

Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Biosistemas

**Modelación matemática de la temperatura durante la torrefacción del cacao (*Theobroma cacao L.*) en un tostador cilíndrico con fuente de gas y otro con fuente eléctrica**

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

Ana María Sandí Guzmán

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

2023

## **Dedicatoria**

*A mi madre, padre y hermano.*

## **Agradecimientos**

*A mi mamá, papá y hermano por su apoyo incondicional.*

*A mi director Guillermo Vargas-Elías por toda la compañía, consejos, paciencia y apoyo brindado desde el primer día que lo conocí.*

*A Angélica Zamora, Alonso Mata, María José Salas, Rebeca Ventura y Yailyn Abarca por el apoyo, motivación, ayuda y compañía durante mi paso por la universidad.*

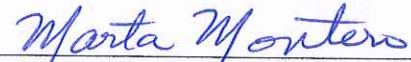
## Hoja de aprobación

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.



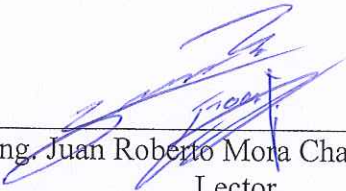
---

Ing. Guillermo Vargas Elías, D.Sc.  
Director



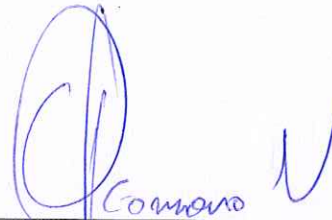
---

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



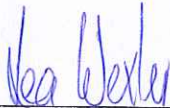
---

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



---

Ing. Giovanni Carmona Villalobos, Lic.  
Lector del Tribunal examinador



---

Ing. Lea Wexler Goering, M. Sc.  
Lectora



---

Ana María Sandí Guzmán  
Sustentante

## Resumen

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo general modelar matemáticamente el perfil de temperatura durante el tueste para la predicción del nivel de torrefacción en los granos de cacao (*Theobroma cacao L.*) en un tostador cilíndrico de gas y uno eléctrico. Para ello, se realizó un diagnóstico detallado de ambos tostadores para describir el funcionamiento, en el cual se demostró que el calentamiento de ambos tostadores es creciente, sin embargo, en el tostador eléctrico el comportamiento es polinomial y en el de gas es exponencial creciente. En el caso del enfriamiento, en ambos tostadores se observó un comportamiento exponencial decreciente, con la particularidad de que el tiempo en el eléctrico toma media hora más en enfriar en comparación al tostador con fuente de gas, lo cual demuestra hermeticidad del equipo. Posteriormente, se utilizó como referencia la ecuación de ajuste del perfil de tueste de café que propuso Abarca (2017) y a partir de ella, se estableció el modelo matemático que se ajusta al perfil de tueste del cacao en cada equipo. Se comprobó que el nivel de tueste de cacao en ambos tostadores se puede predecir en función de la temperatura del perfil de tueste, y en el caso del tostador con fuente de gas, la predicción también se puede realizar en función del tiempo. Finalmente, a través de la comparación del perfil de temperatura entre los dos equipos durante la torrefacción del cacao, se demostró que por medio de los modelos evaluados se puede predecir la temperatura de torrefacción de los granos de cacao.

# Índice general

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Hoja de aprobación.....	iii
Resumen.....	iv
Índice de figuras.....	iii
Índice de cuadros.....	v
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivo general.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Marco teórico.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Propiedades físicas de los granos.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Procesamiento del cacao.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Modelación matemática.....</b>	<b>11</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Métodos.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.1. Elaboración del manual de uso.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1.2. Proceso de torrefacción.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.3. Determinación de la temperatura.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.4. Modelo de calentamiento del cilindro rotativo.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.5. Pérdida de masa.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.6. Modelos para el perfil de tueste.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Análisis estadístico de los datos.....</b>	<b>19</b>
<b>4. Resultados y análisis de resultados.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1. Descripción del funcionamiento del tostador eléctrico y el tostador con fuente de gas.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1.1. Proceso de calentamiento de los tostadores.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1.2. Proceso de enfriamiento de los tostadores.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2. Representación de la temperatura de los tostadores evaluados con un modelo matemático para el perfil de tueste con los granos de cacao.....</b>	<b>27</b>

4.2.1.	Tiempos de torrefacción del cacao. ....	27
4.2.2.	Perfil de tueste de cacao en el tostador eléctrico.....	28
4.2.3.	Perfil de tueste de cacao en tostador con fuente de gas.....	37
4.2.4.	Comparación del modelo de mejor ajuste de los perfiles de tueste en ambos tostadores.....	48
4.3.	Aplicación los modelos predictivos para la obtención de diferentes niveles de tueste en los granos de cacao. ....	49
5.	Conclusiones .....	53
6.	Recomendaciones .....	54
7.	Referencias.....	55
8.	Apéndice.....	59

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Formas de la semilla del grano de cacao. ....	6
<b>Figura 2</b> Curva de perfil de tueste de cacao. ....	12
<b>Figura 3</b> Escáner de temperatura y ubicación del termopar en el tostador con fuente de gas. ....	16
<b>Figura 4</b> Ubicación de los termopares en el tostador eléctrico. ....	17
<b>Figura 5</b> Curva de calentamiento del tostador eléctrico. ....	20
<b>Figura 6</b> Caída de la temperatura interna del tostador eléctrico debido a la descarga de 500 g de cacao seco en su interior. ....	21
<b>Figura 7</b> Cinética del precalentamiento del tostador con fuente de gas. ....	22
<b>Figura 8</b> Caída de la temperatura interna del tostador con fuente de gas debido a la descarga de 500 g de cacao seco en su interior. ....	23
<b>Figura 9</b> Comparación del proceso de calentamiento en ambos tostadores. ....	24
<b>Figura 10</b> Curva de enfriamiento del tostador eléctrico. ....	25
<b>Figura 11</b> Curva de enfriamiento del tostador con fuente de gas. ....	26
<b>Figura 12</b> Comparación del proceso de enfriamiento en ambos tostadores. ....	27
<b>Figura 13</b> Ajuste de las tres repeticiones para el perfil de tueste de cacao en tostador eléctrico a cuatro temperaturas: (A) 180 °C, (B) 185 °C, (C) 190 °C y (D) 195 °C. ....	34
<b>Figura 14</b> Análisis de los residuos respecto al tiempo para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de cacao en tostador eléctrico. (A) 180 °C, (B) 185 °C, (C) 190 °C y (D) 195 °C. ....	35
<b>Figura 15</b> Ajuste general del modelo de Abarca (2017) para el perfil de tueste del cacao en el tostador eléctrico para las cuatro temperaturas evaluadas. ....	37
<b>Figura 16</b> Ajuste de las tres repeticiones para el perfil de tueste de cacao en tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas: (A) 220 °C, (B) 225 °C, (C) 230 °C y (D) 235 °C. ....	43
<b>Figura 17</b> Análisis de los residuos respecto al tiempo para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de cacao en tostador con fuente de gas. (A) 220 °C, (B) 225 °C, (C) 230 °C y (D) 235 °C. ....	45
<b>Figura 18</b> Ajuste general de los modelos propuestos para el perfil de tueste del cacao en el tostador con fuente de gas. (A) Modelo de Abarca (2017) y (B) Modelo propuesto. ....	47
<b>Figura 19</b> Comparación del ajuste del modelo de Abarca (2017) para el perfil de tueste del cacao en el tostador eléctrico y el de gas. ....	48



**Figura 20** Relación del porcentaje de pérdida de masa respecto a la temperatura durante la torrefacción de cacao en ambos tostadores. (A) Tostador eléctrico y (B) Tostador con fuente de gas. .... 51

**Figura 21** Relación del porcentaje de pérdida de masa respecto al tiempo de torrefacción de cacao en ambos tostadores. .... 52

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1</b> Modelos para el perfil de tueste. ....	18
<b>Cuadro 2</b> Duración del proceso de torrefacción en minutos. ....	28
<b>Cuadro 3</b> Resumen de los coeficientes del modelo de ajuste de Abarca (2017) para la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico a cuatro temperaturas distintas. ....	29
<b>Cuadro 4</b> Parámetros estadísticos del modelo de ajuste de Abarca (2017) para la temperatura interna del tostador eléctrico para las tres repeticiones. ....	30
<b>Cuadro 5</b> Resumen de los coeficientes del modelo de ajuste propuesto para la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico a cuatro temperaturas distintas. ....	31
<b>Cuadro 6</b> Parámetros estadísticos del modelo de ajuste propuesto para la temperatura interna del tostador eléctrico para las tres repeticiones. ....	32
<b>Cuadro 7</b> Análisis estadístico general del modelo de Abarca (2017) para la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico a cuatro temperaturas distintas. ....	32
<b>Cuadro 8</b> Análisis estadístico general del modelo propuesto para la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico a cuatro temperaturas distintas. ....	33
<b>Cuadro 9</b> Resumen de los coeficientes del modelo de ajuste de Abarca (2017) para la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas distintas. ....	38
<b>Cuadro 10</b> Parámetros estadísticos del modelo de ajuste de Abarca (2017) para la temperatura interna del tostador con fuente de gas para las tres repeticiones. ....	39
<b>Cuadro 11</b> Resumen de los coeficientes del modelo de ajuste de propuesto para la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas distintas. ....	40
<b>Cuadro 12</b> Parámetros estadísticos del modelo de ajuste propuesto para la temperatura interna del tostador con fuente de gas para las tres repeticiones. ....	41
<b>Cuadro 13</b> Análisis estadístico general del modelo de Abarca (2017) para la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas distintas. ....	42
<b>Cuadro 14</b> Análisis estadístico general del modelo propuesto para la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas distintas. ....	42
<b>Cuadro 15</b> Porcentaje de pérdida de masa respecto al tiempo de torrefacción en cada tostador evaluado. ....	49

# 1. Introducción

El cultivo de cacao tuvo un auge en Costa Rica durante la época colonial y pasó a ser uno de los principales productos de exportación durante el siglo XVII, en donde las principales zonas de producción era el Caribe, Norte y Brunca. Sin embargo, debido a la aparición del hongo *Monilia (Moniliophthora roreri)* en la década de 1970, este cultivo sufrió grandes afectaciones, lo cual significó la disminución de los precios, el cultivo y la producción, así como la accesibilidad a material genético resistente a la enfermedad (Comisión Interinstitucional de Cacao, 2018).

Para el año 2017, mediante el Censo Nacional Agropecuario (CENAGRO) se realizó un análisis de la actividad cacaotera costarricense con el objetivo de su reactivación, en el cual se determinó que en Costa Rica había 1441 fincas dedicadas al cultivo de cacao, lo cual representa 3286,6 hectáreas cultivadas. Aunado a esto, se obtuvo que el 90% de la producción cacaotera costarricense está ubicada en zonas rurales, siendo los pequeños productores los encargados de realizar el procesamiento del cacao (fermentación, secado, torrefacción, molienda, entre otros) según la Comisión Interinstitucional de Cacao (CIC, 2018).

Por otra parte, la totalidad de la producción de cacao se considera como “fino y de aroma”, lo que significa una ventaja importante para el país dentro del mercado internacional (CIC, 2018). Las exportaciones de cacao en Costa Rica, del año 2000 al 2015, fueron de 307 toneladas métricas por año en promedio, lo cual se divide en productos como: pasta de cacao, cacao en polvo sin adiciones, chocolates, cacao en grano y manteca, grasa y aceite de cacao (Carmioli, 2017).

El cultivo presenta un potencial económico debido al aumento en la demanda del cacao a nivel internacional, diferentes instituciones públicas se han unido con el fin de lograr la reactivación de esta producción y mejorar el material genético para aumentar la productividad del cultivo. Es por ello que instituciones como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), la Oficina Nacional de Semillas (ONS) y el Instituto Nacional de Aprendizaje (INA) han reactivado actividades como el Programa de Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria en Cacao (PITTA Cacao), la reactivación de clones con mejores características, establecimiento de jardines clonales y capacitaciones sobre cacao (CIC, 2018).

Por su parte, la Universidad de Costa Rica (UCR) desde el Centro para Investigación en Granos y Semillas (CIGRAS) en conjunto con las Escuelas de Ingeniería de Biosistemas, Tecnología de Alimentos y Agronomía, ha desarrollado diferentes proyectos de investigación y tesis en las que se estudia el procesamiento de cacao desde la fermentación hasta el análisis de las propiedades organolépticas. Entre ellos se encuentra la tesis de Vargas-Fernández (2019) en la cual se realizó un análisis del secado, el equilibrio higroscópico y la torrefacción de los granos de cacao. También se encuentra la tesis de Umaña Calderón (2013) quien realizó un anteproyecto de una planta de procesamiento para la elaboración de un producto obtenido a partir del cacao fermentado y no fermentado. Además, la Escuela de Tecnología de Alimentos tiene un proyecto de investigación en desarrollo (vigencia 2022-2023) en el cual se está estudiando el efecto del tiempo de fermentación y la velocidad del aire de secado de subvariedades de cacao de cultivo tradicional en Upala, Costa Rica, para aumentar las ventajas competitivas en el mercado.

Por tanto, la importancia de esta investigación se fundamenta en el desarrollo de un modelo matemático general que permita adaptar las condiciones de la torrefacción de cacao en dos tostadores, a partir de la ecuación diseñada para café en Costa Rica por Abarca (2017). Con el uso de este modelo predictivo se busca desarrollar una herramienta que relacione la temperatura respecto al tiempo, lo cual les permitirá a los productores aproximar el nivel de tueste y el tiempo necesario para el desarrollo de las propiedades sensoriales, así como obtener un producto más competitivo en el mercado y mejorar el precio de venta de sus productos.

Parámetros propios de un tostador, como el tiempo y la temperatura, son de gran importancia debido a que los cambios físicos y químicos que son necesarios para obtener la calidad del grano de cacao, están directamente relacionados al nivel de temperatura que se le aplique al grano durante el tueste, así como la rapidez en el que se lleve a cabo el proceso. Además, Krysiak *et al.* (2013) explicaron que por medio de la relación del tiempo y la temperatura en la que se lleva a cabo el proceso de torrefacción, le permite al productor identificar el nivel de tueste de los granos de cacao debido a que no existe una escala de color que facilite el control del proceso.

Dentro de los retos que se presentan en el mercado del cacao, en América Latina y el Caribe, se encuentra la carencia tanto de la infraestructura especializada para el manejo postcosecha, así como para su almacenamiento y el poco uso de equipo especializado para el tueste del cacao (Carmioli, 2017). Sin embargo, el desarrollo de la tecnología de tostadores para café, permite que los

productores realicen la misma operación en los granos de cacao. En Costa Rica se pueden encontrar empresas que construyen estos equipos, pero carecen de estudios técnicos dejando el tueste al empirismo y experiencia del tostador.

De acuerdo con Vargas-Fernández (2019), los equipos se pueden adaptar a partir de modelos matemáticos que predicen el nivel de tueste y el tiempo cuando se asocian variables de masa y la temperatura tanto del tostador como de los granos. Debido a esto, se debe ampliar la información del proceso de tueste, de manera que los productores costarricenses puedan asegurar la calidad, así como tener un mayor control y manejo de la cadena de valor del cacao.

La torrefacción se puede llevar a cabo de distintas formas, ya sea en equipos especializados, bandejas, hornos o incluso en una olla. Otra de las alternativas es el uso de tostadores para café, que se clasifican según la fuente de energía (eléctricos o de gas) y su uso se debe a que el proceso de torrefacción para ambos granos es muy similar en la parte operativa (Vargas-Fernández, 2019). Sin embargo, como el grano de cacao tiene un tamaño mayor al café, la capacidad de carga del equipo disminuye y los factores del proceso (como la temperatura y el tiempo) se ven afectados, por lo tanto, se recomienda realizar más estudios para poder determinar los rangos de operación y aplicabilidad de los resultados en ambos equipos.

Es por ello que, por medio de este proyecto, se busca ampliar la información respecto al proceso de tueste del cacao a partir de la comparación de dos tostadores con distinta fuente de energía, diseñados originalmente para café. Este análisis es con el fin de asegurar la calidad del producto final a partir de la optimización del proceso de tueste por medio de modelos predictivos del nivel de torrefacción en los granos de cacao.

### **1.1. Objetivo general**

Modelar matemáticamente el perfil de temperatura durante el tueste para la predicción del nivel de torrefacción en los granos de cacao (*Theobroma cacao L.*) en un tostador cilíndrico de gas y uno eléctrico.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Describir el funcionamiento del tostador eléctrico y de gas para la elaboración de un manual de operación de la torrefacción.

- Representar la temperatura de cada tostador con un modelo matemático para el perfil de tueste de los granos de cacao.
- Aplicar los modelos predictivos para la obtención de diferentes niveles de tueste en los granos.

## **2. Marco teórico**

El cacao es un cultivo que se encuentra en la zona tropical húmeda. En Costa Rica, la producción se concentra en manos de pequeños productores, los cuales se ubican principalmente en las provincias de Limón, Alajuela y Puntarenas. A pesar de esto, la cadena productiva del cacao en el país ha mejorado en cuanto al valor agregado, debido al procesamiento industrial y la exportación de productos derivados del cacao, así como a la tecnificación de los cultivos (Carmiol, 2017). Además, se han desarrollado modificaciones genéticas del cultivo de cacao enfocadas en aumentar el rendimiento y la resistencia ante enfermedades (Motamayor *et al.* 2008). El valor y la calidad de los granos de cacao se derivan de 600 componentes (alcoholes, ácidos carboxílicos, aldehídos, ésteres, cetonas y pirazinas) que se han identificado como componentes activadores y se producen a partir de reacciones químicas y bioquímicas desde el proceso de cosecha hasta su procesamiento postcosecha (Aprotosoie *et al.*, 2015).

### **2.1. Propiedades físicas de los granos**

En términos generales las variedades de cacao son: criollo, forastero y trinitario. El fruto de cacao puede presentar diferentes formas, dependiendo de la variedad, dentro de las cuales se pueden encontrar: cundeamor, angoleta, criollo, pentágona, amelonado o calabacillo. Además, la mazorca también puede presentar diferentes formas de ápices, lo que se refiere a las puntas del fruto. Los tipos de ápices son: atenuado, redondeado, obtuso, agudo, mamilado, dentado o caudado (Phillips-Mora *et al.*, 2012).

Por su parte, las semillas también pueden presentar diferentes formas, dentro de las cuales están: oblonga, elíptica, ovalada o irregular como se observa en la Figura 1 (Phillips-Mora *et al.*, 2012). La semilla está compuesta por el mucílago o pulpa, el cual protege al cotiledón y cubre la testa del grano (Aldave-Palacios, 2016).

## Figura 1

Formas de la semilla del grano de cacao.



Fuente: (Phillips-Mora et al., 2012)

La diferencia entre las variedades va desde la hoja del árbol, la flor, el fruto hasta la semilla. Dentro de las principales características que se evalúan entre las variedades de cacao, se incluye la longitud, el diámetro y el espesor de la semilla. Phillips-Mora *et al.* (2012) explica que para el caso de los seis clones que ha desarrollado el CATIE, han observado que la longitud de las semillas puede variar entre 2,1 a 2,6 cm, el diámetro varía entre 0,8 a 1,1 cm y el espesor de la semilla puede estar entre 0,9 y 1,3 cm. Además de estas cualidades, también se estudia el peso fresco por fruto, el número de semillas por fruto, color del cotiledón, forma del corte transversal, rugosidad, entre otras.

La clasificación tradicional del cacao se divide en tres tipos: criollo, forastero y trinitario. El cacao criollo se caracteriza por presentar una alta calidad y ser muy aromático, además, las mazorcas son alargadas con punta acentuada. En lo que respecta al tipo forastero, este se caracteriza por tener una cáscara más gruesa, resistente y ser poco aromática. Por último, el tipo trinitario es el resultado del cruce de los otros dos tipos, por lo cual presenta robustez en su sabor, característico del forastero, y perfiles frutales provenientes del tipo criollo (Aldave-Palacios, 2016).

En Costa Rica, el CATIE se ha enfocado en generar variedades mejoradas de cacao, con el objetivo de aumentar la resistencia del cultivo ante enfermedades, y, al mismo tiempo, incrementar la producción de los cultivos (Phillips-Mora *et al.*, 2012).



## **2.2. Procesamiento del cacao**

Las propiedades del grano de cacao están en función de la variedad que se utilice, el tiempo en que fue cosechado, la ubicación geográfica y de la combinación de compuestos que se generan en el grano durante su procesamiento. Factores, tales como el tiempo, la temperatura, la humedad, el contenido de grasas, contenido de compuestos volátiles y la acidez total, son los que van a inducir los aromas y sabores en el producto final. Estos factores se desarrollan, principalmente, en el proceso de fermentación y el tostado, ya que son los procesos en donde se llevan a cabo cambios físico-químicos en los que se desarrolla en gran medida el aroma y sabor del cacao y tienen un impacto directo en la calidad final del grano (Aldave-Palacios, 2016).

### **2.2.1. Fermentación**

El proceso de fermentación del cacao es uno de los más importantes, ya que es donde se remueve la pulpa del grano, que corresponde aproximadamente al 40% de la semilla, y se desarrollan las reacciones enzimáticas que ayudan a mejorar el sabor y aroma. Este proceso dura de cuatro a seis días, según el método que se decida utilizar, y es necesario mezclar los granos para que la fermentación sea uniforme (Vargas-Fernández, 2019).

Dentro de los métodos para realizar la fermentación se encuentra: en cajas, granel o en bandejas. Dubón (2016) recomienda el uso de cajones de madera sin resina, los cuales deben tener orificios en el fondo para que el líquido o miel pueda salir. El tamaño del cajón varía según el volumen de cacao que se desee procesar, y pueden estar diseñados en forma de grada para que se facilite su volteo con la gravedad.

La fermentación se divide en dos fases: la anaerobia y la aerobia. La fase anaerobia inicia con el crecimiento de microorganismos con el fin de eliminar la pulpa del grano, y convertir los azúcares que contiene en etanol. Esta fase se lleva a cabo durante las primeras 24 a 36 horas posterior a la apertura de las mazorcas (Aprotosoai *et al.*, 2015). Durante este proceso, la temperatura aumenta entre 45 y 50 °C, lo cual es importante para que muera el embrión y se dé la ruptura de las celdas de almacenamiento en el cotiledón (López, 2016).

Posteriormente, se da la fase aerobia en la cual, como consecuencia del aumento de la temperatura, se da la penetración de alcohol y ácidos producidos dentro del grano, lo cual propicia el

desdoblamiento de las proteínas en péptidos y aminoácidos, así como la conversión de sacarosa en glucosa y fructosa. Esta etapa también se caracteriza por la oxidación y el cambio de color del grano (Aprotosoai *et al.*, 2015). El principio fundamental de la fermentación es mantener la temperatura de la masa y al mismo tiempo permitir el paso del aire rápidamente (López, 2016).

### **2.2.2. Secado**

Inmediatamente después de la fermentación, se realiza el proceso de secado en el cual se reduce la humedad de los granos desde 55 a 7%. El secado se puede llevar a cabo de forma natural (mediante la exposición directa al sol o en sombra) o de forma artificial, para realizar el proceso en menos tiempo (Aldave-Palacios, 2016). El secado natural es uno de los métodos más utilizados, este se realiza en bandejas de madera y se debe mezclar cada hora para que los granos de cacao se sequen uniformemente. Este proceso se realiza hasta que se alcance un contenido de humedad aproximado de 7% b.h (Vargas-Fernández, 2019).

En Costa Rica, uno de los principales problemas que se presentan durante el proceso de secado es el clima húmedo, principalmente porque la producción de cacao en el país se ubica en las regiones más lluviosas, lo cual dificulta el secado del grano al sol. Es por ello que los productores deben optar por el secado artificial, lo cual implica mayor control de condiciones como el flujo de aire, temperatura, masa y tiempo del proceso. Los parámetros como el contenido de humedad de equilibrio (CHE) y la actividad del agua ( $a_w$ ) deben evitar valores altos, ya que propician el crecimiento de microorganismos, y, por ende, el deterioro del producto (Vargas-Fernández, 2019).

### **2.2.3. Almacenamiento**

Los granos de cacao se caracterizan por ser higroscópicos. El almacenamiento de los granos de cacao es un punto clave del procesamiento posterior al secado, en el cual se debe asegurar que las condiciones de temperatura y humedad relativa sean estables, ya que las variaciones propician el crecimiento y desarrollo de microorganismos que pueden dañar los granos a partir del aumento de ácidos y aparición de micotoxinas producto de los hongos. Es por ello que se recomienda almacenar los granos secos en un lugar limpio, cerrado, exclusivo y ventilado.

Se recomienda que los granos de cacao no excedan los dos meses de almacenamiento, para evitar el deterioro de su calidad (Aldave-Palacios, 2016). Los granos son almacenados en sacos de yute

en buen estado, que generalmente tienen un peso neto de 62,5 kg, y luego se colocan en estribas de madera. Los sacos deben estar correctamente rotulados con la información del lote: productor, tipo de cacao, proceso de fermentación, secado y empaque (Coaji y Forero, 2020).

#### **2.2.4. Torrefacción**

El proceso de torrefacción, también conocido como tueste, es uno de los más importantes en el beneficiado del cacao, porque es la etapa donde se resalta el sabor, aroma y color del grano. Estas características se deben principalmente al tiempo y temperatura con la que se lleve a cabo el proceso. Existen dos métodos de torrefacción: el convencional y el pre-tostado. La diferencia entre ambos es que en el tueste convencional se utiliza el grano con cáscara, y se realiza en hornos a temperaturas entre 100 y 150 °C, por un tiempo de 15 a 45 minutos; en cambio, en el pre-tostado el grano se somete a un tratamiento térmico previo, con el objetivo de remover la cáscara, a temperaturas menores a 100 °C por lapsos cortos de 15 minutos (Aldave-Palacios, 2016).

Otra de las razones por las que el proceso de torrefacción es importante, es la reducción de la humedad a 2,5 %, lo cual contribuye a la reducción de los microorganismos, y al mismo tiempo se eliminan los compuestos volátiles no deseados, por ejemplo, el ácido acético. Además, en este proceso se llevan a cabo reacciones químicas, las cuales son las precursoras del aroma y sabor deseado, tales como: reacciones de Maillard, en las que se producen componentes como éteres, fenoles, ácidos, ésteres, aldehídos, cetonas, entre otros; así como en otras reacciones como la caramelización de los azúcares, degradación de proteínas y la síntesis de compuestos azufrados (Aldave-Palacios, 2016).

Este proceso se lleva a cabo en tostadores que pueden ser alimentados por corriente eléctrica, por medio de gas o híbridos, los cuales pueden utilizar gas y corriente eléctrica según lo que el productor requiera. La selección del equipo adecuado para el proceso de tueste del cacao es sumamente importante, ya que garantiza la calidad deseada del producto final. En la producción a pequeña escala de chocolate, generalmente se utilizan tostadores simples y pequeños por su fácil manipulación. Los hornos convencionales ofrecen un mayor control de la temperatura dado a que se puede ajustar manualmente. Sin embargo, los hornos modernos presentan la opción de programar la temperatura y apagarse automáticamente, lo que reduce la labor humana y minimiza el constante monitoreo del proceso (Lii y Meira, 2020).

Dentro de las investigaciones que se han desarrollado en este tema, se encuentra la de Vargas-Fernández (2019) quien utilizó un lote de cacao seco con un contenido de humedad inicial de 7,23 % b.h. y una densidad aparente de 513,57 kg/m<sup>3</sup>. El proceso de torrefacción se llevó a cabo en un tostador convencional, marca BENDIG modelo ECO-2000, diseñado específicamente para café, que se compone de un cilindro rotatorio y se alimenta de gas propano, además, presenta una capacidad de 2,0 kg de café crudo. Se utilizaron muestras de 500, 1000 y 1500 g a cinco temperaturas con 5 °C de diferencia, dando inicio a una temperatura de 280 °C. La autora menciona que a partir de este estudio pudo establecer cuáles son las condiciones de tueste en un tostador convencional de café para los granos de cacao. Además, adaptó un modelo de calentamiento para los granos durante el proceso de tueste, lo que permitirá asociar los cambios térmicos con los cambios organolépticos.

Zapata *et al.* (2015) utilizaron cinco clones de cacao previamente fermentados y secos, en muestras de 100 g de semilla con cáscara y se tostaron en un horno eléctrico, marca Binder con parrilla de acero inoxidable, a 180 °C durante 10 minutos. En este estudio, se buscaba evaluar el efecto del tostado en el contenido de metabolitos secundarios y el potencial antioxidante. Los autores explican que, al observar un comportamiento muy distinto entre los clones, no fue posible obtener un efecto general del tueste sobre los atributos en estudio. Sin embargo, se menciona que los productos de las reacciones de Maillard pueden tener un efecto considerable sobre la capacidad antioxidante y las características organolépticas finales del grano tostado.

### **2.2.5. Molienda**

En el proceso de molienda del cacao, se busca reducir el tamaño de las partículas por medio de un esfuerzo mecánico cortante. Existen dos tipos de moliendas: una para obtener pequeños trozos de cacao, conocidos como *nibs*, y otra para obtener pasta o licor de cacao. El método seleccionado va a estar en función del contenido de humedad del grano de cacao y de la granulometría de los *nibs* que se desea (Arreaga, 2021). Es importante tomar en cuenta que el descascarillado de la semilla de cacao debe realizarse antes de someterla al proceso de molienda, la cual consiste en la remoción de la testa del cotiledón tostado (Garay, 2019).

### 2.3. Modelación matemática

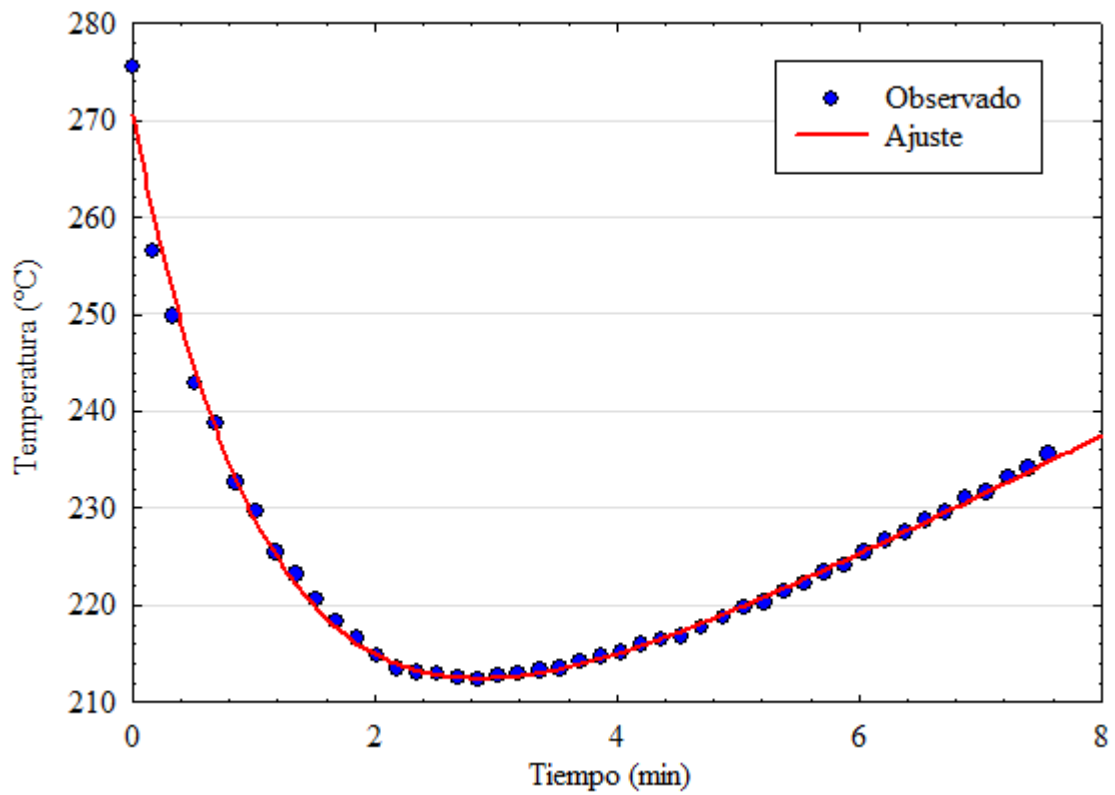
Un modelo matemático es la representación simplificada de la realidad mediante el uso de funciones que describen el comportamiento, o de ecuaciones que representan sus relaciones. Un modelo es una representación gráfica, esquemática y analítica de una realidad, y lo que hace es organizar y comunicar el fenómeno que se quiere modelar y las relaciones que tiene con las variables (Bocco, 2010).

La generación de un modelo se basa en procesos de análisis y detección de las relaciones entre datos, lo cual ayuda a establecer suposiciones y aproximaciones en la representación del problema. Aunado a esto, se materializa la visión de la realidad, lo cual ayuda a organizar, estructurar y mejorar la comprensión del sistema. Para desarrollar un modelo primero se debe identificar el problema, luego se definen variables, ecuaciones, función objetivo y parámetros. Seguidamente, se resuelve el algoritmo, con una solución óptima y suficientemente satisfactoria. Luego, se eliminan errores y se procede a la interpretación y análisis de los resultados. Finalmente, se realiza la etapa de implantación, documentación y mantenimiento, para garantizar la difusión y entendimiento del modelo generado (Ramos *et al.*, 2010).

La curva del perfil de tueste se obtiene al de evaluar el efecto de la temperatura en un tostador por medio de modelos matemáticos en los que se observa que, a partir de una variación en la temperatura inicial, se puede ocasionar cambios en la duración del proceso de torrefacción (Barrantes, 2022). A partir de esta representación gráfica de la torrefacción de los granos, como se muestra en la Figura 2, se puede identificar los grados de tueste, así como la temperatura y el tiempo necesario para alcanzarlo. Además, por medio del perfil de tueste, es posible describir el proceso de torrefacción de los granos a partir de ecuaciones de mejor ajuste, que se validan a partir de criterios estadísticos como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error estándar de los estimados (SEE), el análisis de residuos, entre otros.

**Figura 2**

Curva de perfil de tueste de cacao.



Los modelos matemáticos han sido estudiados a partir del efecto de la masa en el tueste de café con Abarca (2017) y han continuado con Barrantes (2022), donde se analizó el procesamiento de los granos y el efecto en la torrefacción del café.

### **3. Metodología**

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigaciones Varias de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas, en el cual se ubica el tostador eléctrico, y en el Laboratorio de Procesamiento Agrícola del Centro para Investigación en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Facultad de Ciencias Agroalimentarias, en el cual se ubica el tostador con fuente de gas.

El material que se utilizó fue la mezcla de los clones de cacao: CATIE R1, CATIE R4, CATIE R6, PMCT-58, ICS-95 T1 y CC-137, adquiridos en la Universidad EARTH ubicada en la zona de Las Mercedes, Guácimo, Limón. No hubo clasificación de los clones ni caracterización por tamaño, contenido de humedad ni variedad.

#### **3.1. Métodos**

En primer lugar, se realizó un diagnóstico detallado de ambos tostadores para describir el funcionamiento de los equipos. Además, para describir el proceso del calentamiento y el enfriamiento de los equipos durante el tueste, se realizaron pruebas preliminares con granos de cacao provenientes de un lote aleatorio. Para esto se utilizaron muestras de 500 g, sin selección previa por variedad, tamaño o contenido de humedad.

El proceso de calentamiento del tostador eléctrico se registró desde que se activaron las resistencias hasta que la temperatura interna del cilindro alcanzó los 230 °C. En el caso del tostador con fuente de gas, el registro se realizó desde la ignición del quemador, hasta que el tostador registró una temperatura interna del cilindro de 300 °C. Este proceso se registró sin granos en el interior de ambos cilindros, para analizar el comportamiento de los tostadores exclusivamente.

Por otra parte, para registrar el proceso de enfriamiento en ambos tostadores, la temperatura interna de los cilindros se registró desde la descarga de la última repetición de tueste de los granos, hasta el momento en el que se registró una temperatura interna del cilindro a 30 °C. Al igual que el proceso de calentamiento, el enfriamiento se registró sin granos en el interior de ambos cilindros.

Para la representación de la temperatura interna del tostador, se tomaron tres muestras de 500 g de granos secos de cacao, compuestas por la mezcla de los clones de cacao sin selección previa. La masa de los granos secos fue previamente registrada. Seguidamente, se tostó a cuatro temperaturas con diferencias de 5 °C entre cada una, con el fin de obtener el efecto de la temperatura interna del

cilindro en el perfil del tueste de los granos de cacao. Así mismo, se determinó el tiempo de duración del tueste de los granos de cacao. Posterior al tueste, se registró la masa de los granos tostados, para poder calcular el porcentaje de pérdida de masa.

Se utilizó como referencia la ecuación de ajuste del perfil de tueste de café que propuso Abarca (2017) y a partir de esta ecuación, se estableció el modelo matemático que se ajusta al perfil de tueste del cacao en cada equipo por medio de un análisis de regresión no lineal en el software SigmaPlot 14.5.

Luego de desarrollar el modelo matemático, se comparó el perfil de temperatura entre los dos equipos durante la torrefacción del cacao, con el fin de verificar cuál modelo se ajustaba mejor para ambos tostadores, y establecer las principales diferencias durante el proceso de tueste. Esta comparación se realizó a partir de las gráficas obtenidas para cada tostador y los valores generados a partir del ajuste de los modelos matemáticos, así como los coeficientes de determinación ( $R^2$ ), error estándar de estimación (SEE) y los residuos.

Finalmente, para la identificación de los niveles de tueste a partir de los modelos predictivos, se realizó el análisis del porcentaje de pérdida de masa respecto al tiempo y temperatura. Para ello se realizó el ajuste de los datos y por medio de coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ) se determinó en base a cuáles parámetros se puede predecir el nivel de tueste de los granos de cacao.

### **3.1.1. Elaboración del manual de uso**

Para la elaboración de los manuales de uso de ambos tostadores, se realizó una descripción detallada del proceso de funcionamiento y los principales cuidados que se debe tener al momento de utilizar el equipo. Además, se identificaron las principales secciones y sus componentes, así como la caracterización de los equipos, tomando en cuenta: dimensiones, capacidad, velocidad de rotación de los cilindros, entre otros.

Los manuales de uso de ambos equipos se encuentran en la sección de Apéndices (apéndice 1 y 2), al final de este documento.

El proceso de calentamiento de ambos tostadores fue evaluado desde el momento en el que se activó cada equipo hasta alcanzar una temperatura establecida, la cual en el caso del tostador eléctrico fue de 230 °C y para el tostador con fuente de gas fue de 300 °C. Posteriormente, se



evaluó la caída de temperatura interna del tostador posterior a la descarga de los granos secos, para poder analizar el comportamiento de la recuperación de la temperatura la cual ha sido reportada en otros estudios como el de Abarca (2017), Barrantes (2022) y Vargas-Fernández (2019).

En el caso del proceso de enfriamiento en ambos equipos, fue evaluado desde que se hizo la última descarga de granos tostados hasta que los tostadores registraron una temperatura interna de 30 °C.

### **3.1.2. Proceso de torrefacción**

Para realizar la torrefacción se utilizó dos tostadores, el primero fue un tostador eléctrico marca TAMECO, y el segundo con fuente de gas marca BENDIG, modelo ECO-2000. En ambos tostadores se utilizó tres muestras de 500 g en cada equipo a cuatro temperaturas con diferencias de 5 °C cada una, sin realizar selección previa por tamaño. El proceso de tueste se registró desde que se descargó la muestra de cacao seco en el interior del tostador, hasta que se alcanzó la temperatura establecida.

Las temperaturas se seleccionaron tomando como referencia el estudio realizado por Vargas-Fernández (2019) en el cual se utilizaron temperaturas de 210 °C a 230 °C con diferencias de 5 °C entre cada muestra. Por tanto, para este estudio, en el tostador eléctrico se utilizaron temperaturas de 180, 185, 190 y 195 °C, mientras que para el tostador con fuente de gas se utilizaron 220, 225, 230 y 235 °C. Se establecieron temperaturas distintas para cada equipo dado a que las temperaturas que alcanza el tostador eléctrico son menores a las que se pueden registrar en el tostador de gas.

### **3.1.3. Determinación de la temperatura**

La temperatura interna del tostador con fuente de gas se registró a partir de un termopar conectado al escáner de temperatura marca Cole-Parmer Instrument Company y de fabricación Barnant Company, modelo 92000-00 Benchtop 115 V, el cual envía los datos cada 20 s a un puerto serial de la computadora en la que se utiliza una interface llamada ScanLink versión 2.0. Los termopares en este equipo están ubicados dentro del tostador, en la entrada en donde se descarga el grano, como se muestra en la Figura 3. Este termopar está en contacto directo con el aire interno del cilindro rotativo.

### Figura 3

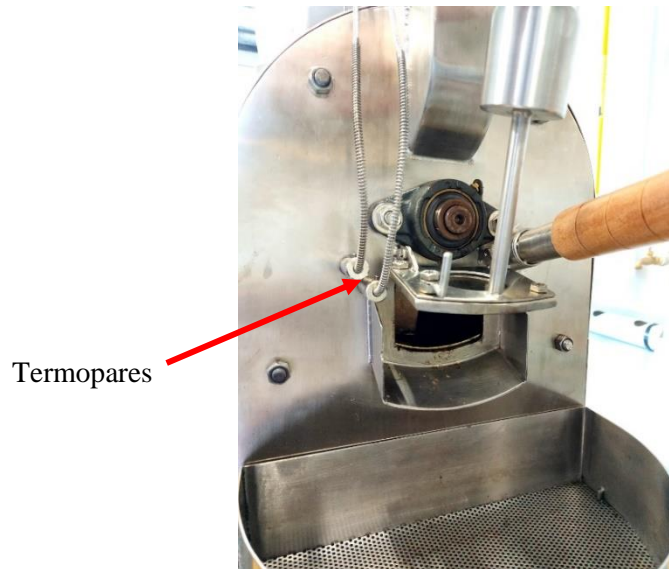
Escáner de temperatura y ubicación del termopar en el tostador con fuente de gas.



En el caso del tostador eléctrico, la temperatura interna del tostador se midió por medio de un termopar tipo K2M ubicado en la zona frontal del tostador, como se muestra en la Figura 4. Los termopares de este tostador no están en contacto directo con el metal del cilindro rotativo, sino que está en contacto con el aire interno de la recámara, muy próximo a la pared del cilindro. Un termopar está conectado a una computadora portátil por medio de un cable USB, y los datos se registraron por medio del software Artisan. El otro termopar está conectado al panel de control ubicado al costado izquierdo del tostador.

#### Figura 4

Ubicación de los termopares en el tostador eléctrico.



#### 3.1.4. Modelo de calentamiento del cilindro rotativo

El calentamiento del cilindro rotativo en ambos equipos se realizó mediante pruebas preliminares de calentamiento de los equipos para que el tostador se estabilice y posteriormente aplicar la ecuación desarrollada por Abarca (2017), que se define en la ecuación 2.

$$T(t) = T_e + (T_a - T_e) \cdot e^{-k \cdot t} \quad (2)$$

En donde:

T: temperatura en el interior del tostador (K)

T<sub>a</sub>: temperatura ambiente (°C)

T<sub>e</sub>: temperatura de equilibrio (°C)

k: coeficiente determinado por el modelo

t: tiempo (min)

### 3.1.5. Pérdida de masa

Los granos al finalizar el proceso de torrefacción, pierden un porcentaje de masa. Los granos de cacao se enfriaron por una corriente de aire generada por un abanico que opera en succión de aire a velocidad constante. Posteriormente, se registró la masa antes y después de la torrefacción de los granos de cacao por medio de una balanza digital de dos decimales y utilizando la ecuación 3. Esta misma ecuación se puede utilizar para calcular el contenido de humedad en base húmeda (%b.h.).

$$X_o = 100 \cdot \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \quad (3)$$

En donde:

$X_o$ : pérdida de masa del grano (%)

$m_i$ : masa inicial de los granos antes de la prueba (g)

$m_f$ : masa final de los granos después de la prueba (g)

### 3.1.6. Modelos para el perfil de tueste

En el Cuadro 1 se muestran las ecuaciones evaluadas para el desarrollo del proyecto, de las cuales la de Abarca (2017), compuesta por una parte exponencial decreciente con otra parte lineal, originalmente fue desarrollada para café. A partir del análisis de desarrollo de este modelo, y del comportamiento observado de los datos obtenidos, se elaboró el modelo propuesto de ajuste del perfil de tueste de los granos de cacao para describir el comportamiento en los dos tostadores evaluados.

#### Cuadro 1

Modelos para el perfil de tueste.

Nombre del modelo	Modelo	Número
Abarca (2017)	$T_i(t) = a + b \cdot t + c \cdot \exp^{-k \cdot t}$	4
Modelo propuesto	$T_i(t) = a - t + b \cdot t^2 + c \cdot \exp^{-k \cdot t}$	5

$T_i$  es la temperatura inicial en el interior del tostador (°C) y  $t$  es el tiempo en minutos. Los valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $k$  son parámetros estadísticos del ajuste matemático.

Barrantes *et al.* (2020) asocian los coeficientes de la ecuación 4 a propiedades físicas, lo cual permite una mejor comprensión del comportamiento del modelo y su ajuste con el perfil de tueste.

Se explica que los coeficientes a y c se relacionan a temperaturas con unidades de °C, el coeficiente b se describe como la tasa de calentamiento global, con unidades de °C min<sup>-1</sup>, y finalmente, el coeficiente k se describe como la constante de enfriamiento con unidades de min<sup>-1</sup>.

En el caso de la ecuación 5, los coeficientes a y c se relacionan a temperaturas (°C), b se relaciona a la tasa de calentamiento (°C min<sup>-1</sup>) y k se describe como la constante de enfriamiento (min<sup>-1</sup>).

El criterio de selección del modelo de mejor ajuste se realizó a partir del análisis del coeficiente de determinación de ajuste ( $R^2$ ), errores estándar de los estimados (SEE) y de análisis de residuos obtenido para cada temperatura y repetición evaluada y, posteriormente, para el ajuste general de las tres repeticiones.

### **3.2. Análisis estadístico de los datos**

Los datos de temperatura y tiempo que se obtuvieron como variables de respuesta durante el proceso de tueste en ambos tostadores, se analizaron en el software SigmaPlot 14.5 para determinar las constantes por regresión no lineal del modelo de calentamiento y enfriamiento de los granos de cacao, así como el perfil de tueste y la relación entre la pérdida de masa respecto a la temperatura y el tiempo.

## 4. Resultados y análisis de resultados

### 4.1. Descripción del funcionamiento del tostador eléctrico y el tostador con fuente de gas.

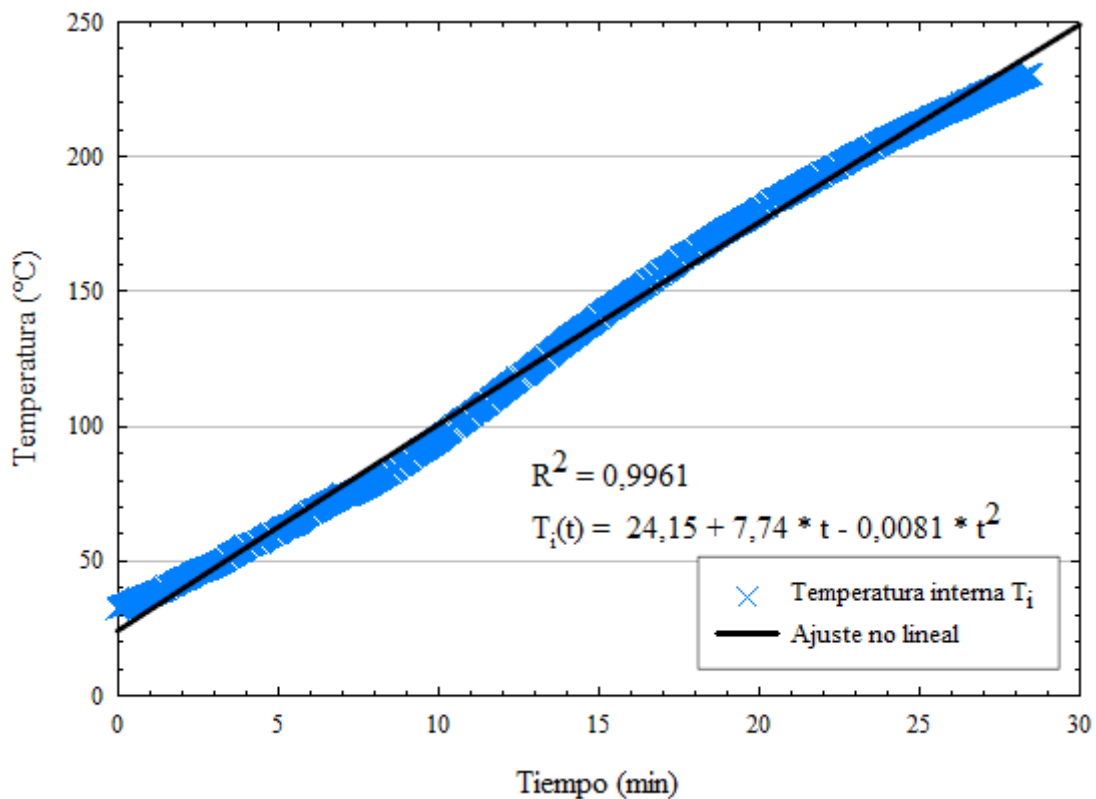
Las condiciones de seguridad y de operación del tostador eléctrico y el de gas, fueron desarrollados en esta investigación y se encuentran descritas en el apéndice 1 y 2 respectivamente.

#### 4.1.1. Proceso de calentamiento de los tostadores

El proceso de calentamiento del tostador eléctrico se muestra en la Figura 5, en la cual se observa que, a partir del calentamiento de las resistencias eléctricas y la rotación del cilindro, la temperatura interna del tostador aumenta exponencialmente hasta alcanzar la temperatura deseada. Se obtuvo que el tostador puede alcanzar una temperatura de 230 °C en 28 minutos, sin embargo, puede alcanzar temperaturas mayores a la establecida. Además, el proceso de calentamiento se ajusta al modelo polinomial con un valor de  $R^2$  de 99,61%.

**Figura 5**

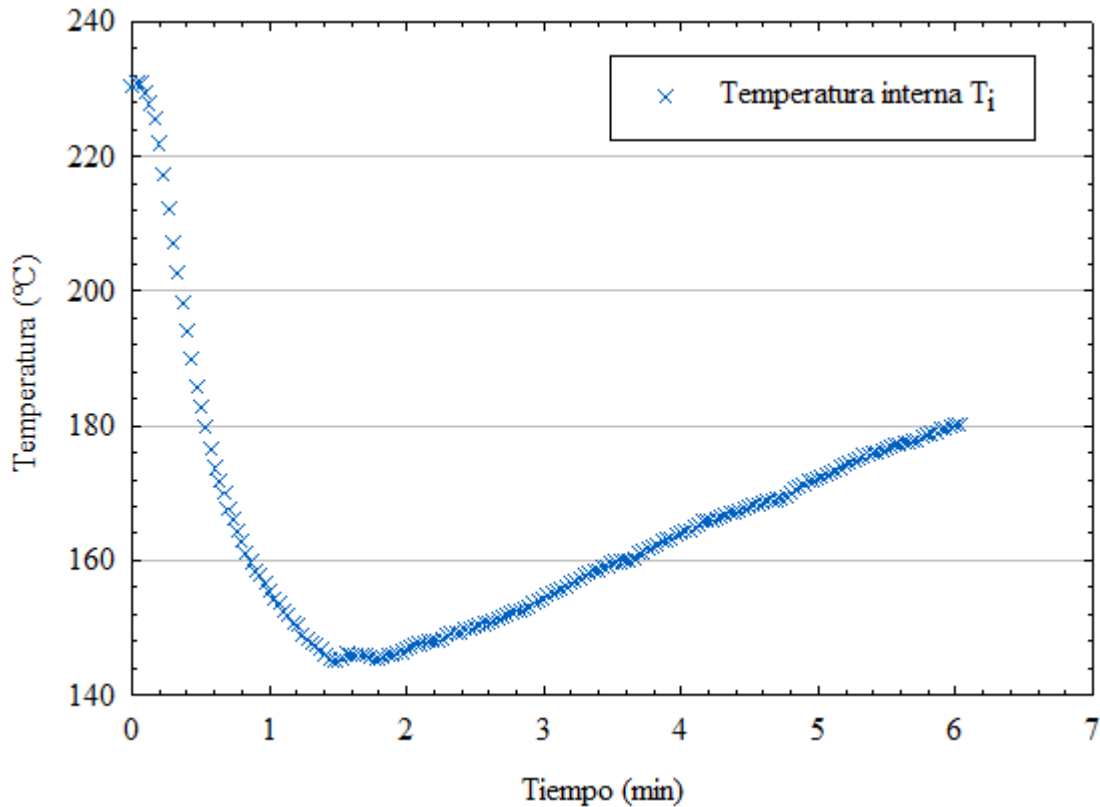
Curva de calentamiento del tostador eléctrico.



La temperatura interna del cilindro siempre debe ser mayor a la establecida para el tueste, ya que, al momento de descargar los granos dentro del cilindro, se presenta una caída de 90 °C aproximadamente como se muestra en la Figura 6. Esta caída de temperatura puede variar y ser ocasionada por diferentes factores como lo explica Abarca (2017), los cuales pueden ser: la diferencia en la temperatura entre la masa de granos y el sistema, o el grado de tueste y la masa de granos.

**Figura 6**

Caída de la temperatura interna del tostador eléctrico debido a la descarga de 500 g de cacao seco en su interior.



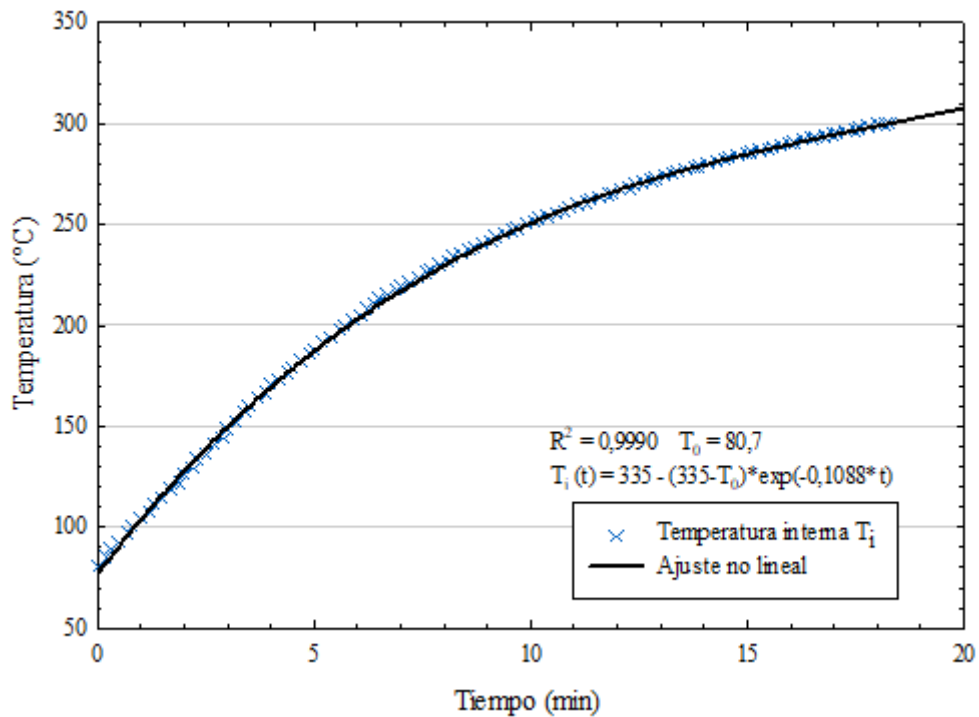
Por otra parte, en la Figura 6 también se obtuvo que el tostador eléctrico comienza a recuperar la temperatura interna aproximadamente a los dos minutos después de haber sido descargado el grano. La disminución de la temperatura se debe al choque térmico ocasionado por el ingreso de una masa fría en el interior del tostador, seguido de un proceso de recuperación de la temperatura el cual ha sido reportado en café, por Abarca (2017) y Barrantes (2022), y en cacao por Vargas-

Fernández (2019). A partir del punto de recuperación, la temperatura interna del tostador aumenta hasta alcanzar el nivel de tueste establecido.

El proceso de precalentamiento del tostador con fuente de gas se muestra en la Figura 7, en la cual se observa la cinética de precalentamiento del cilindro rotativo producto de la combustión del gas, al nivel máximo de la llama del quemador. Se evidenció que el tostador puede llegar a una temperatura de 300 °C en 19 minutos. Además, el proceso de calentamiento se ajusta al modelo exponencial creciente propuesto por Abarca (2017) con un valor de  $R^2$  de 99,90%.

### Figura 7

Cinética del precalentamiento del tostador con fuente de gas.

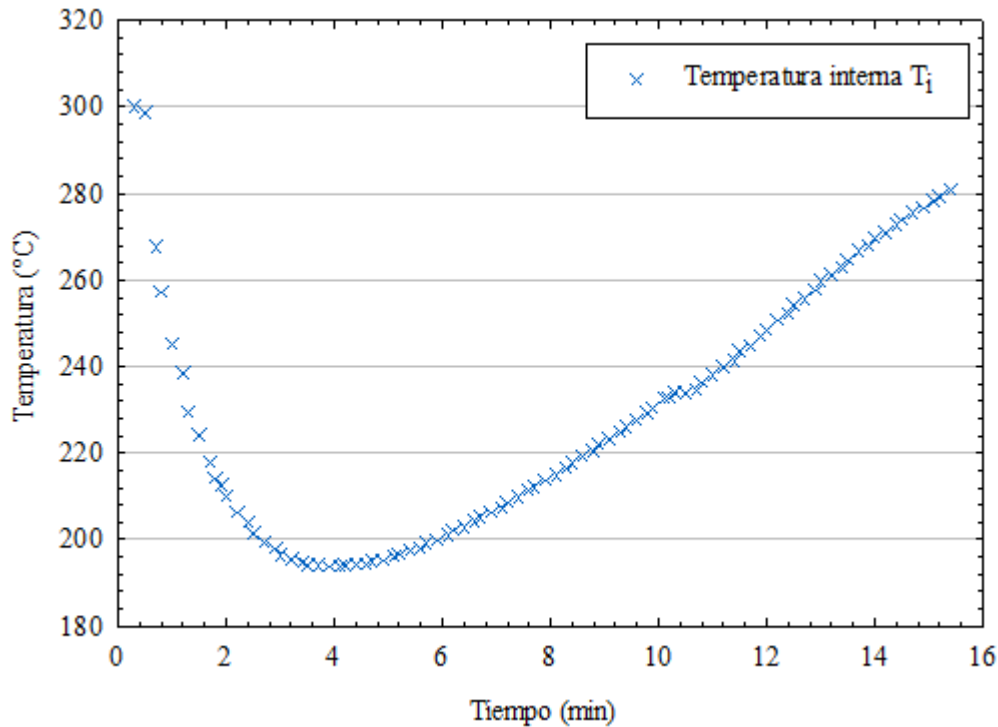


La temperatura interna del cilindro siempre debe ser mayor a la establecida para el tueste, ya que, al momento de descargar los granos dentro del cilindro, se presenta una caída de 100 °C aproximadamente como se muestra en la Figura 8. Esta caída de temperatura, al igual que el tostador eléctrico, puede variar y ser ocasionada por diferentes factores.



**Figura 8**

Caída de la temperatura interna del tostador con fuente de gas debido a la descarga de 500 g de cacao seco en su interior.

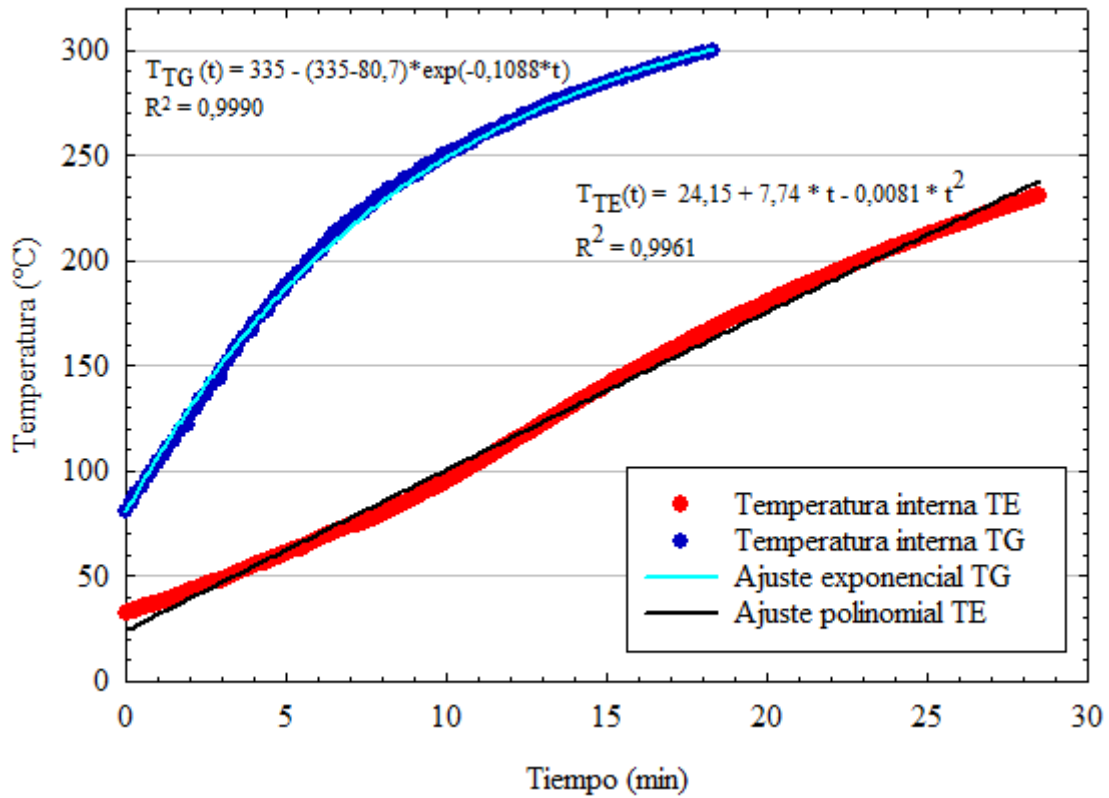


En la Figura 8 se muestra que el tostador comienza a recuperar la temperatura interna aproximadamente a los dos minutos después de haber descargado el grano. La disminución de la temperatura, al igual que en tostador eléctrico, se debe al choque térmico ocasionado por el ingreso de una masa fría en el interior del tostador, seguido de un proceso de recuperación de la temperatura el cual ha sido reportado en café, por Abarca (2017) y Barrantes (2022), y en cacao por Vargas-Fernández (2019). A partir del punto de recuperación, la temperatura interna del tostador aumenta hasta alcanzar la temperatura adecuada para obtener el nivel de tueste establecido.

Al comparar los procesos de calentamiento de ambos tostadores, como se muestra en la Figura 9, se observa que el tiempo que le toma calentarse al tostador con fuente gas es menor en comparación al tostador eléctrico que tarda nueve minutos más aproximadamente.

**Figura 9**

Comparación del proceso de calentamiento en ambos tostadores.

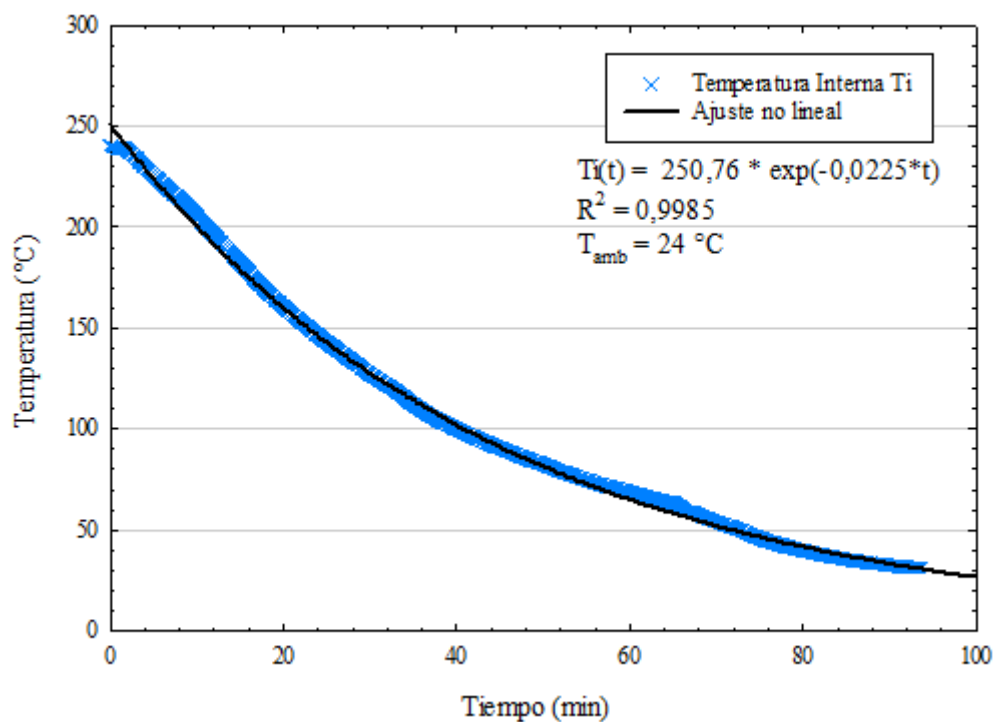


#### 4.1.2. Proceso de enfriamiento de los tostadores

En la Figura 10 se observa la cinética del enfriamiento del tostador eléctrico, la cual tiene un comportamiento exponencial decreciente. Este proceso tarda aproximadamente una hora y media en alcanzar una temperatura de 30 °C en un espacio con poca ventilación y con el extractor de aire encendido. El registro se realizó a partir de la desactivación de las resistencias eléctricas posterior a la descarga de los granos tostados.

**Figura 10**

Curva de enfriamiento del tostador eléctrico.

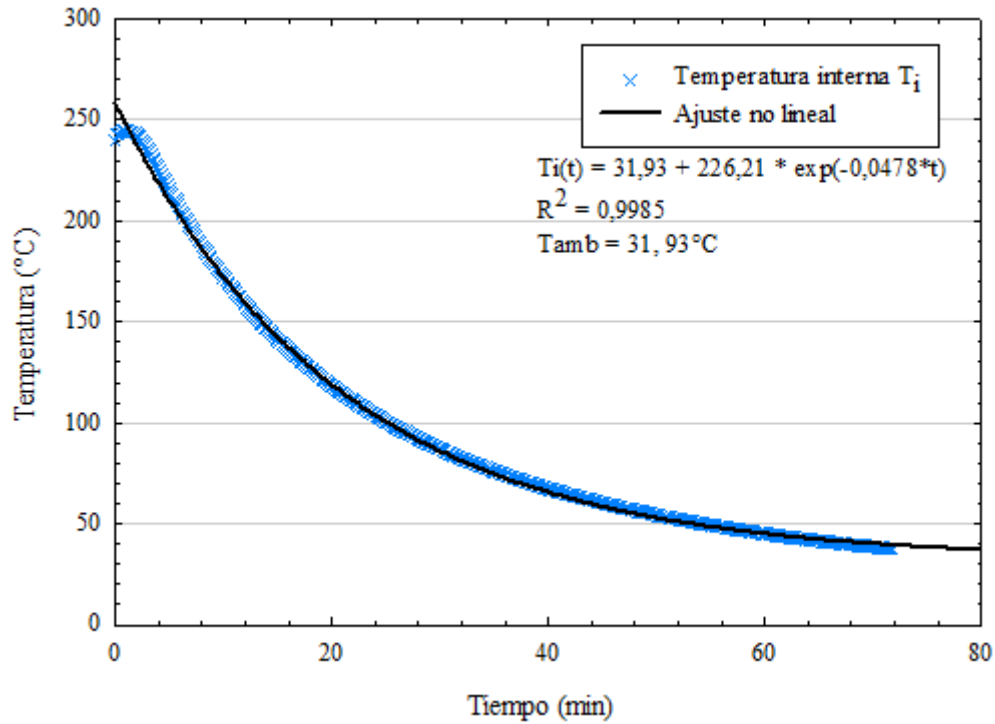


Para el ajuste matemático realizado, se obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 99,85% y un error estándar de los estimados (SEE) de 2,3550. Además, los coeficientes presentaron un p valor menor a 0,0001. Conforme aumente la temperatura final de tueste, el tiempo de enfriamiento del equipo es mayor.

En la Figura 11 se observa la cinética del enfriamiento del tostador con fuente de gas, la cual tiene un comportamiento exponencialmente decreciente. Este proceso tarda aproximadamente una hora en alcanzar una temperatura de 30 °C en un espacio ventilado. El registro se realizó a partir del cierre de la válvula de gas.

**Figura 11**

Curva de enfriamiento del tostador con fuente de gas.

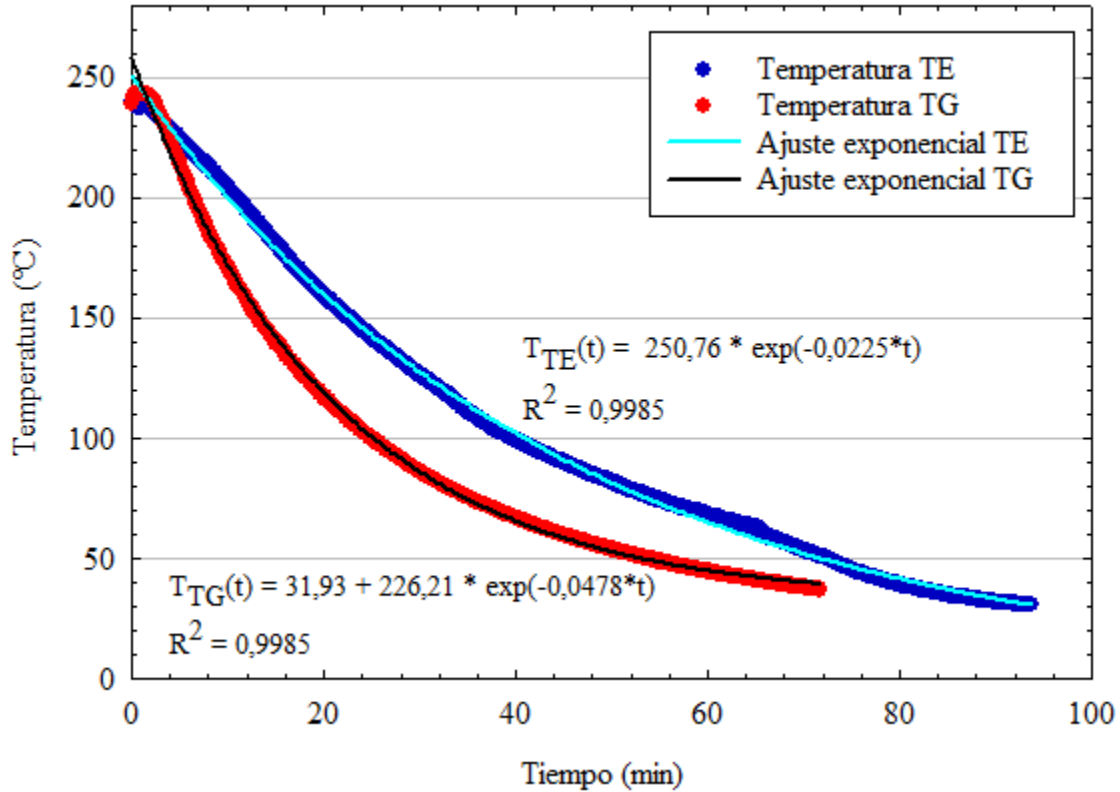


Para el ajuste matemático realizado, se obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 99,85% y un error estándar de los estimados (SEE) de 2,2618. Además, los coeficientes presentaron un p valor menor a 0,0001. Conforme aumente la temperatura final de tueste, el tiempo de enfriamiento del equipo es mayor.

En la Figura 12 se observa la comparación del proceso de enfriamiento de ambos tostadores, en la cual se demuestra que el comportamiento se ajusta a una función exponencial decreciente con un  $R^2$  de 99,85 % en ambos tostadores.

**Figura 12**

Comparación del proceso de enfriamiento en ambos tostadores.



En el caso del tostador eléctrico, se observa que el proceso de enfriamiento del equipo toma más tiempo en comparación al tostador con fuente de gas, lo cual evidencia que este presenta mayor hermeticidad.

## **4.2. Representación de la temperatura de los tostadores evaluados con un modelo matemático para el perfil de tueste con los granos de cacao.**

### **4.2.1. Tiempos de torrefacción del cacao.**

Para cada tostador se evaluó el tiempo promedio en las cuatro temperaturas finales de tueste, las cuales se muestran en el Cuadro 2.

## Cuadro 2

Duración del proceso de torrefacción en minutos.

Equipo	Temperatura (°C)			
	Tiempo (min)			
Tostador eléctrico	180	185	190	195
	5,8 ± 0,4	5,5 ± 0,2	6,3 ± 0,03	7,3 ± 0,5
Tostador con fuente de gas	220	225	230	235
	5,2 ± 0,1	6,1 ± 0,2	6,8 ± 0,1	7,6 ± 0

Se observa que para ambos equipos la duración del tueste aumenta con la temperatura. El tostador eléctrico tarda más en alcanzar la temperatura establecida en comparación al tostador con fuente de gas, en el cual se utilizaron temperaturas mayores. El tueste a 190 °C en el tostador eléctrico tuvo una desviación estándar de  $\pm 0,03$  minutos indicando similitud con el tueste a 225 °C en el tostador con fuente de gas.

El tiempo promedio de tueste está entre 5,2 a 7,6 minutos, lo cual se ajusta a las recomendaciones hechas para el tueste de cacao fino y de aroma, en donde realizan tuestes en períodos de 5 a 120 minutos (Gutiérrez, 2021). Sin embargo, para este estudio se utilizó temperaturas mayores a las recomendadas que, según Aldave-Palacios (2016), son entre 110 y 150 °C, pero se realizó en una sola corrida tomando en cuenta las evaluaciones realizadas por Vargas-Fernández (2019) a diferentes masas.

### 4.2.2. Perfil de tueste de cacao en el tostador eléctrico.

El Cuadro 3, muestra los valores de los coeficientes para el modelo ajustado de Abarca (2017) en el tostador eléctrico para cada temperatura evaluada. Se observa que, en las tres repeticiones, los coeficientes a (°C), b (°C min<sup>-1</sup>) y k (min<sup>-1</sup>) tuvieron diferencias de aproximadamente  $\pm 1$  y el coeficiente c presentó diferencias de hasta  $\pm 14$  °C entre los valores. Para todas las repeticiones los parámetros del modelo fueron determinados con un p-valor menor a 0,0001.

### Cuadro 3

Resumen de los coeficientes del modelo de ajuste de Abarca (2017) para la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico a cuatro temperaturas distintas.

		180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
<b>Coefficiente de regresión</b>					
a (°C)	R1	126,2	130,5	128,8	133,2
	R2	129,0	128,2	126,2	135,9
	R3	128,3	127,2	129,9	130,9
b (°C min <sup>-1</sup> )	R1	9,4	10,9	9,8	8,4
	R2	8,3	10,2	10,4	8,2
	R3	10,1	10,0	9,6	9,8
c (°C)	R1	111,6	108,3	99,8	98,5
	R2	104,7	108,6	114,1	99,2
	R3	105,0	111,1	109,4	104,2
k (min <sup>-1</sup> )	R1	1,9	1,8	2,0	2,2
	R2	2,1	1,9	1,9	2,5
	R3	2,1	1,8	2,1	2,2
<b>p-valor</b>					
a		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
b		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
c		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
k		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

El modelo de Abarca (2017) se ajustó adecuadamente a los datos obtenidos durante la torrefacción del cacao en el tostador eléctrico, lo cual se asimila a lo obtenido por Vargas-Fernández (2019) en donde se comprueba que este modelo es aplicable tanto para café como para cacao. En el Cuadro 4, se muestran los parámetros estadísticos del modelo para las cuatro temperaturas evaluadas en el tostador eléctrico.

#### Cuadro 4

Parámetros estadísticos del modelo de ajuste de Abarca (2017) para la temperatura interna del tostador eléctrico para las tres repeticiones.

		180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
<b>Parámetros estadísticos</b>					
<b>R<sup>2</sup></b>	R1	0,9952	0,9895	0,9988	0,9969
	R2	0,9981	0,9953	0,9934	0,9779
	R3	0,9944	0,9906	0,9951	0,9952
<b>SEE</b>	R1	1,1683	1,6811	0,5613	0,9004
	R2	0,6834	1,1290	1,4434	2,5670
	R3	1,1962	1,6297	1,1870	1,1879

SEE: error estándar de los estimados

Se obtuvo que el  $R^2$  promedio para las cuatro temperaturas fue de 99,34% por lo cual se determina que el cambio de temperatura no afecta este parámetro. El error estándar de los estimados (SEE) a nivel general fue menor a 2,57 %.

El modelo propuesto, el cual se muestra en la ecuación 5, se compone por una parte exponencial decreciente y una parte polinomial de grado dos. Este se obtuvo mediante el análisis inicial de la ecuación desarrollada por Abarca (2017) y del ajuste de las temperaturas basado en el parámetro  $R^2$ .

$$T_i(t) = a - t + b \cdot t^2 + c \cdot \exp^{-k \cdot t} \quad (5)$$

En el Cuadro 5 se muestra los valores de los coeficientes para la ecuación 5 en el tostador eléctrico para las cuatro temperaturas evaluadas. Se observa que, en las tres repeticiones, los coeficientes a y c presentaron mayor variación con diferencias entre los valores de  $\pm 8,8$  °C y  $\pm 12,4$  °C, respectivamente. En el caso de los coeficientes b (°C min<sup>-1</sup>) y k (min<sup>-1</sup>), estos presentaron menor variación entre los valores con diferencias de  $\pm 0,5$  y  $\pm 1,1$ , respectivamente. Para todas las repeticiones los parámetros del modelo fueron determinados con un p-valor menor a 0,0001.



### Cuadro 5

Resumen de los coeficientes del modelo de ajuste propuesto para la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico a cuatro temperaturas distintas.

		180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
		Coeficiente de regresión			
a (°C)	R1	144,9	150,5	148,5	151,1
	R2	145,5	147,8	147,2	154,3
	R3	146,1	146,3	149,0	150,7
b (°C min <sup>-1</sup> )	R1	1,3	1,6	1,3	1,1
	R2	1,2	1,5	1,4	1,0
	R3	1,6	1,5	1,3	1,3
c (°C)	R1	95,2	90,0	83,2	83,9
	R2	90,9	91,1	95,5	83,1
	R3	89,1	93,7	92,8	87,6
k (min <sup>-1</sup> )	R1	2,4	2,3	2,7	3,1
	R2	2,7	2,4	2,6	3,5
	R3	2,7	2,3	2,7	3,0
		p-valor			
a		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
b		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
c		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
k		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

El modelo propuesto se ajustó adecuadamente a los datos obtenidos durante la torrefacción del cacao en el tostador eléctrico. En el Cuadro 6, se muestran los parámetros estadísticos obtenidos para cada temperatura evaluada en el tostador eléctrico.

### Cuadro 6

Parámetros estadísticos del modelo de ajuste propuesto para la temperatura interna del tostador eléctrico para las tres repeticiones.

		180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
<b>Parámetros estadísticos</b>					
<b>R<sup>2</sup></b>	R1	0,9789	0,9770	0,9784	0,9763
	R2	0,9846	0,9781	0,9668	0,9025
	R3	0,9745	0,9750	0,9729	0,9610
<b>SEE</b>	R1	2,4169	2,4604	2,3338	2,4733
	R2	1,9283	2,4220	3,2171	5,3617
	R3	2,5218	2,6277	2,7603	3,3709

SEE: error estándar de los estimados

Se obtuvo que el  $R^2$  promedio para todas las temperaturas fue de 96,88% con un error estándar de los estimados general menor a 5,36%.

Se observa en el Cuadro 7 que al realizar el ajuste general para las cuatro temperaturas con el modelo de Abarca (2017), se tuvo un ajuste superior a 96,92% y el menor SEE de 1,56%. Además, se muestra que los coeficientes presentan un comportamiento similar con variaciones menores a  $\pm 8$ .

### Cuadro 7

Análisis estadístico general del modelo de Abarca (2017) para la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico a cuatro temperaturas distintas.

	180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
<b>Coefficiente de regresión</b>				
a (°C)	129,4	130,3	128,3	134,1
b (°C min <sup>-1</sup> )	8,8	9,8	10,0	8,6
c (°C)	105,9	108,0	107,7	100,2
k (min <sup>-1</sup> )	2,1	1,9	2,0	2,3
<b>Parámetros estadísticos</b>				
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9748	0,9692	0,9913	0,9806
<b>SEE</b>	2,5372	2,8862	1,5660	2,3397

Por otra parte, se observa en el Cuadro 8 que, al realizar el ajuste general para las cuatro temperaturas con el modelo propuesto, se tuvo un ajuste superior a 92,79% y el menor SEE de 2,98. Además, se muestra que los coeficientes presentan un comportamiento similar con variaciones menores a  $\pm 6,6$ .

### Cuadro 8

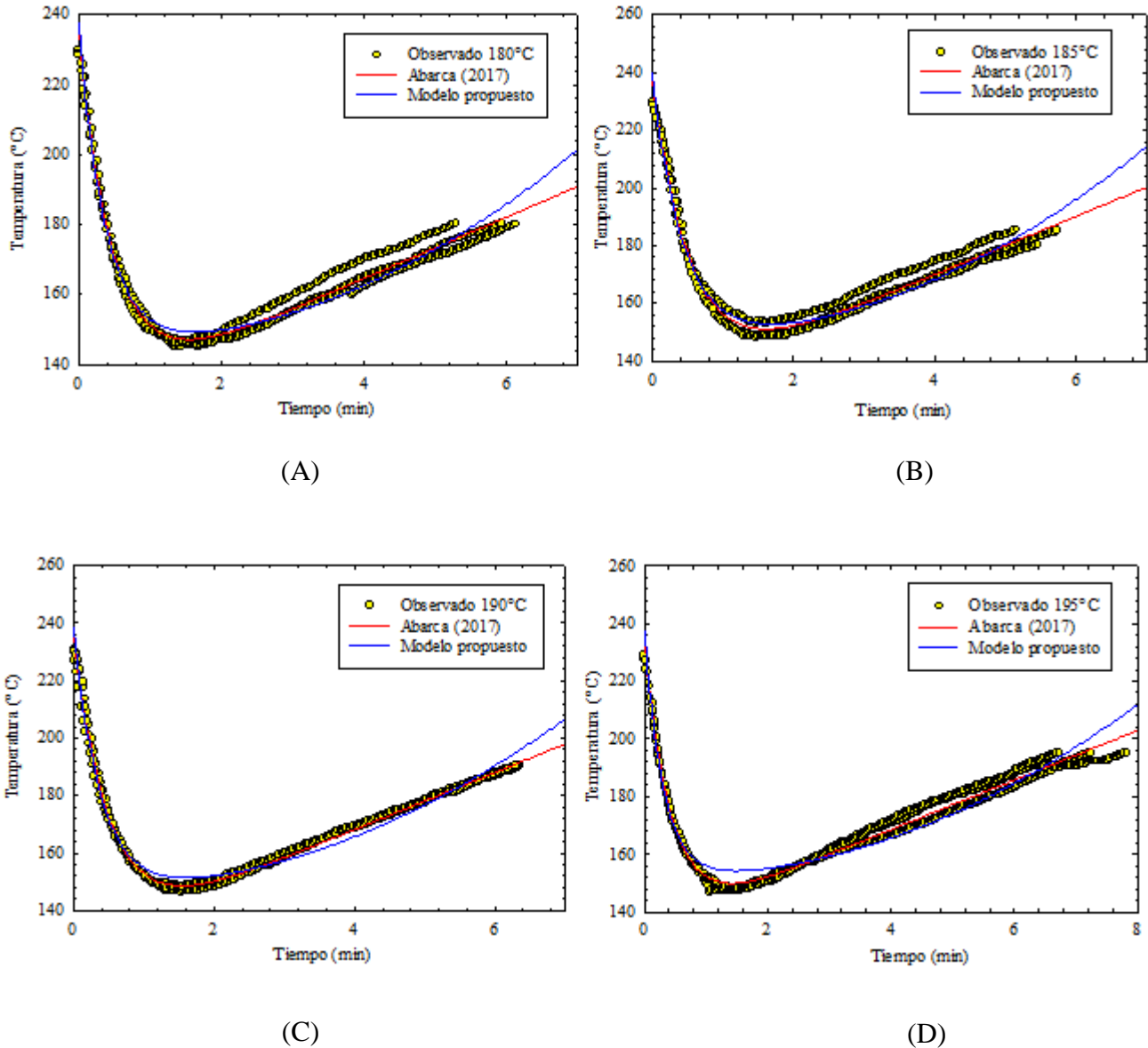
Análisis estadístico general del modelo propuesto para la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico a cuatro temperaturas distintas.

	180 °C	185 °C	190 °C	195 °C
<b>Coefficiente de regresión</b>				
a (°C)	146,4	148,7	148,3	152,7
b (°C min <sup>-1</sup> )	1,3	1,5	1,3	1,0
c (°C)	91,1	91,3	90,5	84,5
k (min <sup>-1</sup> )	2,7	2,4	2,7	3,3
<b>Parámetros estadísticos</b>				
R <sup>2</sup>	0,9528	0,9529	0,9683	0,9279
SEE	3,4717	3,5777	2,9800	4,5146

En la Figura 13 se muestra la tendencia general del perfil de tueste para el cacao a cuatro temperaturas diferentes en el tostador eléctrico. Las líneas representan el ajuste general para los dos modelos evaluados tomando en cuenta las tres repeticiones realizadas para cada temperatura. Se observa que el modelo de Abarca (2017) tiene un mejor ajuste ya que la curva pasa por el medio de los datos obtenidos a diferencia del modelo propuesto, siendo el modelo de Abarca el que tiene mejor ajuste, lo cual coincide con los rendimientos estadísticos descritos anteriormente.

**Figura 13**

Ajuste de las tres repeticiones para el perfil de tueste de cacao en tostador eléctrico a cuatro temperaturas: (A) 180 °C, (B) 185 °C, (C) 190 °C y (D) 195 °C.

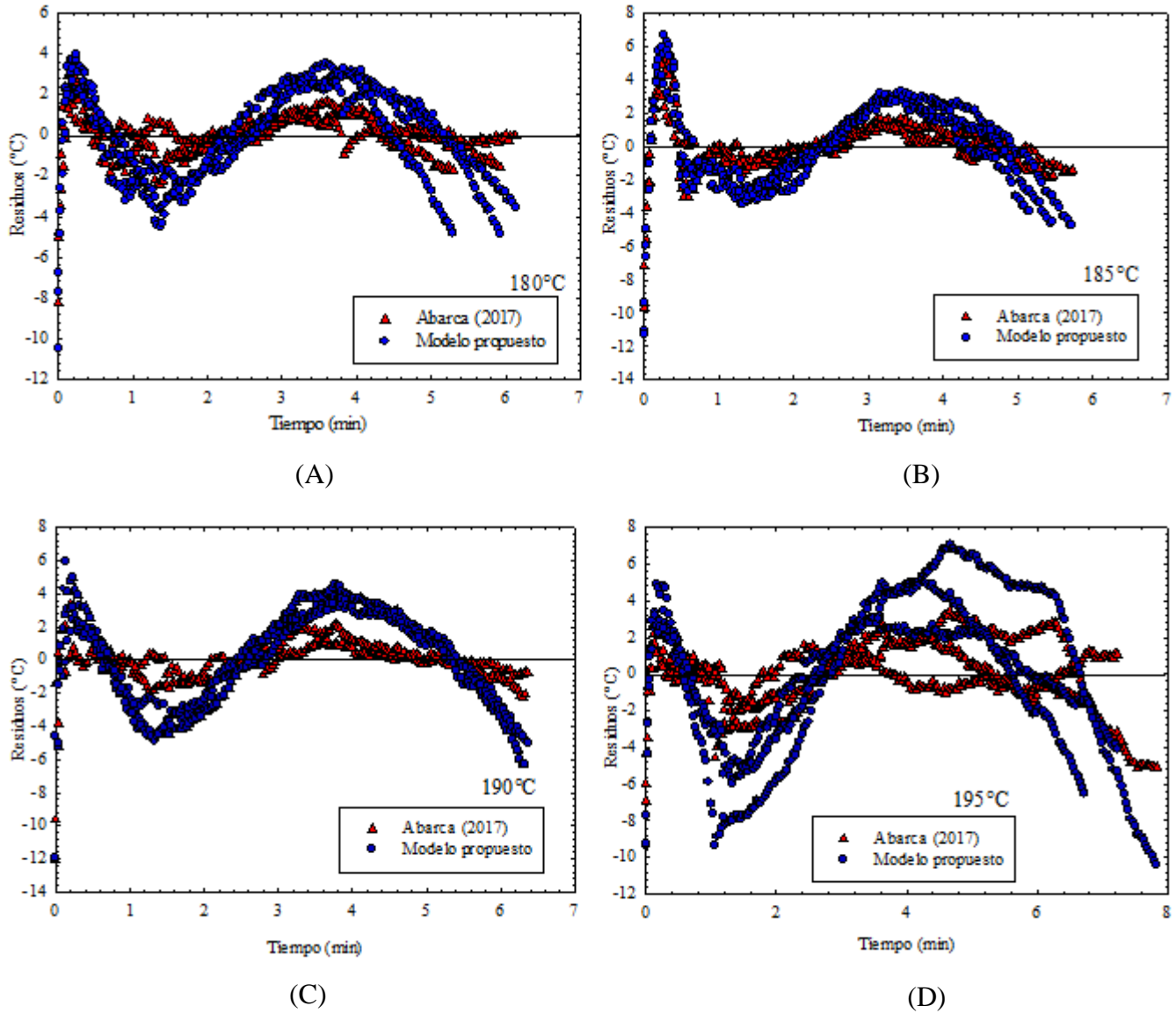


#### 4.2.2.1. Análisis de los residuos de los modelos matemáticos en el tostador eléctrico.

En la Figura 14 se muestra el análisis de los residuos respecto al tiempo para los modelos estudiados durante la torrefacción de cacao en un tostador eléctrico. Se observa que para ambos casos, conforme aumenta el tiempo, el comportamiento de los residuos es aleatorio ya que varía entre datos positivos y negativos respecto al valor 0 en el eje Y.

**Figura 14**

Análisis de los residuos respecto al tiempo para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de cacao en tostador eléctrico. (A) 180 °C, (B) 185 °C, (C) 190 °C y (D) 195 °C.



En la Figura 14 también se observa que en el primer minuto los residuos presentan variaciones de mayor magnitud en ambos modelos. Barrantes (2022) explica que, en el caso del café, esta variación en los primeros minutos es producto a una diferencia importante entre la temperatura del grano al momento de ingresar al tostador, la temperatura del aire del tostador y la de la pared del cilindro.

A partir del análisis de los residuos, se determina que el modelo de Abarca (2017) es el que describe mejor el perfil de tueste de cacao en el tostador eléctrico dado a que, en su mayoría, los valores residuales están más cercanos al valor 0 en el eje Y, a diferencia del modelo propuesto que presenta mayor magnitud de los valores respecto al valor 0, lo cual representa que el modelo no se ajusta al comportamiento observado.

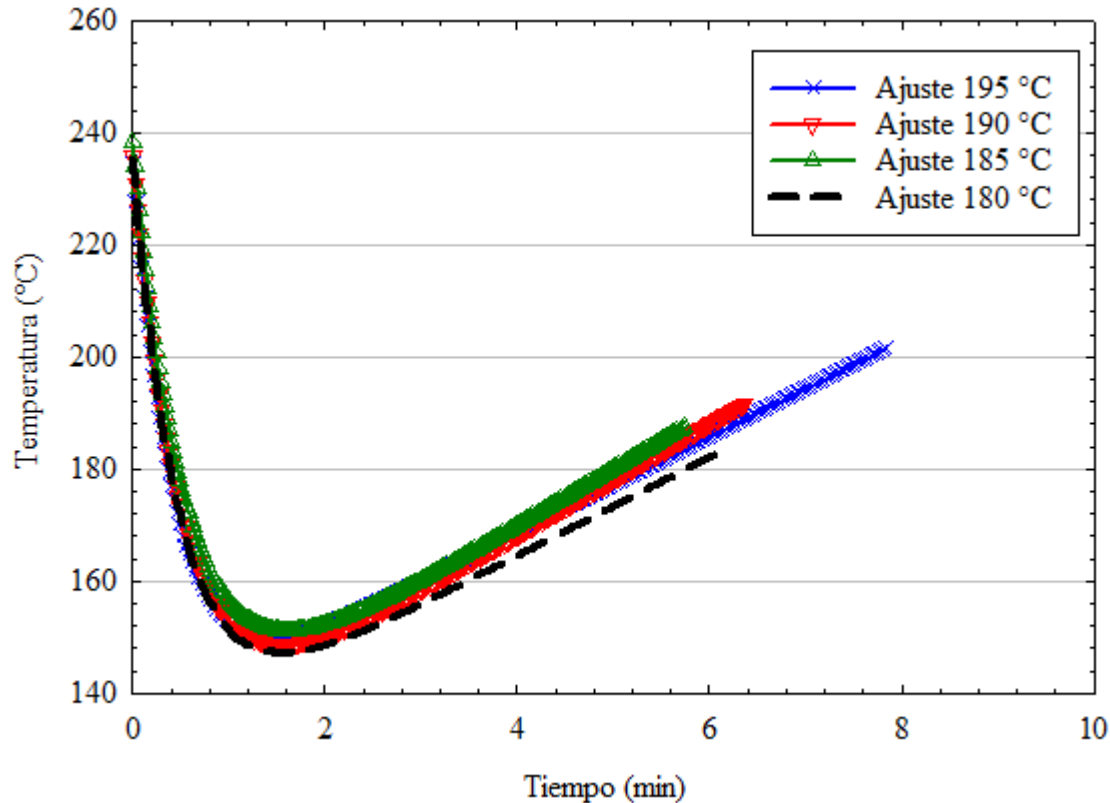
#### **4.2.2.2. Análisis general del modelo de mejor ajuste del perfil de tueste en el tostador eléctrico.**

Para el tostador eléctrico, el modelo de Abarca (2017) es el que presentó los mejores resultados de ajuste tomando en cuenta el  $R^2$  el cual fue mayor a 96,92% para las cuatro temperaturas evaluadas. A partir del análisis hecho individualmente para todos los datos observados en las tres repeticiones, evaluando la misma masa y cuatro temperaturas diferentes, se obtuvo un ajuste general con el cual se puede predecir el tiempo promedio de tueste del cacao en el tostador eléctrico.

En la Figura 15 se muestra el modelo de Abarca (2017), compuesto por una parte exponencial con otra lineal, el cual presentó el mejor ajuste con un  $R^2$  mayor a 97,80%. Por otra parte, el modelo propuesto, compuesto por una parte exponencial con otra polinomial de segundo grado, presentó un buen ajuste con un  $R^2$  mayor a 96,10%.

**Figura 15**

Ajuste general del modelo de Abarca (2017) para el perfil de tueste del cacao en el tostador eléctrico para las cuatro temperaturas evaluadas.



Los resultados estadísticos obtenidos son similares a los presentados en el estudio de Vargas-Fernández (2019), quien obtuvo un  $R^2$  mayor a 99,40% y la desviación estándar menor a 1,54% al utilizar el modelo de Abarca (2017). Estos resultados comprueban que el modelo desarrollado para café por Abarca (2017) puede ser aplicado para describir el perfil de tueste de cacao en un tostador cilíndrico convencional eléctrico.

#### **4.2.3. Perfil de tueste de cacao en tostador con fuente de gas.**

El Cuadro 9, muestra los valores de los coeficientes para el modelo ajustado de Abarca (2017) en el tostador con fuente de gas para cada temperatura evaluada. Se observa que, los coeficientes  $a$  (°C) y  $b$  (°C min<sup>-1</sup>) tuvieron diferencias de  $\pm 4,4$  y  $\pm 1,1$ , respectivamente. El coeficiente  $k$  tuvo un comportamiento muy similar en todas las repeticiones, con diferencias de  $\pm 0,2$  min<sup>-1</sup>. Por su parte, el coeficiente  $c$  presentó la mayor variación entre los valores con diferencias de hasta  $\pm 16,5$  °C.

Para todas las repeticiones los parámetros del modelo fueron determinados con un p-valor menor a 0,0001.

### Cuadro 9

Resumen de los coeficientes del modelo de ajuste de Abarca (2017) para la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas distintas.

		220 °C	225 °C	230 °C	235 °C
<b>Coefficiente de regresión</b>					
a (°C)	R1	189,1	193,6	188,1	188,4
	R2	194,6	190,3	192,5	184,5
	R3	190,3	189,4	188,1	186,9
b (°C min <sup>-1</sup> )	R1	5,7	5,1	6,1	6,0
	R2	4,5	5,7	5,5	6,6
	R3	5,6	5,5	6,0	6,3
c (°C)	R1	88,5	77,8	80,5	84,1
	R2	79,4	79,0	78,1	87,0
	R3	72,0	82,6	77,7	83,7
k (min <sup>-1</sup> )	R1	0,9	1,0	0,9	0,9
	R2	1,0	0,9	1,0	0,8
	R3	0,8	0,9	0,9	0,8
<b>p-valor</b>					
a		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
b		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
c		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
k		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

El modelo de Abarca (2017) se ajustó a los datos obtenidos durante la torrefacción del cacao en el tostador con fuente de gas. En el Cuadro 10, se muestran los parámetros estadísticos obtenidos para las cuatro temperaturas evaluadas.



### Cuadro 10

Parámetros estadísticos del modelo de ajuste de Abarca (2017) para la temperatura interna del tostador con fuente de gas para las tres repeticiones.

		220 °C	225 °C	230 °C	235 °C
<b>Parámetros estadísticos</b>					
<b>R<sup>2</sup></b>	R1	0,9981	0,9939	0,9983	0,9931
	R2	0,9969	0,9967	0,9953	0,9972
	R3	0,9961	0,9974	0,9961	0,9919
<b>SEE</b>	R1	0,7742	1,1245	0,5540	1,1289
	R2	0,9964	0,9976	0,9964	0,9924
	R3	0,7980	0,7165	0,7521	1,1545

SEE: error estándar de los estimados

Se observa que a una temperatura de 220 °C los valores de R<sup>2</sup> fueron mayores a 99,61 %, en el caso de la temperatura a 225 °C se alcanzaron valores de R<sup>2</sup> mayores a 99,39 %, luego para una temperatura de 230 °C se obtuvo que el R<sup>2</sup> fue mayor a 99,53 % y finalmente para 235 °C los valores de R<sup>2</sup> fueron mayores a 99,19 %. Para las tres repeticiones se obtuvo que el SEE fue menor a 1,15 %.

En el Cuadro 11 se muestra los valores de los coeficientes para el modelo ajustado propuesto en el tostador con fuente de gas para las cuatro temperaturas evaluadas. Se observa que, en las tres repeticiones, los coeficientes b (°C min<sup>-1</sup>) y k (min<sup>-1</sup>) presentaron diferencias entre los valores de ± 0,1 y el coeficiente a tuvo diferencias de ± 2,2 °C. En el caso del coeficiente c, este presentó mayor diferencia entre los valores para la primera temperatura evaluada con variaciones de ± 10,8 °C, sin embargo, para las otras tres temperaturas las diferencias fueron de ± 3,8 °C aproximadamente. Para todas las repeticiones los parámetros del modelo fueron determinados con un p-valor menor a 0,0001.

### Cuadro 11

Resumen de los coeficientes del modelo de ajuste de propuesto para la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas distintas.

		220 °C	225 °C	230 °C	235 °C
<b>Coeficiente de regresión</b>					
a (°C)	R1	206,0	208,9	207,3	208,4
	R2	207,8	208,0	209,5	207,1
	R3	206,8	206,9	207,5	208,4
b (°C min <sup>-1</sup> )	R1	0,7	0,6	0,7	0,6
	R2	0,6	0,6	0,6	0,6
	R3	0,7	0,6	0,6	0,6
c (°C)	R1	71,9	63,2	62,1	65,5
	R2	66,6	62,0	62,1	65,6
	R3	55,8	65,8	59,2	63,5
k (min <sup>-1</sup> )	R1	1,0	1,2	1,1	1,2
	R2	1,1	1,1	1,2	1,1
	R3	1,0	1,1	1,1	1,1
<b>p-valor</b>					
a		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
b		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
c		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
k		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

El modelo propuesto se ajustó adecuadamente a los datos obtenidos durante la torrefacción del cacao en el tostador con fuente de gas. En el Cuadro 12, se muestran los parámetros estadísticos obtenidos para cada temperatura evaluada en el tostador con fuente de gas.

## Cuadro 12

Parámetros estadísticos del modelo de ajuste propuesto para la temperatura interna del tostador con fuente de gas para las tres repeticiones.

		220 °C	225 °C	230 °C	235 °C
<b>Parámetros estadísticos</b>					
<b>R<sup>2</sup></b>	R1	0,9982	0,9952	0,9984	0,9955
	R2	0,9975	0,9975	0,9963	0,9983
	R3	0,9967	0,9979	0,9979	0,9932
<b>SEE</b>	R1	0,7510	0,9955	0,5296	0,9051
	R2	0,8092	0,7165	0,8050	0,5644
	R3	0,7716	0,6715	0,5783	1,0954

SEE: error estándar de los estimados

Se observa que a una temperatura de 220 °C los valores de  $R^2$  fueron mayores a 99,67%, en el caso de la temperatura a 225 °C se alcanzaron valores de  $R^2$  mayores a 99,52%, luego para una temperatura de 230 °C se obtuvo que el valor de  $R^2$  fue mayor a 99,63% y finalmente, para 235 °C los valores de  $R^2$  fueron mayores a 99,32%; determinándose que el cambio de temperatura no afecta este parámetro. Para las tres repeticiones se obtuvo que el SEE fue menor a 1,09%.

Al realizar el ajuste general para las cuatro temperaturas con el modelo de Abarca (2017), como se observa en el Cuadro 13, se tuvo un  $R^2$  superior a 97,69% y el menor SEE de 0,95%. Además, se muestra que los coeficientes a y c presentaron la mayor variación con diferencias de  $\pm 5,6$  °C y  $\pm 5,8$  °C, respectivamente. En el caso del coeficiente b, este presentó variaciones menores a  $\pm 1,2$  °C  $\text{min}^{-1}$  y el coeficiente k no presentó variación.

### Cuadro 13

Análisis estadístico general del modelo de Abarca (2017) para la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas distintas.

	220 °C	225 °C	230 °C	235 °C
<b>Coefficiente de regresión</b>				
a (°C)	192,3	186,7	190,3	186,7
b (°C min <sup>-1</sup> )	5,1	6,3	5,8	6,3
c (°C)	79,1	84,9	79,3	84,9
k (min <sup>-1</sup> )	0,9	0,9	0,9	0,9
<b>Parámetros estadísticos</b>				
R <sup>2</sup>	0,9769	0,9933	0,9944	0,9933
SEE	2,2886	1,0591	0,9500	1,0591

Por otra parte, se observa en el Cuadro 14 que, al realizar el ajuste general para las cuatro temperaturas con el modelo propuesto, se tuvo un R<sup>2</sup> mayor a 97,71% y el menor SEE de 0,90%. Además, se muestra que los coeficientes a y c presentaron un comportamiento muy similar con variaciones menores a  $\pm 1$  °C y  $\pm 2,8$  °C, respectivamente. Por su parte, el coeficiente k tuvo una variación mínima de  $\pm 0,1$  min<sup>-1</sup> y el coeficiente b no presentó variación entre los valores obtenidos.

### Cuadro 14

Análisis estadístico general del modelo propuesto para la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas distintas.

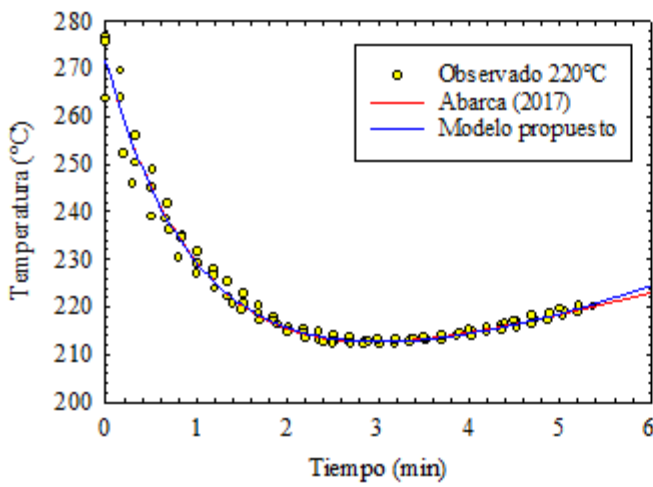
	220 °C	225 °C	230 °C	235 °C
<b>Coefficiente de regresión</b>				
a (°C)	207,2	208,2	208,4	208,0
b (°C min <sup>-1</sup> )	0,6	0,6	0,6	0,6
c (°C)	64,5	63,4	62,1	64,9
k (min <sup>-1</sup> )	1,1	1,1	1,2	1,1
<b>Parámetros estadísticos</b>				
R <sup>2</sup>	0,9771	0,9938	0,9950	0,9948
SEE	2,2756	1,0692	0,8968	0,9365

En la Figura 16 se muestra la tendencia general del perfil de tueste para el cacao a cuatro temperaturas diferentes en el tostador con fuente de gas. Las líneas representan el ajuste general

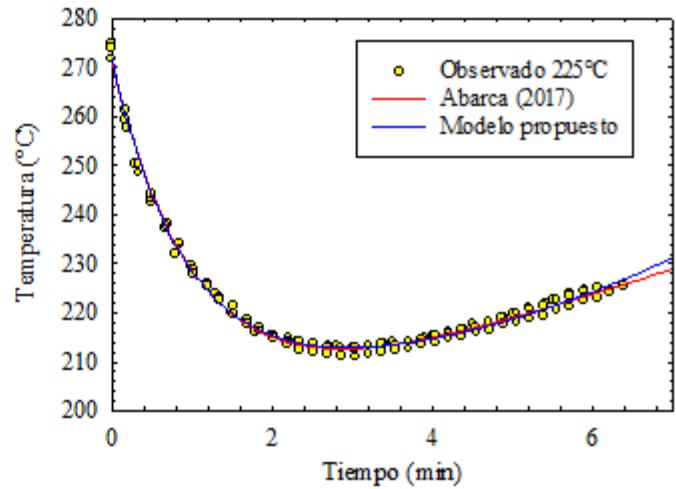
para los dos modelos evaluados tomando en cuenta las tres repeticiones realizadas para cada temperatura. Se observa que ambos pasan por el medio de los datos obtenidos, siendo el modelo propuesto, lo cual coincide con los rendimientos estadísticos descritos anteriormente.

**Figura 16**

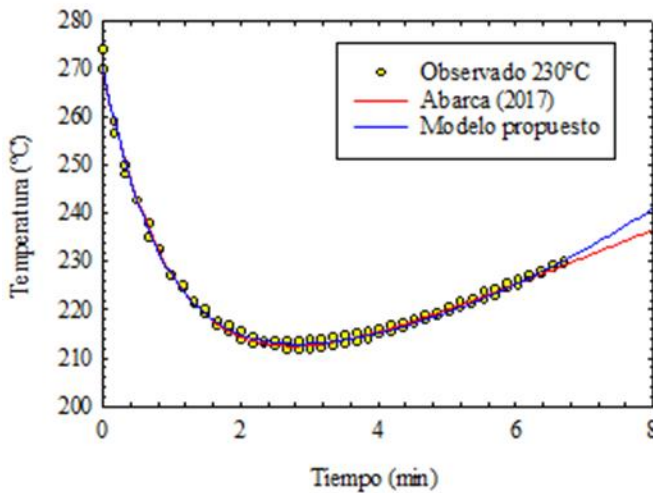
Ajuste de las tres repeticiones para el perfil de tueste de cacao en tostador con fuente de gas a cuatro temperaturas: (A) 220 °C, (B) 225 °C, (C) 230 °C y (D) 235 °C.



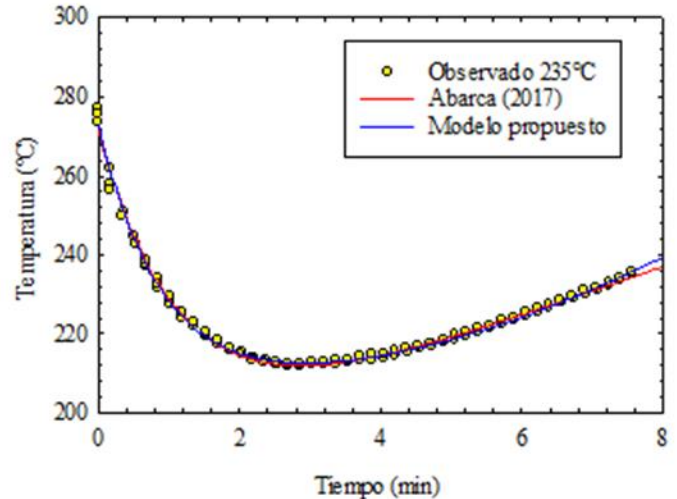
(A)



(B)



(C)



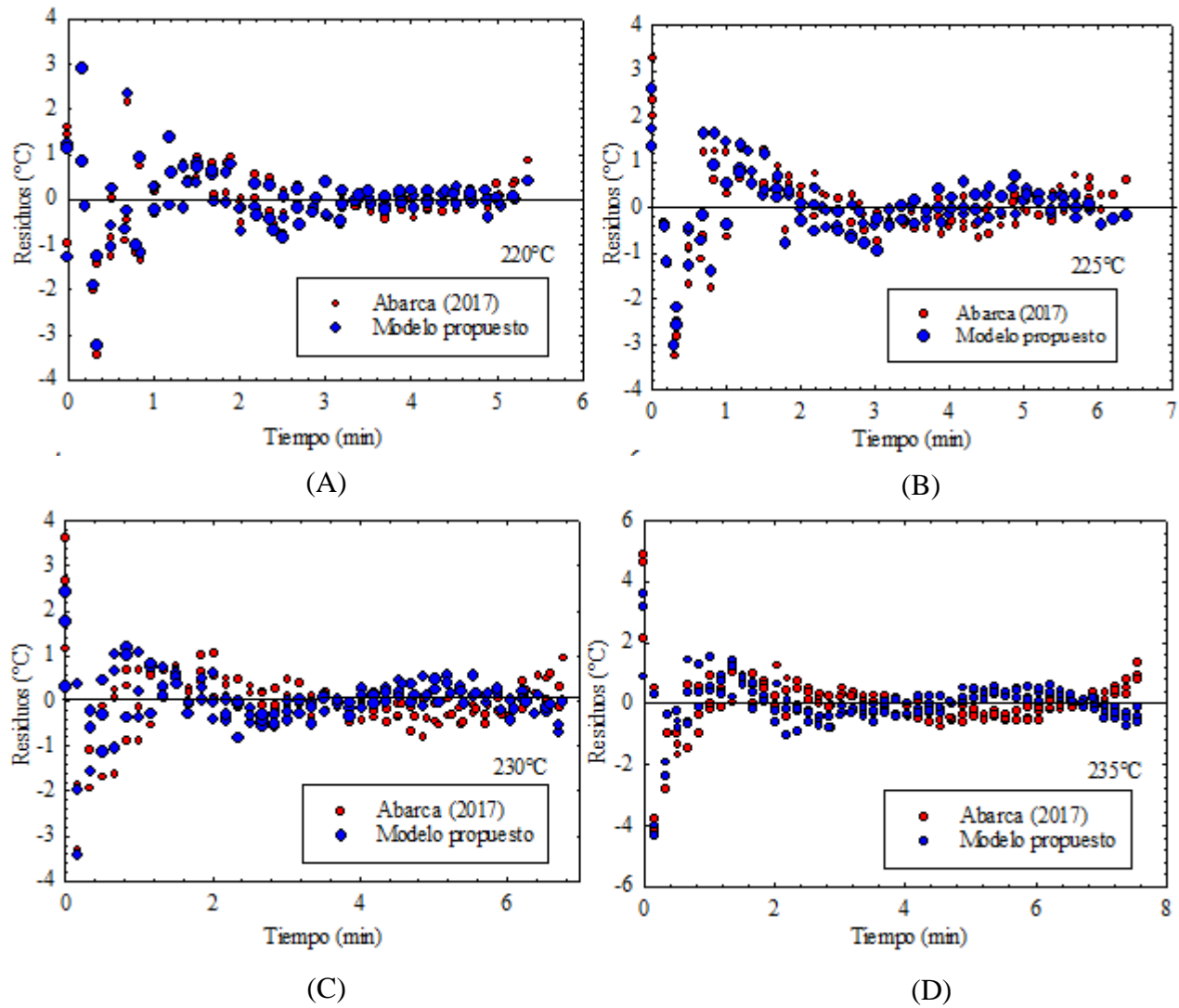
(D)

#### **4.2.3.1. Análisis de residuos de los modelos matemáticos en el tostador con fuente de gas.**

En la Figura 17 se muestra el análisis de los residuos para los modelos estudiados durante la torrefacción de cacao en un tostador con fuente de gas. Se observa que para ambos casos conforme aumenta el tiempo hay residuos positivos y negativos. El comportamiento observado en las cuatro temperaturas es aleatorio, ya que los residuales se encuentran distribuidos alrededor del valor 0, lo cual demuestra que ambos modelos se ajustan bien ya que la magnitud entre los valores observados y el eje 0 se va reduciendo conforme pasa el tiempo.

**Figura 17**

Análisis de los residuos respecto al tiempo para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de cacao en tostador con fuente de gas. (A) 220 °C, (B) 225 °C, (C) 230 °C y (D) 235 °C.



El análisis de los residuos observados en la Figura 17, muestran que en los primeros dos minutos los residuos presentan variaciones de mayor magnitud en ambos modelos, lo cual se puede ocasionar por la diferencia de temperaturas entre el grano y el aire interno del tostador que explica Barrantes (2022).

A partir del análisis de los residuos, se determina que ambos modelos evaluados describen el perfil de tueste de cacao en el tostador con fuente de gas. Sin embargo, al tomar en cuenta el análisis estadístico realizado, el modelo propuesto describe mejor la cinética de torrefacción de los granos de cacao ya que presentó valores de  $R^2$  más altos.

#### **4.2.3.2. Análisis general del modelo de mejor ajuste del perfil de tueste en el tostador con fuente de gas.**

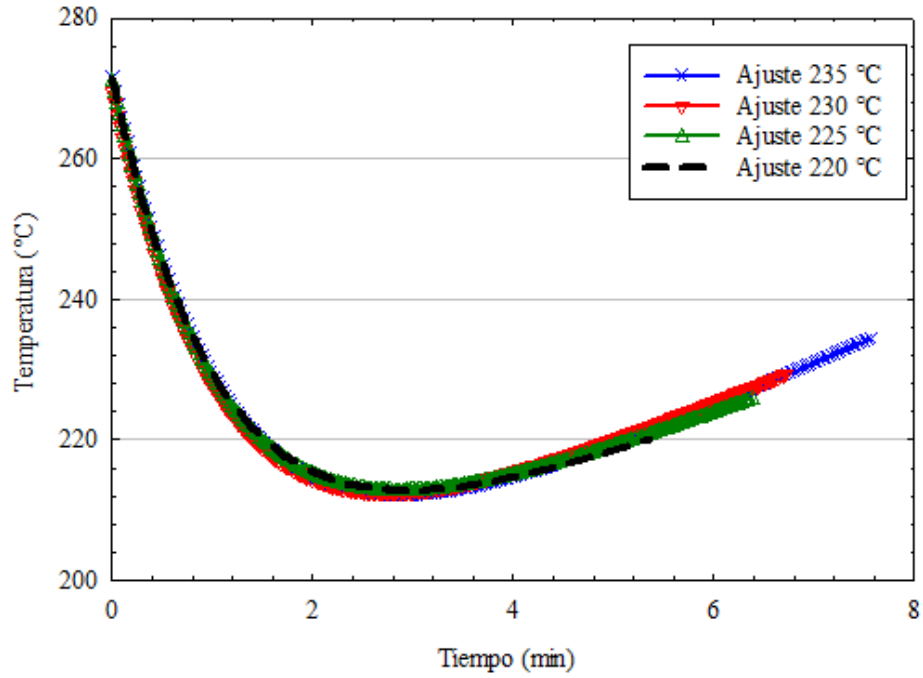
Para el tostador con fuente de gas, el modelo propuesto es el que presentó los mejores resultados de ajuste tomando en cuenta el  $R^2$  el cual fue mayor a 99,32% para las cuatro temperaturas evaluadas. A partir del análisis hecho individualmente para todos los datos observados en las tres repeticiones, evaluando la misma masa y cuatro temperaturas diferentes, se obtuvo un ajuste general con el cual se puede predecir el tiempo promedio de tueste del cacao en el tostador con fuente de gas.

En la Figura 18 se muestra el modelo de Abarca (2017), compuesto por una parte exponencial con otra lineal, el cual presentó un  $R^2$  mayor a 97,69%. Por otra parte, el modelo propuesto, compuesto por una parte exponencial y otra polinomial de segundo grado, presentó un mejor ajuste con un  $R^2$  mayor a 97,71% a nivel general.

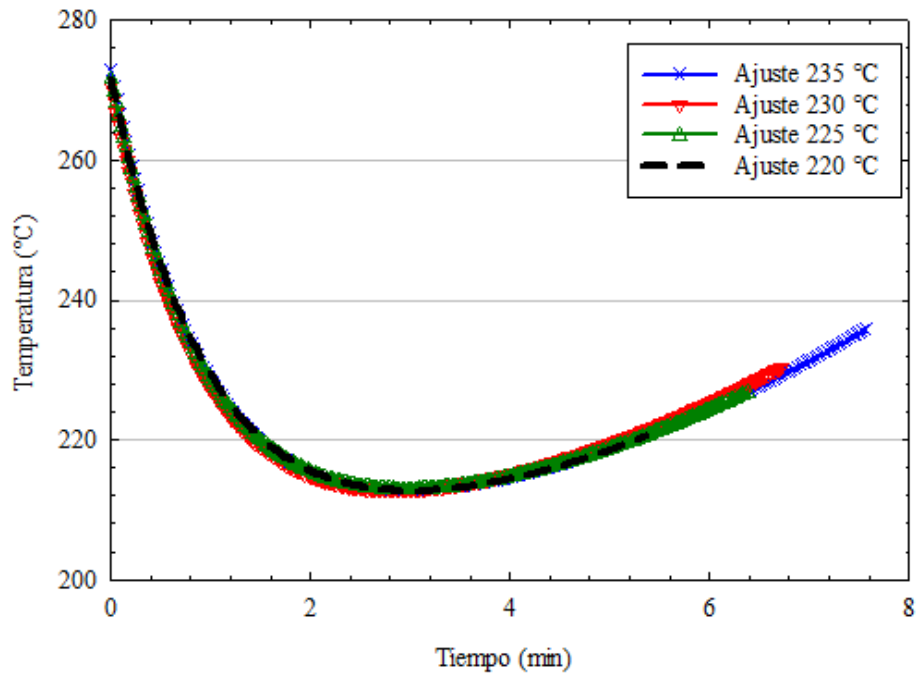


**Figura 18**

Ajuste general de los modelos propuestos para el perfil de tueste del cacao en el tostador con fuente de gas. (A) Modelo de Abarca (2017) y (B) Modelo propuesto.



(A)



(B)

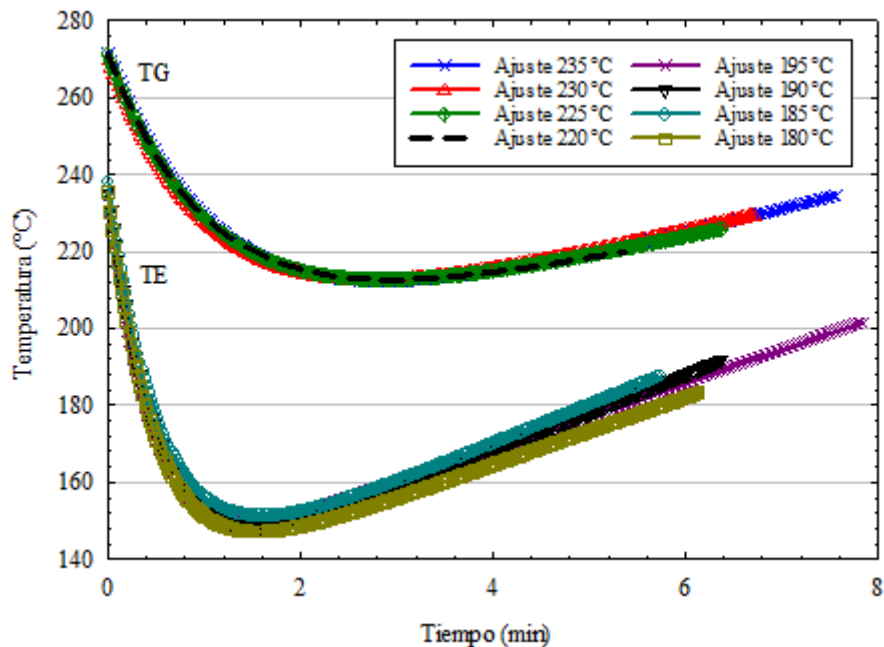
Los resultados estadísticos obtenidos son similares a los presentados en el estudio de Vargas-Fernández (2019), quien obtuvo un  $R^2$  mayor a 99,4% para el ajuste del modelo de Abarca (2017) utilizando la misma masa evaluada y el mismo equipo. A partir de estos resultados se comprueba que, tanto el modelo desarrollado para café por Abarca (2017) como el modelo propuesto, pueden ser aplicados para describir el perfil de tueste de cacao en un tostador cilíndrico convencional con fuente de gas, ya que en magnitud ambos presentan similitud entre los valores que indica el modelo y el valor real.

#### 4.2.4. Comparación del modelo de mejor ajuste de los perfiles de tueste en ambos tostadores.

En la Figura 19 se muestra la comparación de los ajustes del modelo de Abarca (2017) tanto en el tostador eléctrico como en el de fuente de gas, ya que es el modelo de mejor ajuste para el perfil de tueste de los granos de cacao.

**Figura 19**

Comparación del ajuste del modelo de Abarca (2017) para el perfil de tueste del cacao en el tostador eléctrico y el de gas.



Por otra parte, en la Figura 19 se observa que ambos tostadores presentan una caída de temperatura al momento en el que ingresan los granos de cacao al tostador, la cual es de 90 °C para el tostador

eléctrico y de aproximadamente 60 °C para el tostador con fuente de gas. Además, se observa que la concavidad del perfil de tueste en el tostador eléctrico es más pronunciada en comparación a la del tostador con fuente de gas, lo cual se relaciona con el proceso de recuperación de la temperatura del tostador.

### 4.3. Aplicación los modelos predictivos para la obtención de diferentes niveles de tueste en los granos de cacao.

Illy y Viani (2005) explican que el nivel de tueste está relacionado con la pérdida de masa seca o el cambio en la masa total. En el Cuadro 15 se muestra el porcentaje de pérdida de masa respecto a la temperatura a la que se realizó el proceso de torrefacción, así como la cinética de pérdida de masa del cacao.

#### Cuadro 15

Porcentaje de pérdida de masa respecto al tiempo de torrefacción en cada tostador evaluado.

<b>Tostador eléctrico (TE)</b>				
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>180</b>	<b>185</b>	<b>190</b>	<b>195</b>
Pérdida de masa promedio (%)	7,64	8,01	8,68	9,33
Tiempo (min)	5,79	5,46	6,33	7,27
<b>Tostador con fuente de gas (TG)</b>				
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>220</b>	<b>225</b>	<b>230</b>	<b>235</b>
Pérdida de masa promedio (%)	5,34	6,44	7,35	8,01
Tiempo (min)	5,21	6,10	6,79	7,57

En el Cuadro 15 se muestra que, al incrementar el tiempo y temperatura, el porcentaje de pérdida de masa es mayor en ambos tostadores evaluados. Sin embargo, se obtuvo que el porcentaje de pérdida de masa obtenido a 185 °C en el tostador eléctrico fue el mismo que a 235 °C en el tostador con fuente de gas, lo cual se pudo ocasionar dado a las diferencias estructurales de los equipos.

Debido que para el cacao no se han definido una escala de color asociada a distintos grados de tueste, tampoco existe un parámetro que indique el cambio en el tipo de tueste. Vargas-Elías *et al.* (2016) explican que, para el café, una diferencia mayor a 0,8% en la pérdida de masa se relaciona con el cambio en el grado de tueste.

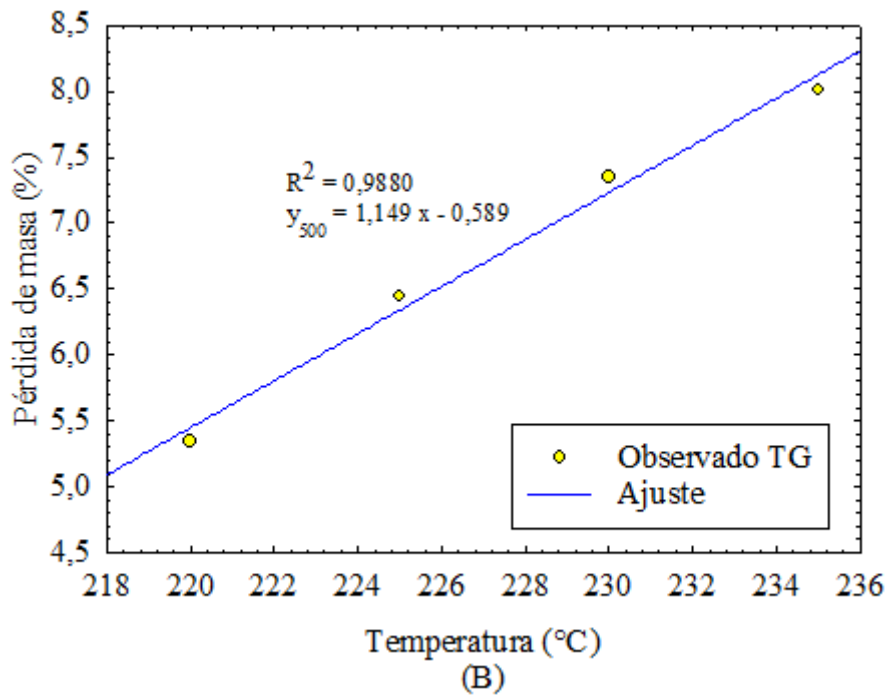
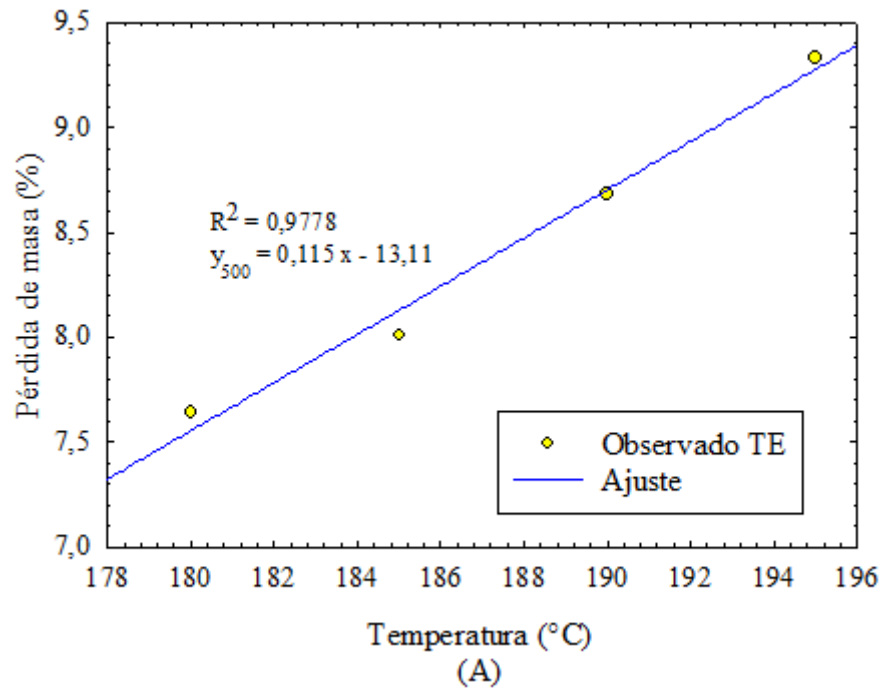
Tomando en cuenta que Vargas-Fernández (2019) demostró que el comportamiento entre los granos de café y el cacao es muy similar durante el proceso de torrefacción en cuanto a pérdida de masa y a la pérdida de materia seca, y al observar los datos obtenidos en el Cuadro 15, se puede determinar que en el tostador eléctrico con una diferencia de 5 °C no presenta un cambio en el nivel de tueste. Esto se debe a que de 180 a 185 °C la pérdida de masa fue de 0,37%, de 185 a 190 °C fue de 0,67% y de 190 a 195 °C la pérdida de masa obtenida fue de 0,65%. Sin embargo, al analizar los cambios cada 10 °C, sí se puede observar un cambio en el nivel del tueste, ya que de 180 a 190 °C se obtuvo una pérdida de masa de 1,04% y de 185 a 195 °C fue de 1,32%. Es por ello que en el tostador eléctrico solo se identifican dos niveles de tueste con diferencias de 10 °C.

Por otra parte, en el tostador con fuente de gas se obtuvo que al aumentar la temperatura cada 5 °C, se obtienen cambios en el nivel de tueste, ya que de 220 a 225 °C hubo una pérdida de masa de 1,1%, de 225 a 230 °C fue de 0,91%. Sin embargo, se observa que de 230 a 235 °C el cambio en la masa fue de 0,66%, lo cual no representa un cambio en el nivel de tueste. Es por ello que en el tostador con fuente de gas solo se identifican dos niveles de tueste con diferencias de 5 °C.

Vargas-Fernández (2019) afirma que la pérdida de masa durante la torrefacción del cacao es lineal, por lo cual se puede predecir el punto de tueste. En la Figura 20, se muestra que la relación del porcentaje de pérdida de masa respecto a la temperatura para ambos tostadores evaluados, los cuales tienen una tendencia lineal ascendente. Se observa que a mayor temperatura de tueste mayor pendiente y, por tanto, la inclinación de la recta es más pronunciada. En el tostador eléctrico se obtuvo un ajuste con un  $R^2$  de 97,78% y en el tostador con fuente de gas el ajuste presentó un  $R^2$  de 98,80%, lo cual indica que se puede predecir el nivel de tueste de los granos en función de la temperatura final de tueste.

### Figura 20

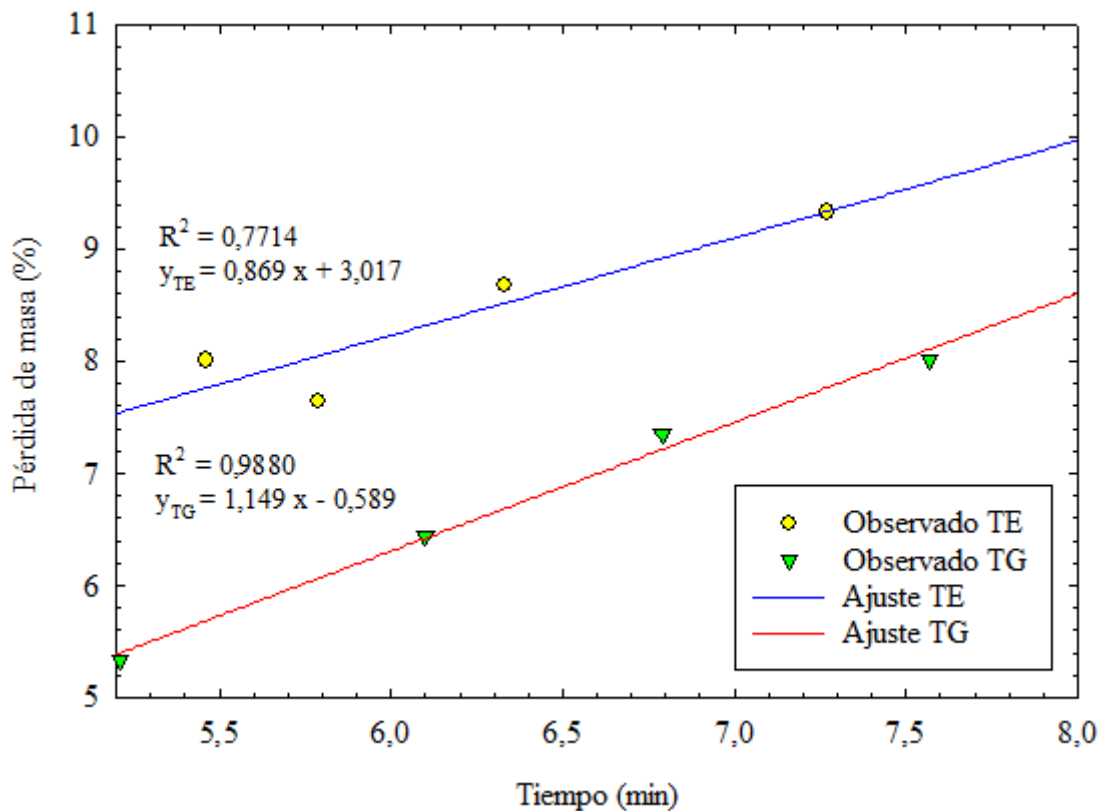
Relación del porcentaje de pérdida de masa respecto a la temperatura durante la torrefacción de cacao en ambos tostadores. (A) Tostador eléctrico y (B) Tostador con fuente de gas.



La Figura 21 muestra la cinética de pérdida de masa en el proceso de torrefacción en ambos tostadores evaluados. Se observa que para el tostador eléctrico el ajuste lineal tuvo un valor de  $R^2$  bajo de 77,14%, a diferencia del tostador con fuente de gas que presentó un  $R^2$  de 98,80%. Los datos obtenidos para el tostador con fuente de gas presentaron un comportamiento similar al obtenido por Vargas-Fernández (2019), quien obtuvo valores de  $R^2$  mayores a 94,13% al utilizar una masa de 500 g.

**Figura 21**

Relación del porcentaje de pérdida de masa respecto al tiempo de torrefacción de cacao en ambos tostadores.



Se comprueba que, para predecir el nivel de tueste de los granos de cacao en el tostador eléctrico, hay un mejor ajuste al comparar la pérdida de masa con respecto a la temperatura. Y, para el tostador con fuente de gas, la predicción del nivel de tueste se puede obtener al relacionar la pérdida de masa respecto al tiempo o la temperatura ya que en ambos casos se tuvo el mismo ajuste.

## **5. Conclusiones**

### **Funcionamiento de los tostadores**

Los manuales de operación de los tostadores fueron elaborados para la operación durante la torrefacción en cada uno de los tostadores.

El calentamiento interno de los tostadores fue creciente, en el tostador eléctrico fue descrito por una tendencia polinomial mientras que el de gas fue exponencial.

Las condiciones de operación durante la torrefacción fueron diferentes en cada tostador, el tostador eléctrico presentó una caída de temperatura de 90 °C, mientras que el de gas tiene una caída mayor de 100 °C después de la descarga del grano en su interior, el resto fue igual.

El enfriamiento en ambos tostadores tuvo una tendencia exponencialmente decreciente, el eléctrico demoró media hora más en alcanzar la temperatura ambiente en comparación al tostador con fuente de gas.

### **Modelación del perfil de tueste**

Bajo las condiciones en las que se realizó este estudio, se comprobó que, para ambos tostadores el modelo que mejor representa el perfil de tueste de cacao es el que combina una parte exponencial decreciente con una parte lineal.

Se demostró que a partir de los modelos evaluados se puede predecir la temperatura de tueste de los granos de cacao.

### **Predicción de los niveles de tueste con los modelos**

Se comprobó que el nivel de tueste de cacao en ambos equipos se puede predecir en función de la temperatura del perfil de tueste. En el caso del tostador con fuente de gas, la predicción también se puede realizar en función del tiempo.

Bajo las condiciones de este proyecto, se identificaron dos niveles de tueste las cuales en el tostador eléctrico presentaron diferencias de 10 °C y en el tostador con fuente de gas la diferencia fue de 5 °C.

## **6. Recomendaciones**

Para una medición más certera de la temperatura interna del tostador eléctrico, se recomienda cambiar la ubicación del termopar, o cambiar el termopar por uno de mayor longitud, que pueda medir la temperatura interna del cilindro y no solo la del borde.

Tomando en cuenta los diseños evaluados, se recomienda el diseño de un tostador para el uso específico de cacao considerando el tamaño del grano como la principal condición de diseño, seguido de cualidades como la capacidad, producción de residuos, fuente de energía, entre otros.

Realizar las mismas mediciones para cada variedad de cacao por aparte, para obtener los perfiles de tueste por variedad. Al mismo tiempo poder identificar la relación entre las propiedades físicas del grano y su respectivo coeficiente en el modelo matemático.

Se recomienda realizar un análisis sensorial de los granos de cacao tostados a las temperaturas utilizadas para identificar los cambios organolépticos en los tipos de tueste, así como realizar una evaluación de la coloración para verificar si el cambio en el nivel de tueste se relaciona con el cambio en el color del grano.

La potencia térmica de los equipos debe ser considerada en los próximos trabajos con el fin de comparar el consumo energético durante el proceso de torrefacción.



## 7. Referencias

- Abarca, R. (2017). *Estudio del proceso de torrefacción del café (Coffea arabica) en tostador convencional*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Escuela de Ingeniería de Biosistemas.
- Aldave-Palacios, G. J. (2016). *Efecto de la temperatura y tiempo de tostado en los caracteres sensoriales y en las propiedades químicas de granos de cacao (Theobroma cacao L.) procedente de Uchiza, San Martín – Perú para la obtención de NIBS* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. [http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/5009/Aldave\\_pj.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/5009/Aldave_pj.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Aprotosoiaie, A. C, Luca, S. V. y Miron, A. (2015). Flavor Chemistry of Cocoa and Cocoa Products—An Overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 73 – 91. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12180>
- Arreaga Aguirre, J. C. (2021). *Diseño de un molino Industrial para la molienda y descascarado del cacao* [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Barrantes, S. (2022). *Efecto del tipo de beneficiado en la torrefacción de los granos de café (coffea arabica)* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Escuela de Ingeniería de Biosistemas.
- Bocco, M. (2010). *Funciones elementales para construir modelos matemáticos* (1ra ed). Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Carmioli González, G. (2017). *Análisis de la actividad cacaotera costarricense y perspectivas de su reactivación* (No. E16/10869). Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, San José (Costa Rica).
- Cole-Parmer. (09 de febrero de 2023). Digi-Sense 12 Channel Scanning Benchtop Thermometer, 230 V. Cole-Parmer. Recuperado el 09 febrero 2023 de

<https://www.coleparmer.com/i/digi-sense-12-channel-scanning-benchtop-thermometer-230-v/9200005>

Comisión Interinstitucional de Cacao. (2018). *Plan Nacional de Cacao 2018-2028: Hacia la consolidación de una agrocadena competitiva y sostenible* [Ebook]. Obtenido el 14 mayo 2021, de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E14-11072.pdf>.

Dectronic. (s.f.). Controlador de temperatura PID con display LCD - Serie TX. <http://www.dectronic.net/en/controller-of-temperature/75-tx.html>

Dubón, A. (2016). *Protocolo para el Beneficiado y Calidad del Cacao* [Ebook]. Centro de Comunicación Agrícola. Obtenido el 18 Julio 2021, de [http://www.fhia.org.hn/downloads/cacao\\_pdfs/Protocolo\\_para\\_el\\_Beneficiado\\_y\\_Calidad\\_del\\_Cacao\\_2016.pdf](http://www.fhia.org.hn/downloads/cacao_pdfs/Protocolo_para_el_Beneficiado_y_Calidad_del_Cacao_2016.pdf).

Garay Vega, R. R. (2019). “*Influencia de la temperatura de tostado en la capacidad antioxidante de la cascarilla de cacao (Theobroma cacao L.) Clon ccn-51 aprovechado para elaborar filtrante*” [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Ucayali]. [http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4051/000003680T\\_AGROINDUSTRIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4051/000003680T_AGROINDUSTRIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Gutiérrez, M. (13 de Setiembre de 2021). Tecnología de tostado del grano de cacao. Cámara Café y Cacao. <https://camcafeperu.com.pe/ES/articulo.php?id=122>

Illy, A., y Viani, R. (2005). Espresso Coffee: The Science of Quality. In A. Illy & R. Viani (Eds.), *Espresso Coffee* (Second edi). Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-012370371-2/50004->

Krysiak, W., Adamski, R., y Żyżelewicz, D. (2013). *Factors Affecting the Color of Roasted Cocoa Bean. Journal of Food Quality, 36(1), 21–31.* doi:10.1111/jfq.12009

Lik Hii, C., y Meira Borém, F. (2020). *Drying and Roasting of Cocoa and Coffee* (C. Lik Hii & F. Meira Borém (eds.); 1ra ed.). CRC Press. <https://www.routledge.com/Drying-and-Roasting-of-Cocoa-and-Coffee/Hii-Borem/p/book/9781138080973>

- López Monzón, R. (2016). *Desarrollo de un Modelo Matemático para la Fermentación del Cacao Criollo Blanco* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Piura]. [http://190.12.69.62/bitstream/20.500.12390/148/3/2016\\_Lopez\\_Desarrollo-modelo-matematico.pdf](http://190.12.69.62/bitstream/20.500.12390/148/3/2016_Lopez_Desarrollo-modelo-matematico.pdf)
- Motamayor JC., Lachenaud P, da Silva e Mota JW, Loor R, Kuhn DN, *et al.* (2008) Geographic and Genetic Population Differentiation of the Amazonian Chocolate Tree (*Theobroma cacao* L). PLoS ONE 3(10): e3311. doi:10.1371/journal.pone.0003311
- Phillips-mora, W., Arciniegas-leal, A., Mata-Quirós, A., y Motamayor-Arias, J. C. (2012). Catálogos seleccionados por el CATIE para siembras comerciales. In S. Orozco Estrada y M. Villalobos (Eds.), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) Programa de Mejoramiento Genético de Cacao. Turrialba (1ra ed.). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., y Linares, P. (2010). Modelos matemáticos de optimización. *Publicación Técnica, 1*.
- Ross, S. (2015). Introducción a la Estadística. Reverté (Ed.), *British Journal of Cancer* (2da ed., Vol. 25). Elsevier Inc.
- Sabadías, A. V. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial* (Vol. 8). Universidad de Castilla La Mancha.
- Saza Coaji, J. N., y Jiménez Forero, J. A. (2020). Determinación de condiciones ambientales para la conservación de granos de cacao (*Theobroma cacao* L) deshidratado durante el almacenamiento. *Revista Sistemas De Producción Agroecológicos, 11*(1), 2-32. <https://doi.org/10.22579/22484817.461>
- Umaña Calderón, M. E. (2013). *Anteproyecto de una planta de procesamiento para la elaboración de un producto tradicional y un producto funcional obtenido a partir del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) fermentado y no fermentado* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Escuela de Ingeniería de Biosistemas.

- Vargas-Fernández, R. (2019). *Análisis del secado, el equilibrio higroscópico y la torrefacción de los granos de cacao (Theobroma cacao)* [ Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Escuela de Ingeniería de Biosistemas.
- Vargas-Elías, G. A., Corrêa, P. C., Souza, N. R. De Baptestini, F. M., y 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>
- Smith, W y Hashemi, J. (2004). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. The McGraw-Hill.
- Zapata Bustamante, S., Tamayo Tenorio, A., y Alberto Rojano, B. (2015). Efecto del Tostado Sobre los Metabolitos Secundarios y la Actividad Antioxidante de Clones de Cacao Colombiano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7497-7507. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47836>

## 8. Apéndice

Apéndice 1. Manual de uso del tostador eléctrico TAMECO.

### MANUAL DE USO DEL TOSTADOR ELÉCTICO TAMECO

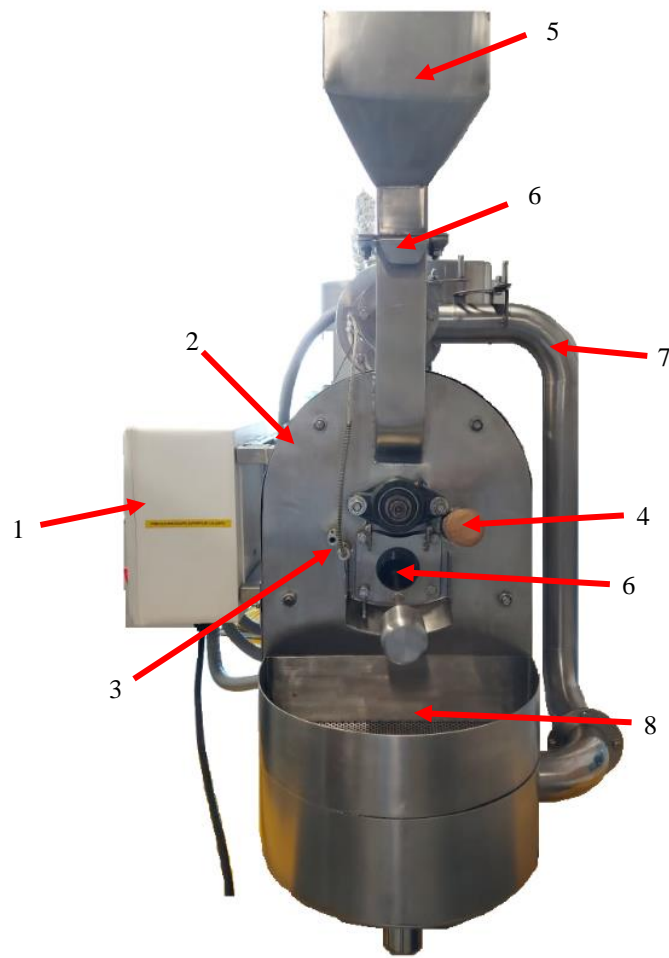
Equipo Tostador de café	Capacidad 1000 g	Fabricado en Turrialba, Costa Rica
N° 20-104	Fecha elaboración del equipo Dic-2020	Manual elaborado por Ana María Sandí Guzmán
Fabricado por TAMECO	www.tameco.com	Tel. (+506) 2556 7979



El tostador eléctrico marca TAMECO está diseñado específicamente para café. El equipo está fabricado de acero inoxidable, se compone por un cilindro rotativo que tiene una velocidad constante de 34 revoluciones por minuto y una capacidad máxima del cilindro de 1,0 kg de café crudo. El cilindro rotador tiene 25 cm de diámetro y 31 cm de largo.

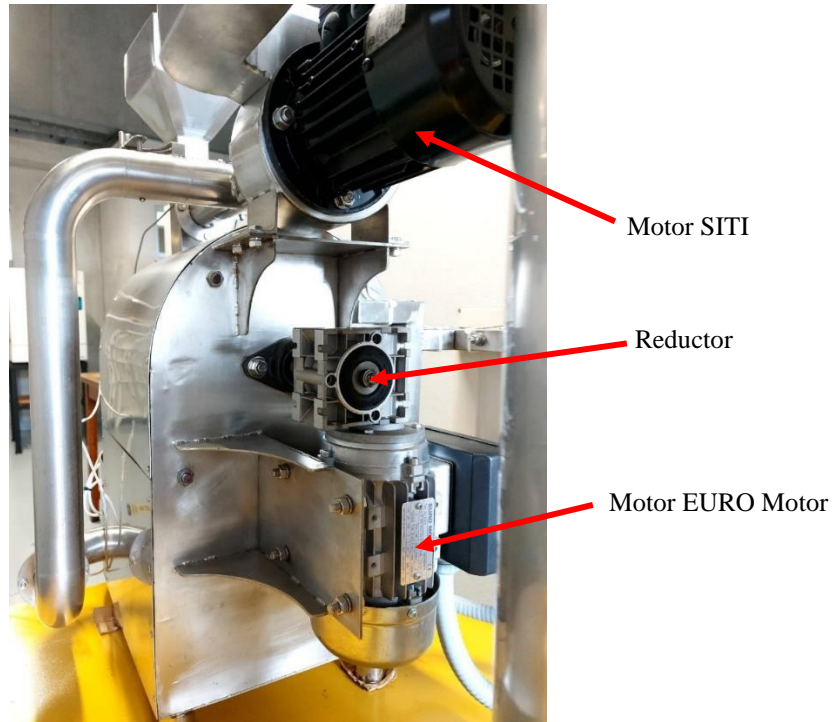
El equipo cuenta con un (1) tablero de control, ubicado al costado izquierdo, por medio del cual se activan las distintas funciones, tales como: el calentamiento, rotación del cilindro, ajuste de temperatura interna, control del tiempo y la activación del sistema de extracción de humo y cascarilla.

En este equipo se llevan a cabo dos procesos: el calentamiento y el enfriamiento de los granos. Estos procesos son secuenciales y se desarrollan en secciones distintas del equipo. La sección en donde se realiza el calentamiento del tostador se compone por: (2) el cilindro rotativo, (3) dos termopares tipo K, (4) un extractor de muestras, (5) ducto de descarga de los granos secos, (6) compuerta de descarga, dos resistencias en espiral, (7) extractor de humo y un cilindro para la captura de residuos. Por su parte, la sección de enfriamiento se compone por: (7) un ducto extractor de aire y (8) una bandeja para la descarga de los granos posterior al tueste.



Este tostador cuenta con dos motores eléctricos. El primer motor, modelo ML 632-4 marca EURO Motor, está conectado a un reductor, modelo MI 30 I:50 56B14 marca SITI, el cual se encarga de adaptar la velocidad y potencia del motor al cilindro interno. El motor ML 632-4 tiene una potencia mecánica de 18 kW, tensión de 120/140 V e intensidad de 2,54/1,27 A.

El segundo motor, modelo MH63C4 marca COEL, se encarga de activar el sistema de extracción de cascarilla y humo del interior del cilindro. Este motor se caracteriza por tener una potencia mecánica de 12 kW, tensión de 115 V e intensidad de 2,8 A. El flujo de aire del extractor es de 286 CFM aproximadamente.



Para calcular la potencia eléctrica de los motores se utilizó la ecuación 1, la cual se calcula a partir de la Tensión (V) y la Intensidad (A) del motor. El motor modelo ML 632-4, tiene una potencia eléctrica de 177,8 W. Por su parte, la potencia eléctrica del motor modelo MH63C4 es de 322 W.

$$Potencia\ eléctrica\ (P) = Tensión\ (V) \cdot Intensidad\ (A) \quad (1)$$

## Instrucciones de Seguridad

- LEA LAS INSTRUCCIONES DE USO ANTES DE UTILIZAR EL EQUIPO.
- No toque las superficies calientes. Use guantes térmicos.
- Para protegerse contra un choque eléctrico y lesiones a personas, no sumerja el cable ni enchufes en agua ni en ningún otro líquido.
- Desconecte el equipo de la toma de corriente cuando no esté en uso.
- Espere que el equipo se enfríe para limpiarlo.
- Tenga mucho cuidado al limpiar la zona donde se ubican las resistencias.
- Coloque el equipo en una superficie estable. Verifique que el equipo está nivelado.
- Antes de proceder con la limpieza del equipo, asegúrese que todo está apagado.

## Instrucciones de uso

1. Antes de activar el equipo, verificar que esté limpio, vacío y ubicado en un área cercana a un toma corriente de 220 V.
2. Conectar el enchufe monofásico del tostador eléctrico a un toma corriente para activar el funcionamiento del equipo.
3. Para activar la rotación del cilindro, girar hacia la derecha la perilla roja denominada “TOSTADOR”, la cual se ubica en la esquina inferior derecha del tablero de activación. Es recomendable activar primero la rotación del cilindro, previo a la activación de la resistencia, para evitar el calentamiento en un solo costado del cilindro lo cual puede causar la deformación de la recámara.





4. El controlador de temperatura modelo TX4S, denominado “Control de Temperatura” en el panel de control, sirve para establecer la temperatura en grados Celsius (°C) a la cual se desea realizar el tueste por medio de los botones ubicados en la parte inferior.

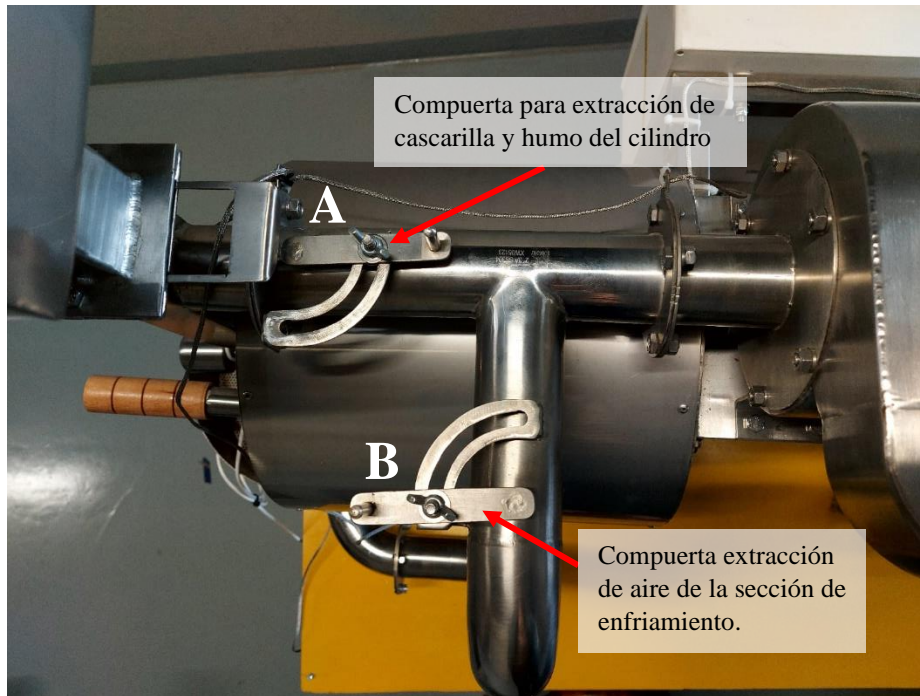
El número verde, ubicado en la parte inferior del panel, es el indicador del valor de ajuste (SV por sus siglas en inglés) en el cual se establece la temperatura que se desea alcanzar en el interior del cilindro. Por otra parte, el número blanco, ubicado en la parte superior del panel, es el indicador de valor de procesamiento (PV por sus siglas en inglés) el cual muestra la temperatura interna del cilindro que está registrando el termopar.



Para modificar los parámetros del controlador de temperatura se utiliza el botón “MODE”. Luego, las flechas blancas que van hacia arriba o abajo son para modificar el valor de SV, y la flecha que señala hacia la izquierda funciona para moverse entre los dígitos de la pantalla.

5. Para activar el extractor de aire, girar la perilla verde con el nombre “ABANICO”. Este sistema evita acumulaciones de gases o cascarilla de los granos dentro del cilindro una vez que se alcanza la temperatura de tueste en su interior.

6. La activación de las resistencias se realiza al girar hacia la derecha la perilla negra con flecha roja nombrada “CALENTAMIENTO”. La temperatura de calentamiento es la establecida al inicio del proceso.
7. El cilindro rotativo comienza a calentarse por efecto de la activación de las resistencias, y el movimiento rotacional promueve el calentamiento uniforme tanto del cilindro como de los granos que se descarguen en su interior.
8. El tostador no cuenta con un sistema de aislamiento térmico, por lo que toda la superficie se calienta. Es necesario utilizar guantes térmicos para abrir o cerrar las compuertas, así como para tener algún tipo de contacto con el equipo.
9. Verificar que la compuerta del costado derecho que corresponde al tubo extractor de aire de la sección de enfriamiento esté cerrada.



*Nota.* La compuerta A se encuentra completamente abierta, y la compuerta B se encuentra completamente cerrada.

10. El control de la temperatura dentro del cilindro se registra por medio de dos termopares tipo K ubicados al frente del equipo, al costado izquierdo de la puerta de descarga. Un termopar está conectado al panel de control de la temperatura y, el otro termopar, se conecta por medio de un cable USB a una computadora.

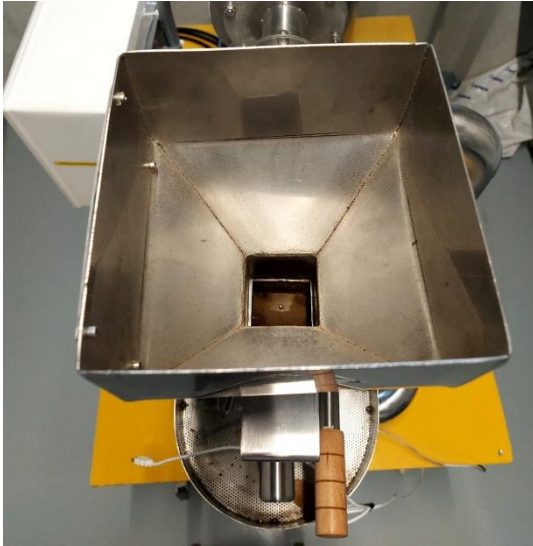


*Nota.* El termopar A es el de registro, el cual se conecta a la computadora. El termopar B es el de control y va conectado al panel de control ubicado al costado izquierdo del tostador.

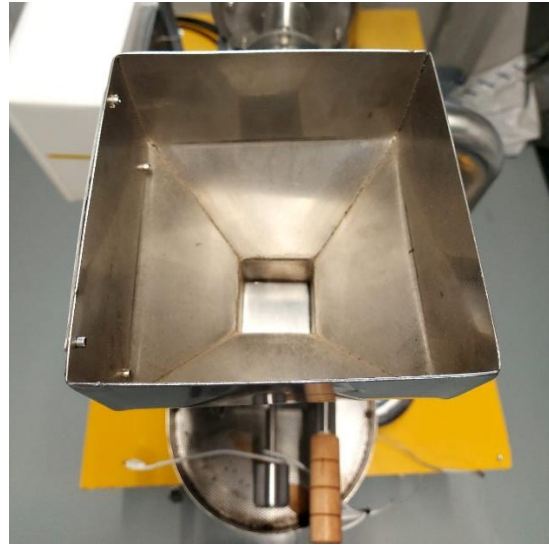
11. La computadora que se utiliza para el monitoreo de la temperatura interna del tostador, debe tener instalado el software Artisan 2.4.6.
12. Una vez que el interior del cilindro alcanza la temperatura deseada, se activa una alarma de aviso. Esta alarma se desactiva al reducir la temperatura dentro del cilindro o al aumentar la cifra en el panel de control de temperatura.
13. Una vez que se alcanza la temperatura de precalentamiento en el interior del cilindro, se procede a descargar los granos secos por medio del ducto de descarga.
14. El ducto de descarga tiene una compuerta la cual debe abrirse para que los granos ingresen al interior del tostador una vez que se alcanza la temperatura de calentamiento en el interior

del cilindro. Asegurarse que los granos se descargaron por completo, ya que pueden ocurrir obstrucciones durante la descarga.

15. Después de descargar los granos en el interior del cilindro, cerrar la compuerta del ducto de descarga para evitar cambios de temperatura dentro del tostador. El ducto por el que se descargan los granos es un cuadrado de 4,5 cm de lado.



(A)



(B)

*Nota.* (A) Compuerta abierta y (B) Compuerta cerrada.

16. Para llevar el control del tiempo de tueste, el equipo cuenta con un cronómetro marca CHiNT, modelo NJ52, ubicado a la par del panel de control de temperatura. Para ajustar el tiempo de tueste, presionar el botón “MD” y, por medio de las flechas hacia arriba y abajo, ajusta el tiempo deseado. Una vez que pasa el tiempo establecido se emite una alarma de aviso, sin embargo, es importante tener presente que el cronómetro no detiene el calentamiento de las resistencias por lo cual el tostador continúa calentando.



17. El monitoreo del tueste se realiza a partir del cambio del color de los granos por medio de un extractor de muestras ubicado al frente del tostador, así como por medio del control del tiempo y la temperatura registrados en la computadora y en el panel de control.



18. Cuando se alcanza el nivel de tueste deseado, se abre la compuerta de descarga de los granos tostados que se ubica al frente del tostador.
19. Inmediatamente después de la descarga, abrir la compuerta del tubo extractor de aire que corresponde a la sección de enfriamiento, y cerrar la compuerta que extrae aire del interior del cilindro.
20. Verificar que el cilindro queda completamente vacío para evitar que en su interior queden residuos de granos que puedan afectar futuras muestras, para ello se debe mantener la

compuerta de descarga frontal para que el cilindro logre expulsar los granos remanentes en su interior.

21. Para desactivar las resistencias, girar hacia la izquierda las perillas de: “CALENTAMIENTO”.

22. Dejar enfriar el equipo con el cilindro en rotación y el abanico encendido durante dos horas aproximadamente, para favorecer el enfriamiento del equipo.

**PRECAUCIÓN:** Evitar el contacto directo ya que las superficies permanecen calientes después de su uso y pueden provocar quemaduras en la piel.

23. Una vez que el tostador está a temperatura ambiente, girar hacia la izquierda las perillas de: “TOSTADOR” y “ABANICO” para desactivar la rotación del cilindro y el extractor, respectivamente.

24. Desconectar el enchufe del tostador.

25. En la parte trasera del tostador se ubica el ciclón de residuos, el cual debe limpiarse cada cierto tiempo para evitar que se sature. Este tiene una altura de 58, 5 cm y un diámetro de 30 cm.



**Apéndice 2.** Manual de uso del tostador con fuente de gas.

## **MANUAL DE USO DEL TOSTADOR ECO-2000**

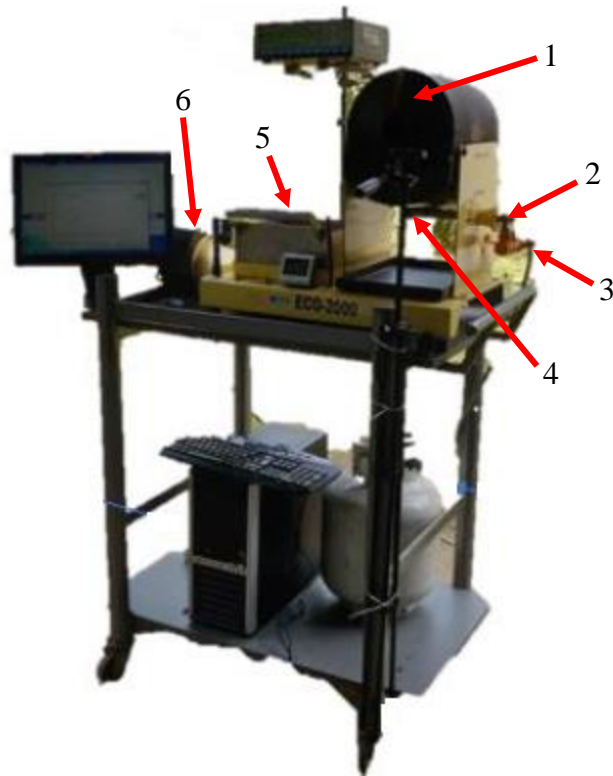
Equipo Tostador de café	Capacidad 2000 g	Manual elaborado por Ana María Sandí Guzmán
Marca BENDIG	Modelo ECO-2000	



El tostador convencional modelo ECO-2000, diseñado específicamente para café, es un equipo utilizado para el tueste de granos secos que utiliza gas como fuente de energía para calentar el cilindro rotativo. Este se compone por un cilindro rotativo que tiene una velocidad constante de 60 revoluciones por minuto, utiliza gas propano para su calentamiento y la capacidad máxima del tostador es de 2,0 kg de café crudo. El cilindro rotador tiene 22 cm de diámetro y 31 cm de largo.

En él se llevan a cabo dos procesos secuenciales: calentamiento y enfriamiento, los cuales se desarrollan en secciones distintas del equipo. La sección en donde se realiza el calentamiento del tostador se compone por: (1) el cilindro rotativo, (2) una válvula de paso de gas, (3) una llave de paso, (4) el quemador de gas y un interruptor eléctrico de encendido y apagado de la rotación del cilindro. Por su parte, la sección de enfriamiento se compone por: (5) un extractor eléctrico de aire, un interruptor de encendido y apagado del extractor, y (6) una bandeja para la descarga de los granos posterior al tueste.





## Instrucciones de Seguridad

- LEA LAS INSTRUCCIONES DE USO ANTES DE UTILIZAR EL EQUIPO.
- No toque las superficies calientes. Use guantes térmicos.
- Para protegerse contra un choque eléctrico y lesiones a personas, no sumerja el cable ni enchufes en agua ni en ningún otro líquido.
- Asegúrese que el tanque de gas esté en buen estado y no tenga fugas.
- Espere que el equipo se enfríe para limpiarlo.
- Coloque el equipo en una superficie estable. Verifique que el equipo está nivelado.
- Antes de proceder con la limpieza del equipo, asegúrese que todo está apagado.

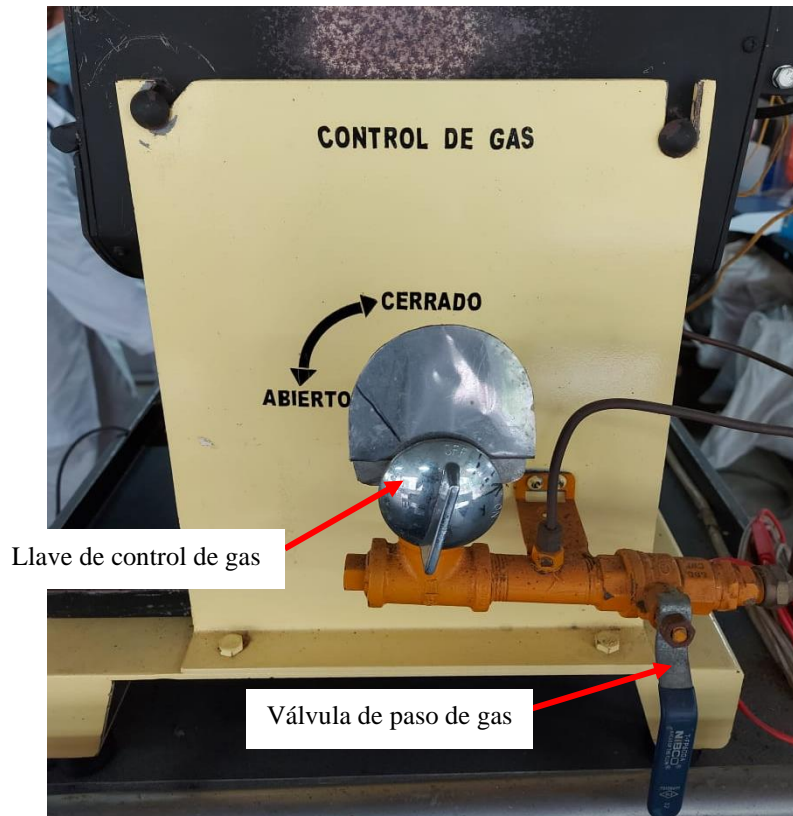
## Instrucciones de uso

1. Antes de utilizar el equipo, verificar que esté limpio, vacío y ubicado en un área donde la llama del quemador se mantenga estable.

2. El tostador tiene una válvula de paso para gas que permite conectar el equipo a un tanque de gas externo, que generalmente es de propano. Esta válvula asegura un flujo estable a lo largo del calentamiento del tostador.
3. La conexión del tanque al tostador se realiza por medio de un regulador de gas con rosca y una manguera conectada a la válvula de paso.
4. Al abrir la válvula de paso y el tanque, el gas viaja por medio de la manguera hasta el quemador ubicado debajo del tostador, el cual tiene pequeños agujeros por donde sale el gas.



5. Para la ignición del quemador, se requiere de un encendedor o fósforo para activar la chispa. Este proceso debe realizarse simultáneamente con la apertura de la llave de paso del gas para evitar accidentes y/o explosiones.
6. La llave de paso de gas tiene tres niveles: bajo, medio y alto. A medida que aumenta el tamaño de la llama en el quemador, aumenta la velocidad de calentamiento del cilindro rotativo.

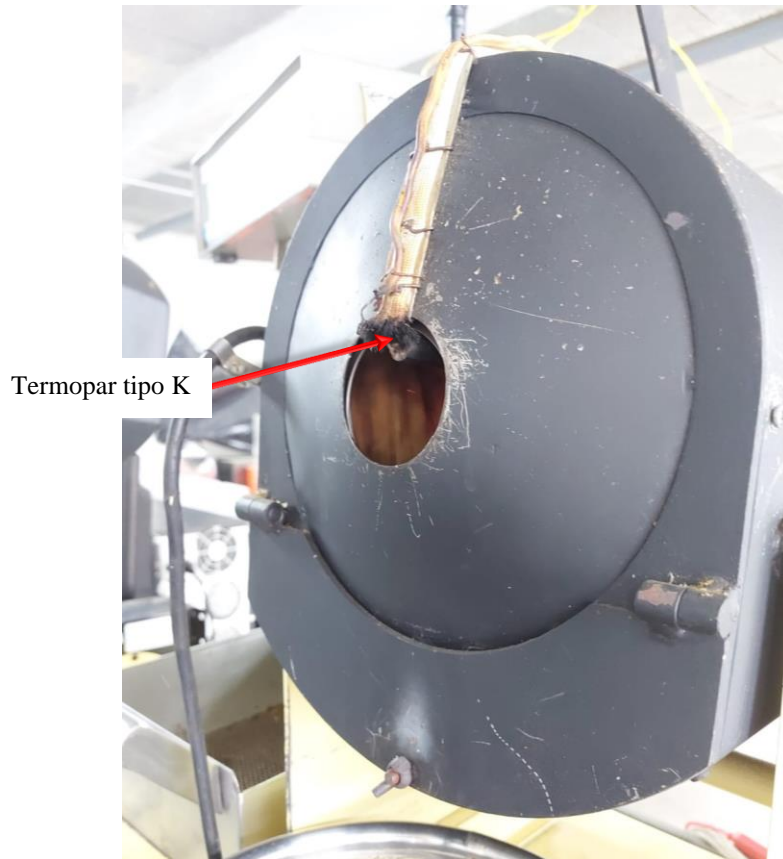


7. Inmediatamente después de la ignición, se activa el interruptor eléctrico para la rotación del cilindro ubicado en la zona frontal del equipo denominado “CILINDRO”.



8. El cilindro rotativo comienza a calentarse por efecto de la combustión del gas, y el movimiento rotacional promueve el calentamiento uniforme.

9. El control de la temperatura interna del tostador y el tiempo se realiza por medio de un termopar tipo K ubicado en la entrada del cilindro. El termopar está conectado por medio de un escáner de temperatura marca Cole-Parmer Instrument Company modelo 92000-00 Benchtop 115 V. El registro de los datos se realiza cada 10 segundos.



10. Los datos son registrados por medio de un escáner de temperatura marca Cole-Parmer Instrument Company, modelo 92000-00 Benchtop 115 V y enviados a una computadora a partir de un cable con conexión al puerto serial, la cual que debe contar con un sistema operativo Windows XP, procesador Intel y el software ScanLink versión 2.0.



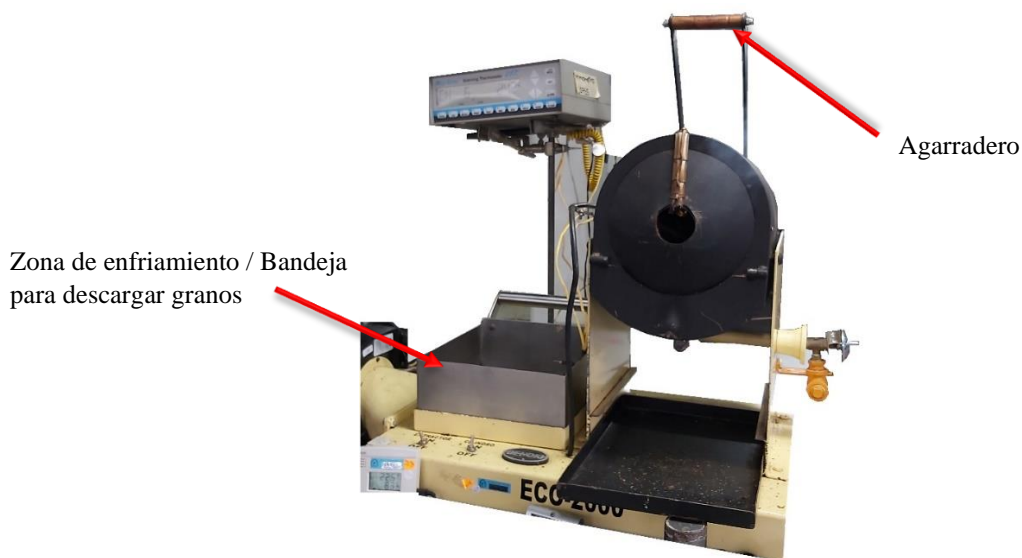
11. Para iniciar el proceso de tueste, primero debe calentar el cilindro rotativo a una temperatura de al menos 280 °C, para que, al momento de descargar los granos secos en el interior del cilindro, la caída de temperatura no sea menor a 140 °C.
12. Una vez que el tostador alcanza la temperatura de precalentamiento establecida, se procede a la descarga de los granos secos por medio del agujero frontal del equipo con la ayuda de un embudo especial.



13. El monitoreo del tueste se realiza a partir del cambio de color de los granos de forma visual, con la ayuda de un extractor de muestras, además del control del tiempo y la temperatura registrados en una computadora por medio de los termopares.



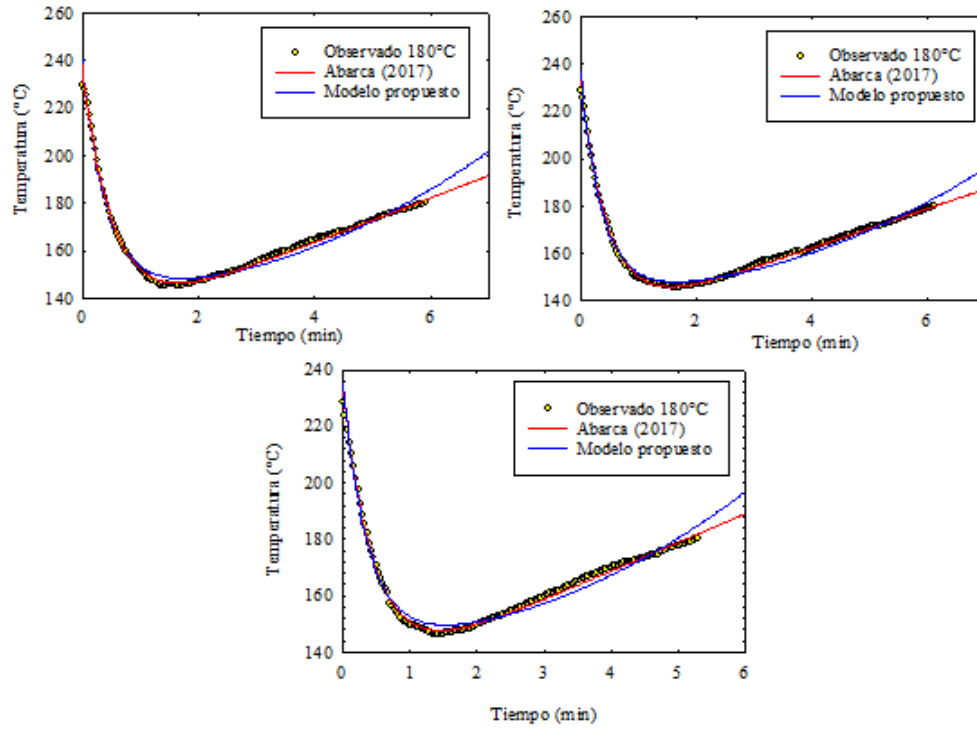
14. Cuando se alcanza la temperatura establecida para el nivel de tueste deseado, se procede con la descarga de los granos tostados. Para esto se debe posicionar una bandeja a la salida del tostador y se levanta el cilindro por medio del agarradero.



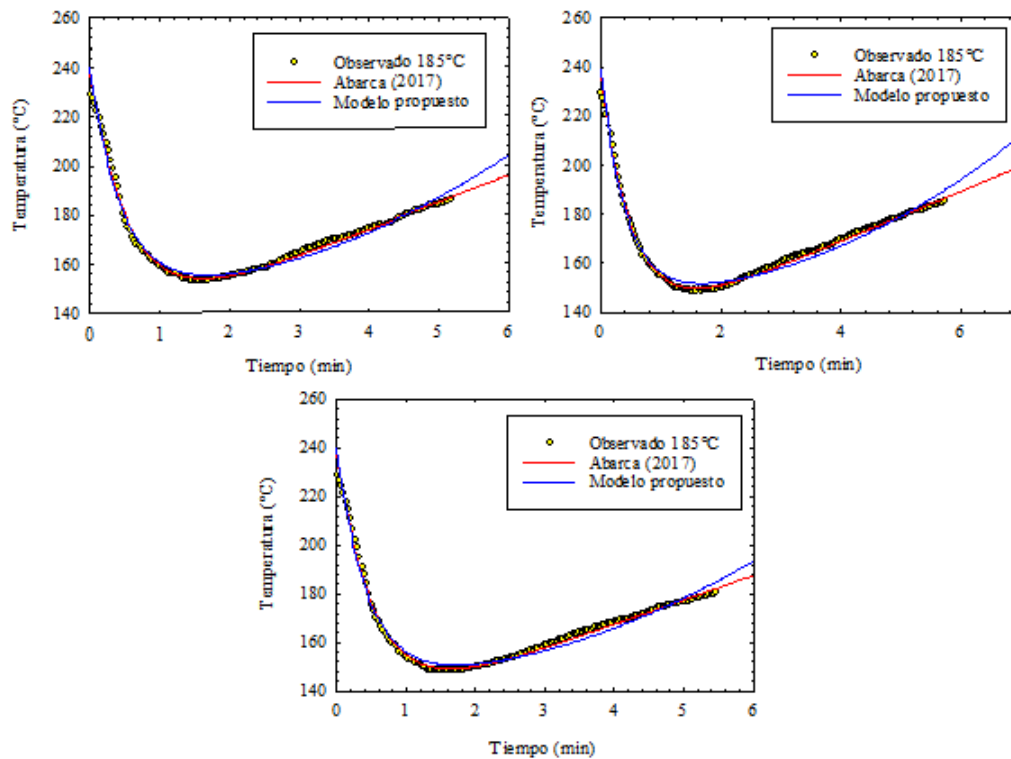
15. Inmediatamente después de la descarga de los granos tostados, ubicar la bandeja de descarga en la zona de enfriamiento, activar el interruptor denominado “EXTRACTOR” y colocar la bandeja con los granos tostados en la sección de enfriamiento.
16. Desactivar el interruptor denominado “EXTRACTOR” hasta que los granos alcancen la temperatura ambiente.
17. Al finalizar el proceso de tueste, desactivar el interruptor “CILINDRO” y cerrar la llave de paso de gas.

18. Dejar enfriar el equipo en un lugar ventilado.

**PRECAUCIÓN:** Evitar el contacto directo con la superficie del tostador ya que este permanece caliente después de su uso y puede provocar quemaduras en la piel.

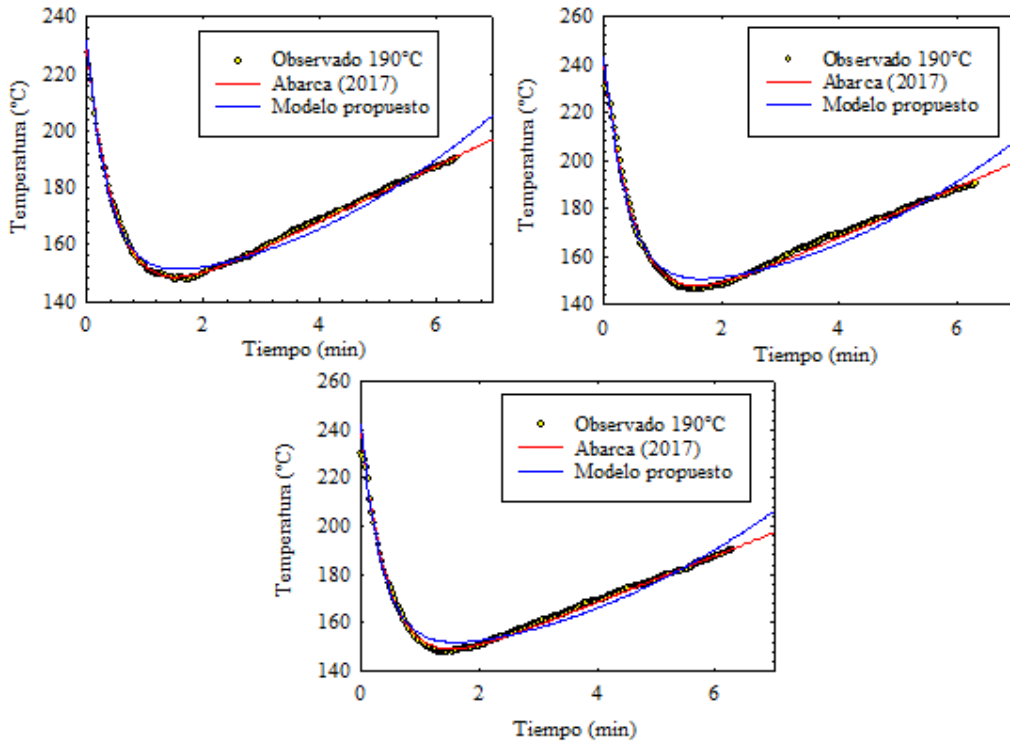


**Apéndice 3.** Ajustes para el perfil de tueste de cacao en tostador eléctrico a 180 °C.

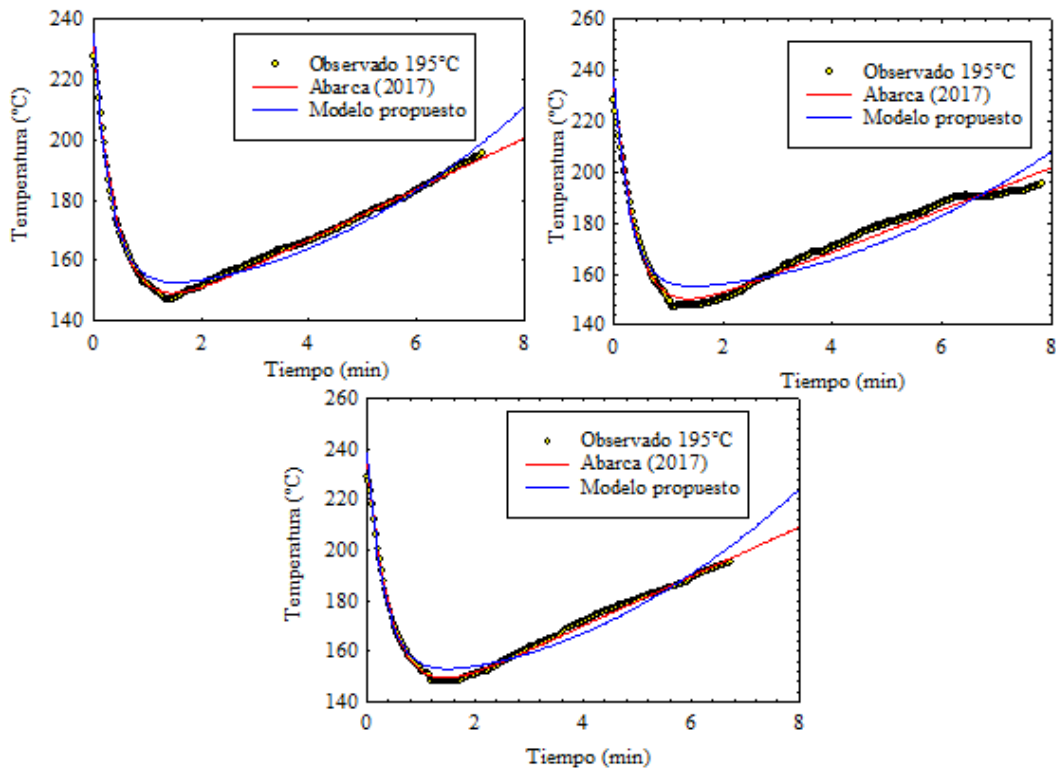


**Apéndice 4.** Ajustes para el perfil de tueste de cacao en tostador eléctrico a 185°C.

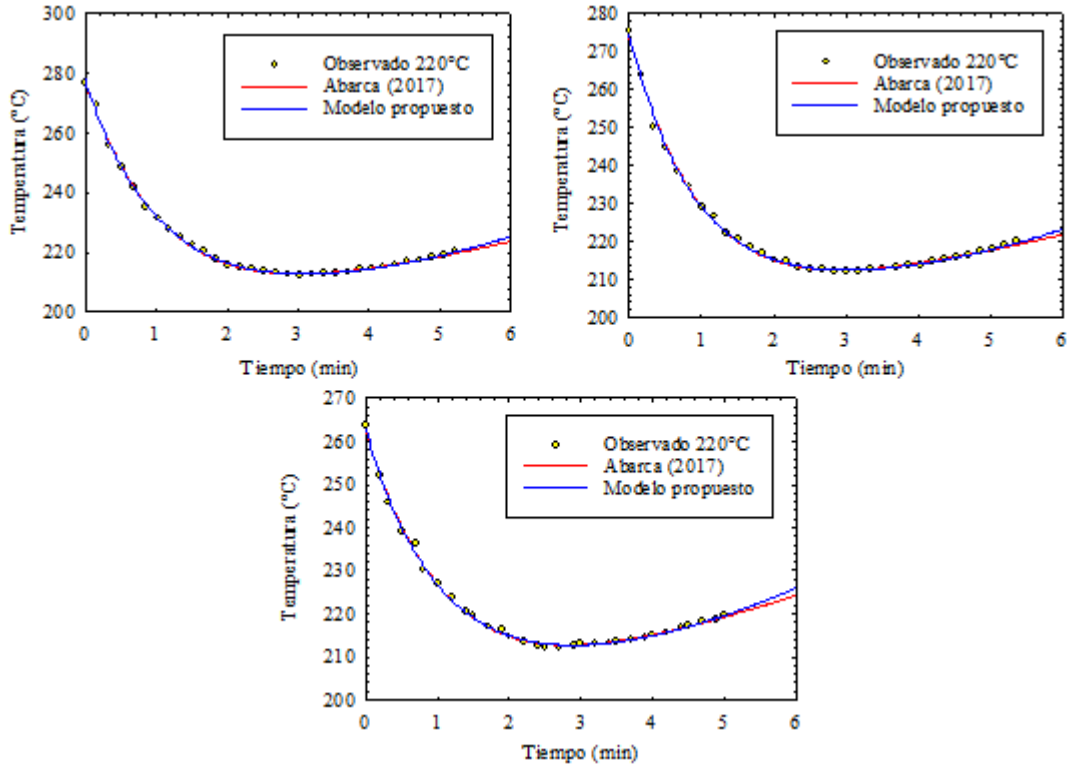




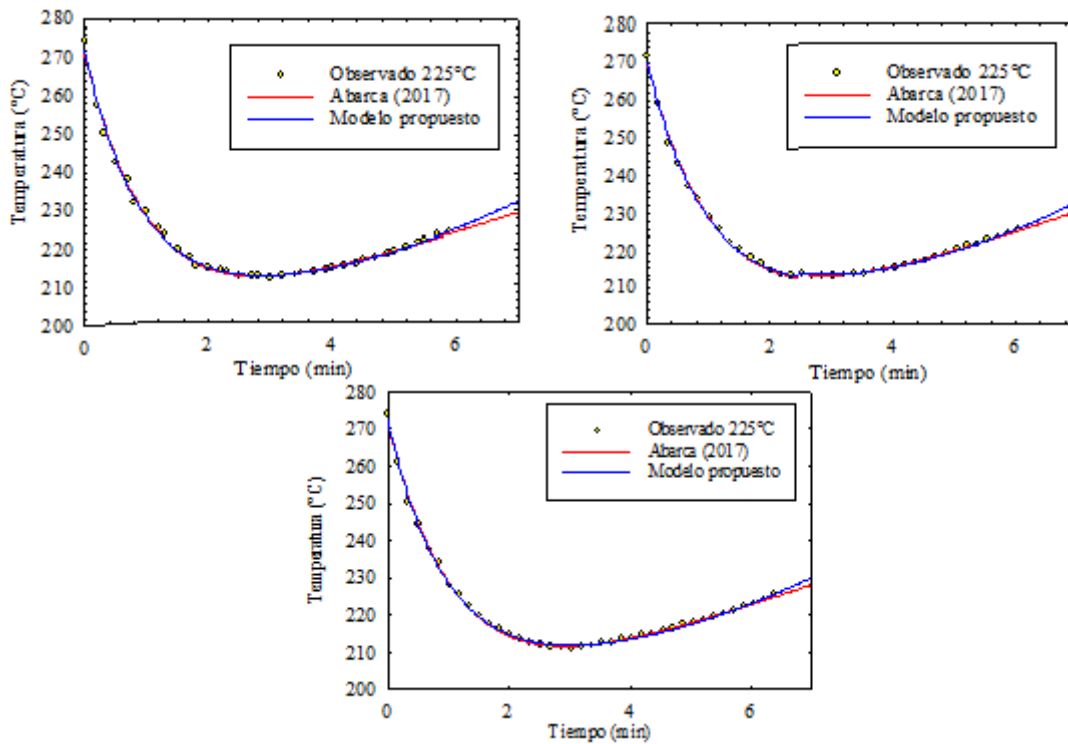
**Apéndice 5.** Ajustes para el perfil de tueste de cacao en tostador eléctrico a 190 °C.



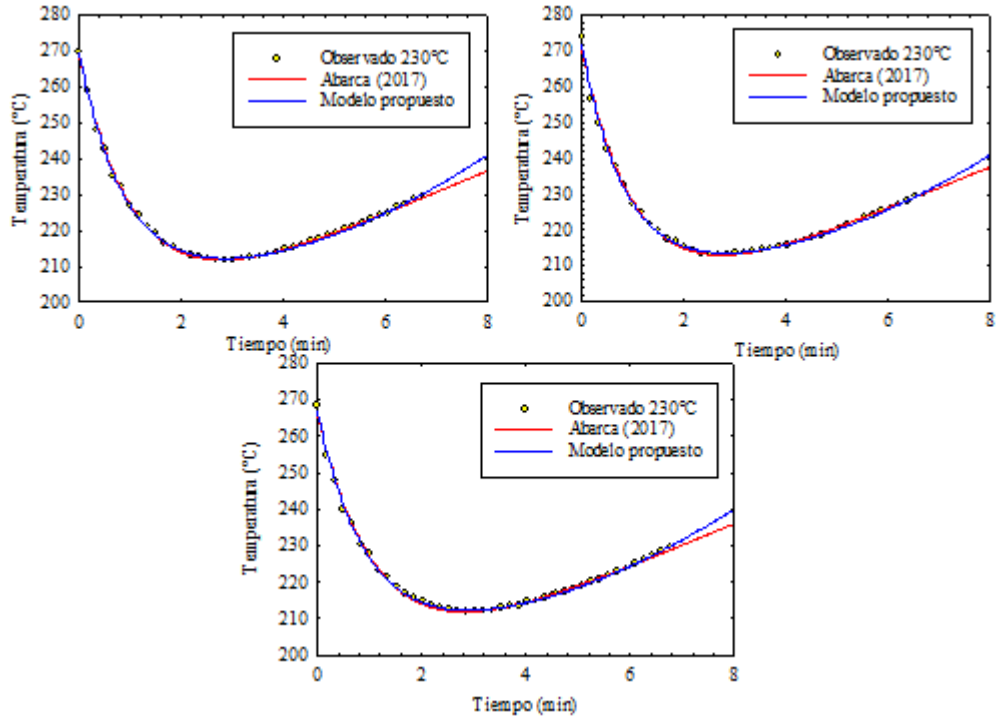
**Apéndice 6.** Ajustes para el perfil de tueste de cacao en tostador eléctrico a 195°C.



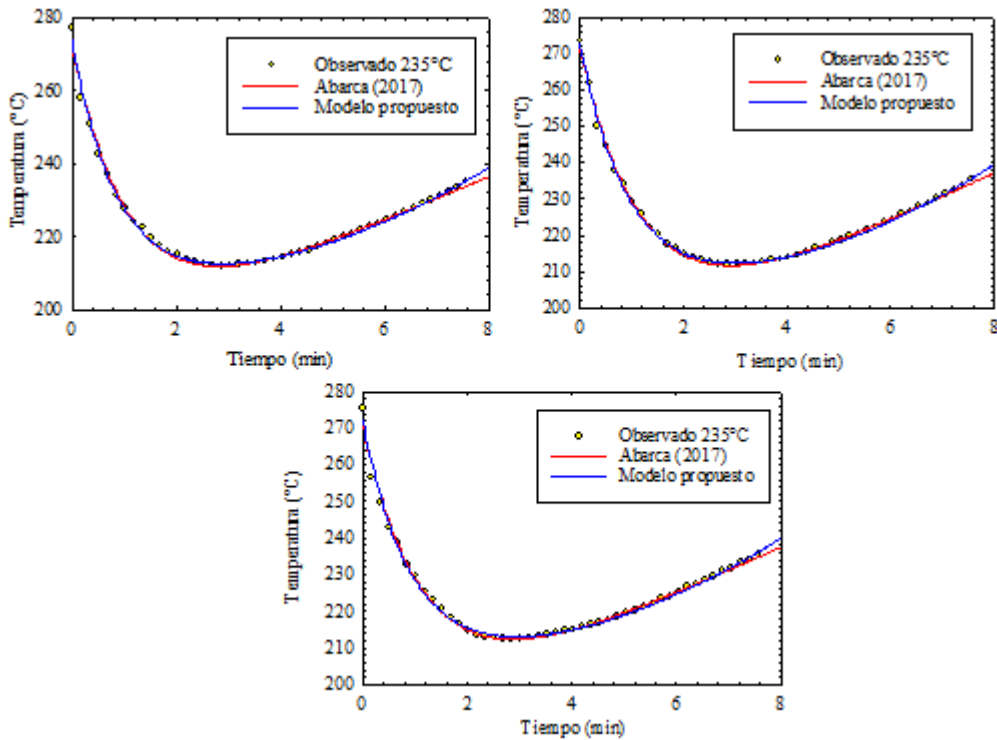
**Apéndice 7.** Ajustes para el perfil de tueste de cacao en tostador con fuente de gas a 220°C.



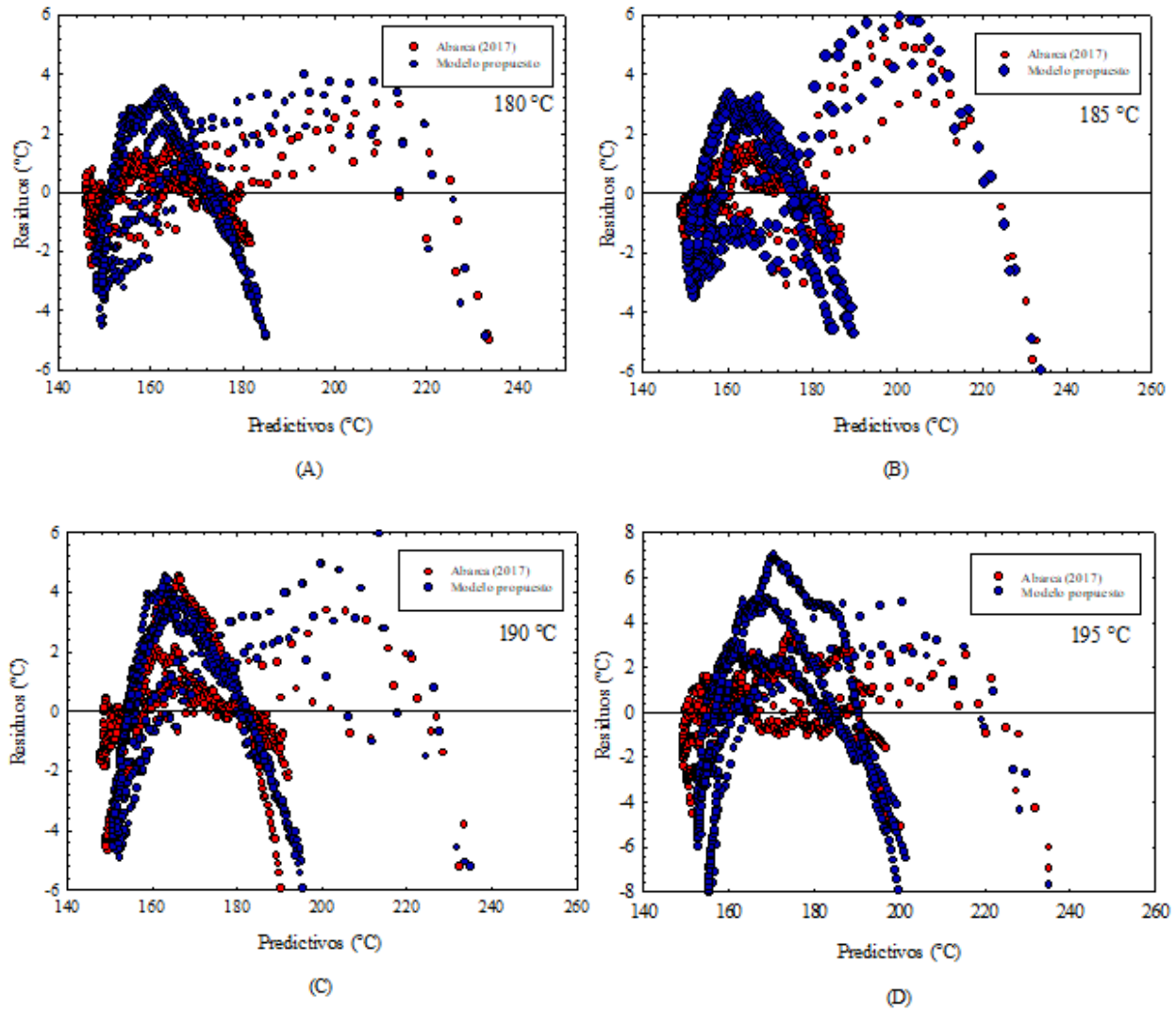
**Apéndice 8.** Ajustes para el perfil de tueste de cacao en tostador con fuente de gas a 225°C.



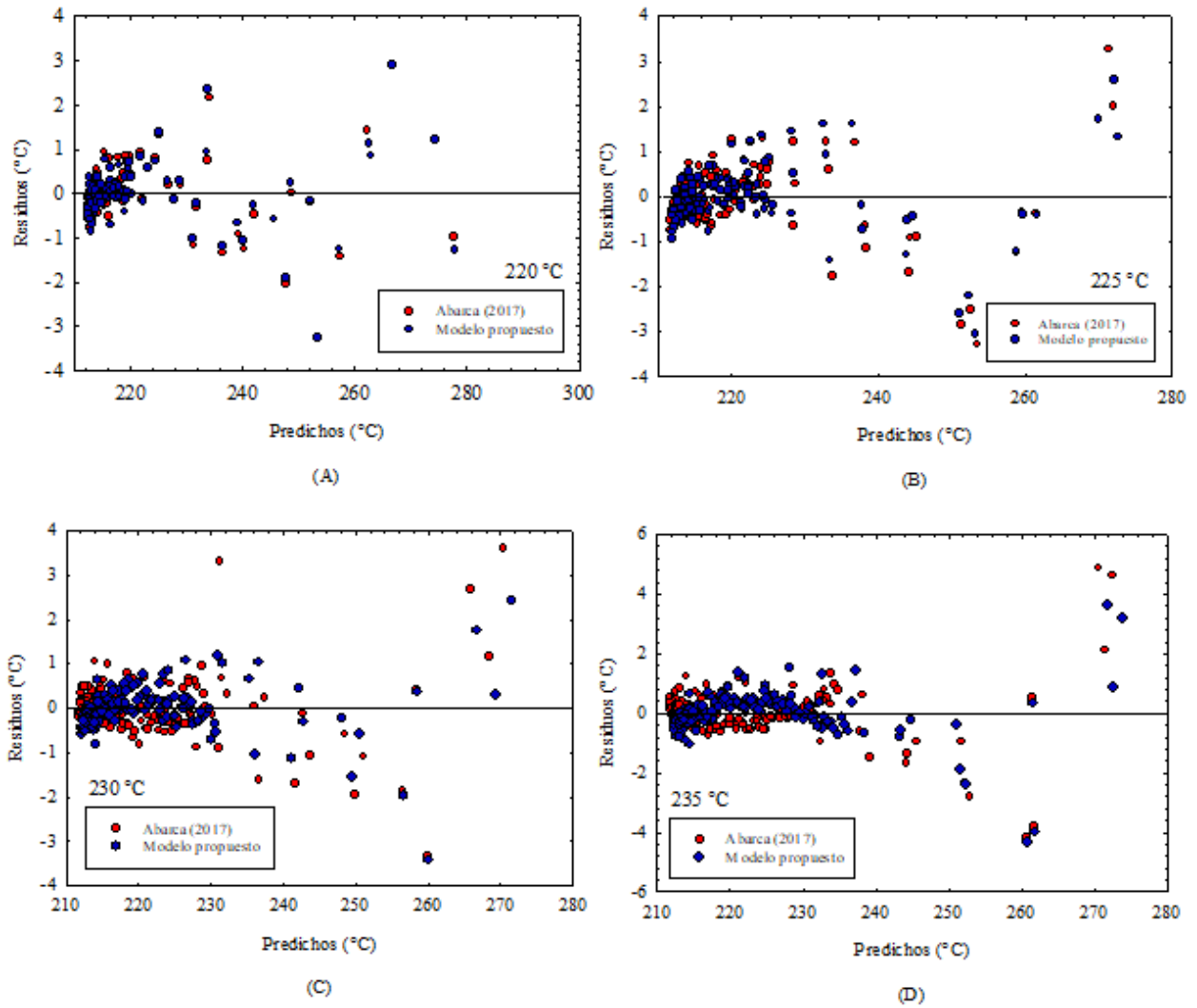
**Apéndice 9.** Ajustes para el perfil de tueste de cacao en tostador con fuente de gas a 230°C.



**Apéndice 10.** Ajustes para el perfil de tueste de cacao en tostador con fuente de gas a 235°C.



**Apéndice 11.** Residuos respecto al tiempo para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de cacao en tostador eléctrico. (A) 180 °C, (B) 185 °C, (C) 190 °C y (D) 195 °C.



**Apéndice 12.** Residuos respecto al tiempo para los ajustes de las ecuaciones utilizadas para la torrefacción de granos de cacao en tostador con fuente de gas. (A) 220 °C, (B) 225 °C, (C) 230 °C y (D) 235 °C.