14402>

Suárez, L., Barrera, R., & Forero, A. F. (2016). Evaluation of alternative drying techniques for the earthworm four processing. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(1), 55–71. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol17\\_num1\\_art:461](https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num1_art:461)

Togrul, I., Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*. 55(1): 209-216.

Vargas, G. (2011). Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação. Universidade Federal de Viçosa. Recuperado de: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3606>

Vargas, G. (2014). Cinética Do Aquecimento, Expansão Volumétrica E Perda De Massa Em Grãos De Café Durante A Torrefação. Universidade Federal de Viçosa. Recuperado de: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/18544>

Vargas, G. A., Corrêa, P. C., Souza, N. R. De Baptestini, F. M., & Melo, E. D. C. (2016). Kinetics of Mass Loss of Arabica Coffee During Roasting Process. *Engenharia Agrícola*, 36(2), 300–308. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n2p300-308/2016>

Vargas, R. (2019). Análisis del secado, el equilibrio higroscópico y la torrefacción de los granos de cacao. Recuperado de: <http://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/79255>

Verma, L., Bucking, R. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Trans. ASAE.*, 28(1): 296-301.

Villalba Vidales, J. A. (2015). Mathematical and Experimental Models for Drying of Biomass. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 301–330. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.5674>

Wilbaux, R. (1963). *El beneficiado de café*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.