

“MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA TEMPERATURA DEL TOSTADOR Y DE LOS GRANOS DE CAFÉ MIEL DURANTE LA TORREFACCIÓN ”

GUILLERMO VARGAS-ELÍAS¹, FRANCINI GAMBOA FERNÁNDEZ², ASHLEY CHINCHILLA JIMÉNEZ³; ALDO IZQUIERDO VÁZQUEZ⁴, YAILYN ABARCA ALPÍZAR⁵, JUAN JOSÉ AMAYA-CHICAS⁶

¹ D. Sc., Ing. Agrícola. CIGRAS - Universidad de Costa Rica, guillermo.vargaselias@ucr.ac.cr

^{2,3,4,5} Estudiante de Agronomía, Universidad de Costa Rica,

⁶ Estudiante de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, juan.amaya@ucr.ac.cr

RESUMEN: El proceso de torrefacción genera un perfil de temperatura del tostador por efecto del calentamiento de los granos, ambas temperaturas pueden ser descritas matemáticamente y por lo tanto, se convierten en modelos predictivos siempre que sea un mismo lote de café. El objetivo de este trabajo fue determinar el perfil de temperatura del tostador y la cinética del calentamiento de los granos durante la torrefacción en tres lotes de café. Se utilizaron tres lotes de café variedad *catuaí* y *geisha*, provenientes del proceso semiseco, catalogados sensorialmente como *café especial*. Se utilizó un termopar tipo-K en el interior del tostador para registrar la temperatura del tostador y un termómetro infrarrojo para el registro del calentamiento de los granos. Las temperaturas del tostador se ajustaron adecuadamente con coeficiente de determinación mayor a 0,99 con el modelo matemático de 3 términos y 5 parámetros. La cinética del calentamiento de los granos fue ajustada adecuadamente con R^2 mayor que 0,996. Los modelos matemáticos representaron adecuadamente las temperaturas generadas durante la torrefacción tanto en el tostador como en los granos, lo que es un avance en la predicción del proceso con aplicación en la obtención de los niveles de tueste por lote.

PALABRAS CLAVE: Perfil de temperatura, cinética del calentamiento, *café especial*.

MATHEMATICAL MODELING OF THE TEMPERATURE OF THE ROASTER AND HONEY COFFEE BEANS DURING ROASTING

ABSTRACT: The roasting process generates a roaster temperature profile due to the heating of the beans, both temperatures can be described mathematically and therefore become predictive models as long as it is the same batch of coffee. The objective of this work was to determine the roaster temperature profile and the kinetics of bean heating during roasting in three batches of coffee. Grain batches of Catuaí and Geisha variety coffee were used, coming from the semi-dry process, sensorially classified as specialty coffee. A type-K thermocouple inside the roaster was used to record the temperature inside the roaster and an infrared thermometer was used to record the heating of the beans. The roaster temperatures were properly fitted with a coefficient of determination greater than 0.99 with the 3-term, 5-parameter mathematical model. The kinetics of bean heating was adequately fitted with an R^2 greater than 0.996. The mathematical models adequately represented the temperatures generated during roasting both in the roaster and in the beans, which is an advance in the prediction of the process with application in obtaining roasting levels per batch.

KEYWORDS: Roasting profile, heating kinetics, *specialty coffee*.

INTRODUCCIÓN: En Costa Rica la comercialización de café es clave dentro del aporte

económico del país, dado esto que para 2022 se registró un total de 1.417.188 sacos de café beneficiado de 46 kg para exportación de alta calidad. Los granos clasificados como *café especial* siguen la evaluación por la *Specialty Coffee Association of America* (SCAA), como aquel que presenta una calidad de taza de 80 puntos o más en su escala, factor que contribuyen a que este café tenga mayor demanda (DILAS-JIMÉNEZ *et al.*, 2020). Uno de los factores que ayuda a mejorar la tasa es la variedad del café, entre ellas el café *Catuaí*; las plantas son compactas, con potencial de rendimiento y calidad de taza cuyos frutos son de tamaño de grano mediano (ICAFE, 2011). También, existen variedades arábicas locales de Etiópe donde destaca la presencia del café *Geisha* (SCALABRIN *et al.*, 2020), ampliamente asociado con una calidad de taza excepcional, cuyas plantas poseen granos de tamaño mediano a grande con forma alargada (WCR, 2018). Por otra parte, se pueden dar diferentes tipos de secado del café, destacando en este caso el café miel que es pelado en un proceso semiseco donde no se hace la remoción del mucílago sino que se pone a secar con la capa aún recubriendo los granos (CALDERÓN, 2022). Durante la torrefacción los granos cambian física y químicamente, produciendo cambios de colores de tonalidades cafés claras a oscuras, siendo el color utilizado como un indicador del grado de tueste (WANG, 2014). El tiempo de tueste de un café especial se recomienda entre 7 y 17 minutos según las normas internacionales (OIC, 2017). En Costa Rica se viene desarrollando modelos matemáticos para describir el perfil del tostador tanto con café (ABARCA, 2017; BARRANTES, 2022) como con cacao (VARGAS, 2019; SANDÍ, 2023) y se desarrolló un modelo de calentamiento del grano (ABARCA y VARGAS, 2018). El objetivo de este trabajo fue determinar el perfil de temperatura del tostador y la cinética del calentamiento de los granos durante la torrefacción en tres lotes de café de alta calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS: El experimento se realizó en el Área de Procesamiento Agrícola, del CIGRAS de la Universidad de Costa Rica. Se utilizaron 5,4 kg de granos de café (*Coffea arabica* L.) provenientes de un proceso semiseco. Un lote catuaí (1) y otro geisha (3) provienen de San Jerónimo de Tarrazú y otro catuaí (2) de Pérez Zeledón. El tueste del café se realizó en masas de 600 g determinada en una balanza digital de la marca Boeco (Figura 1.A), modelo BPS 51 plus, con una precisión de $\pm 0,01$ g.

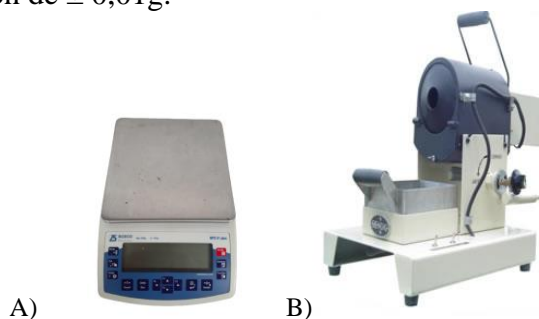


FIGURA 1. Balanza digital Boeco (A) y sistema con tostador con capacidad de 2000 kg (B).

La temperatura fue de 280 °C al inicio de cada tueste, se usó un tostador cilíndrico de fabricación costarricense marca Bending, modelo ECO-2000 (Figura 1B) el cual utiliza gas propano como fuente de calor. La temperatura se midió con termopar tipo-K en el interior del cilindro del tostador con un escáner con 12 termopares y se registró la temperatura por medio del programa Scanlink 2 para Windows 2007. Se utilizó un termómetro infrarrojo para medir la temperatura de los granos, marca General®, con lecturas entre -32 y 1650 °C, en intervalos de 0,5 segundos y cuenta con una precisión de 0,1 °C, que registró la temperatura de la superficie en los granos en movimiento.

La temperatura tanto del tostador como la del grano se ajustaron respectivamente con la ecuación 1 y 2 (BARRANTES, 2022; ABARCA y VARGAS, 2018).

$$T_t = a * \exp(-k * t^n) + b * t + c \quad (1)$$

$$T_g = (a/k) * (1 - \exp(-k * t)) + b * t + c \quad (2)$$

Donde:

T_t es la temperatura en el interior de tostador en contacto con el aire (°C)

t es el tiempo efectivo del proceso de torrefacción (min), T_g es la temperatura de los granos en movimiento (°C), k , n , a , b y c son los coeficientes determinados por regresión no lineal.

El ajuste de los datos con las ecuaciones se realizó en el programa SigmaPlot 15.0, donde se obtuvo el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}) así como el error estándar (ESS).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN: Los coeficientes de los ajustes por repetición fueron semejantes para el perfil de temperatura del tostador en cada lote según la Tabla 1.

TABLA 1: Coeficientes por repetición para el perfil de temperatura del tostador por lote.

Variedad	Lote	k (min ⁻¹)	n (adimen.)	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	c (°C)	R ² _{aj} (dec.)	ESS (%)
1 Catuaí	11	0,8343	0,8738	126,1843	8,5344	156,0091	0,9991	0,5360
	12	0,9098	0,9837	117,1186	7,0255	166,7704	0,9950	1,2975
	13	0,8951	0,7819	124,4751	8,4194	155,7797	0,9984	0,6762
2 Catuaí	21	0,9369	0,8152	119,8615	7,7598	161,4910	0,9989	0,5606
	22	0,9586	0,9144	115,0855	7,2660	166,8689	0,9991	0,5205
	23	0,8339	0,7704	128,2484	8,5154	151,5053	0,9981	0,7174
3 Geisha	31	0,8391	0,7861	130,0131	8,7534	148,1386	0,9982	0,7177
	32	0,8205	1,0241	114,8871	7,1587	161,8811	0,9996	0,3254
	33	0,8368	0,8687	123,5880	8,0380	150,9570	0,9993	0,4664

Se observó que el café catuaí provenientes de dos zonas geográficas presentaron similitud en el perfil de tueste como se observa en la figura 2, se puede inferir que el proceso semiseco se realizó adecuadamente alcanzando semejanza en el contenido de humedad.

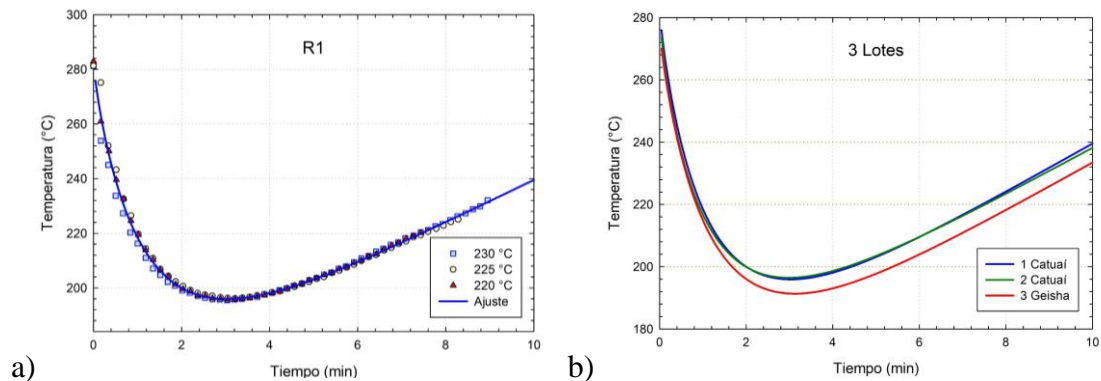


FIGURA 2. Perfil de temperatura del tostador en los tres lotes de café miel.

El tostador se mantuvo a una temperatura mayor a 180 °C garantizando el proceso. Las tres repeticiones de cada tueste describen un perfil de temperatura general como en la tabla 2.

TABLA 2: *Coeficientes por lote para el tostador y el calentamiento de los granos.

Temperatura	Variedad	k (min ⁻¹)	n (adimen.)	a (°C)	b (°C min ⁻¹)	c (°C)	R²_{aj} (dec.)	ESS (%)
Tostador	1 Catuaí	0,8879	0,8843	121,0830	7,8641	160,7490	0,9906	1,7094
	2 Catuaí	0,9319	0,8418	118,3387	7,5434	162,5462	0,9913	1,5573
	3 Geisha	0,8433	0,8919	120,5333	7,8067	155,2130	0,9938	2,1600
Grano	1 Catuaí	0.6972	NA	54.7401	8.3147	78.3007	0.9977	1.6977
	2 Catuaí	0.6132	NA	58.7713	7.2428	67.0897	0.9980	1.8003
	3 Geisha	1,0515	NA	92,3667	10,2381	65,1642	0,9963	2,2902

ESS: error estándar de estimación. (*) Los p-valores en la determinación de los coeficientes fue menor a 0,0001

El tiempo de tueste de los lotes de café fue extrapolado hasta 10 min, es decir; cumplieron el tiempo de proceso según las normas internacionales (OIC, 2017), la predicción de los niveles de tueste y al perfil de temperaturas están de acuerdo con otras investigaciones (ABARCA, 2017; VARGAS-ELÍAS et al., 2020, BARRANTES, 2022).

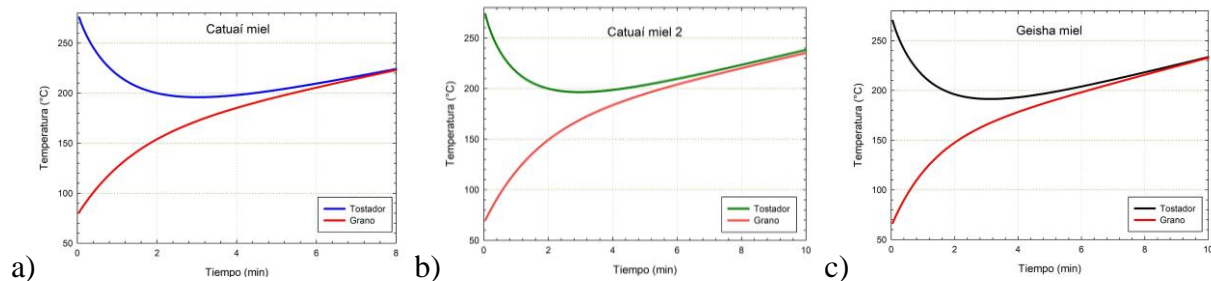


FIGURA 2. Modelación matemática de la temperatura del tostador y de los granos de café.

Los resultados obtenidos cumplen con las normas del tiempo de proceso para cafés especiales (OIC, 2017), los perfiles de temperaturas están de acuerdo con otras investigaciones (ABARCA, 2017; VARGAS-ELÍAS et al., 2020, BARRANTES, 2022).

CONCLUSIONES: Los modelos matemáticos propuestos representaron adecuadamente las temperaturas generadas durante la torrefacción tanto en el tostador como en los granos, lo que es un avance en la predicción del proceso en los tostadores horizontales rotativos.

REFERENCIAS: ABARCA, R. (2017). **Estudio del proceso de torrefacción del café (Coffea arabica) en tostador convencional** (Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica).

<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75352>.

BARRANTES M., SERGIO I. (2022). **Efecto del tipo de beneficiado en la torrefacción de los granos de café (Coffea arabica)**. 99 f. Graduado de Ingeniería Agrícola – Escuela de Ingeniería Agrícola y Biosistemas, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2022.

<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/86824>.

CALDERÓN, Y. (2022). **Determinar Perfiles de Taza del Café Castillo Implementando los Métodos Natural y Honey en Tona**, Santander. [Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander.

<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/f26269a4-ec0d-4297-8e41-631cd1fa2c51/c>

SANDÍ, A.M. (2023). **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**. 2023. 83f. Graduada de Ingeniería Agrícola y Biosistemas. UCR, Costa Rica, 2023.