

Uso de sensores para modelamiento matemático durante el tostado de granos de cacao (*Theobroma cacao*) de la variedad Chuncho

Use of sensors for mathematical modeling during the roasting of cocoa beans (*Theobroma cacao*) of the Chuncho variety

Augusto Pumacahua-Ramos^{1*}, Angie Sharon Vega-Loaiza², Rosibeth Gonzales-Sánchez³,
Paco Wilson Marconi-Quispe⁴ y Hilka Mariela Carrión-Sánchez⁵

Resumen

Simple innovaciones del control de temperatura durante el tostado de cacao pueden ayudar a mejorar la calidad del chocolate elaborado por pequeños empresarios de los valles andino amazónicos del Perú. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la temperatura del horno en la temperatura de granos de cacao (*Theobroma cacao*) durante el tostado, mediante seis modelos matemáticos. Granos de cacao en las cantidades de 100 y 200 g fueron colocados una bandeja en un horno eléctrico convencional programado a 250 °C. Se introdujo una termocupla tipo K con su respectivo lector en el centro geométrico de un grano de cacao y otro a 5 cm de la superficie. Las lecturas fueron registradas a cada 5 min y ajustados a los modelos matemáticos de Sistema Concentrado, Ley de Fourier, Peleg, Page, Weibull y Midilli. Se determinó el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), la difusividad térmica (α), y las constantes de los modelos empíricos. El h fue de 7,04 y 7,74 W/m² °C para el tostado de 100 y 200 g, respectivamente. La α fue de $3,09 \times 10^{-8}$ y $3,28 \times 10^{-8}$ m²/s para el tostado de 100 y 200 g, respectivamente. Las constantes de velocidad de los modelos empíricos mostraron diferencia en el tostado de 100 y 200 g. Todos los modelos representaron muy bien los datos experimentales, pues los valores de R², MRSE y MA%E fueron próximos de 1, próximos de 0 y menores a 10%, respectivamente. El mejor modelo matemático fue el de Peleg.

Palabras claves: Sistema concentrado, segunda ley de Fourier, sensores tipo K, coeficiente convectivo de transferencia de calor, difusividad térmica.

Abstrac

Simple innovations in temperature control during cocoa roasting can help improve the quality of chocolate made by small entrepreneurs in the Andean-Amazonian valleys of Peru. The objective of this research was to evaluate the effect of oven temperature on the temperature of cocoa beans (*Theobroma cacao*) during roasting, using six mathematical models. Cocoa beans in the amounts of 100 and 200 g were placed in a tray in a conventional electric oven set at 250 °C. A K-type thermocouple with its respective reader was introduced in the geometric center of a cocoa bean and another 5 cm from the surface. The readings were recorded every 5 min and exported via Bluetooth to a computer. The temperature data were fitted to the mathematical models of the Concentrated System, Fourier's Law, Peleg, Page, Weibull and Midilli. The convective heat transfer coefficient (h), the thermal diffusivity (α), and the constants of the empirical models were determined. The h was 7.04 and 7.74 W/m² °C for the toast of 100 and 200 g, respectively. The α was 3.09×10^{-8} and 3.28×10^{-8} m²/s for the 100 and 200 g toast, respectively. The rate constants of the empirical models showed a difference in the roasting of 100 and 200 g. All models represented the experimental data very well, since the values of R², MRSE and MA%E were close to 1, close to 0 and less than 10%, respectively. The best mathematical model was that of Peleg.

Keywords: Concentrated system, Fourier's second law, K-type sensors, convective heat transfer coefficient, thermal diffusivity.

Sección: Artículo original

Recibido: 08/02/2022

Aceptado: 27/04/2022

Publicado: 16/05/2022

*Autor correspondiente: augusto.pumacahua@uniq.edu.pe

Introducción

La provincia La Convención, región Cusco, la provincia de Carabaya y Sandía en la región Puno son regiones montañosas que poseen valles interandinos donde se cultivan desde tiempos antiguos diversos genotipos del cacao fino de aroma o cacao Chuncho. Hay evidencias de la existencia de diversidad genética en la región sur del Perú (Nieves-Orduña et al., 2021). Además, el mucílago del cacao Chuncho tiene una diversidad de aromas (Eskes et al., 2018) que hacen que los chocolates elaborados con los granos de cacao sean muy reconocidos en el mundo.

¹Escuela profesional de ingeniería de alimentos, Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba. El Arenal s/n. Quillabamba, Cusco, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8380-9168>

²Escuela de postgrado de tecnología de alimentos, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Av. La Cultura. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3327-1635>

³Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba. El Arenal s/n. Quillabamba, Cusco, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0928-1094>

⁴Departamento académico de ciencias básicas e ingeniería civil, Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba. El Arenal s/n. Quillabamba, Cusco, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9698-0861>

⁵Escuela profesional de ingeniería de alimentos, Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba. El Arenal s/n. Quillabamba, Cusco, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3009-6029>

Como citar: Pumacahua-Ramos, A., Vega-Loaiza, A. S., Gonzales-Sánchez, R., Marconi-Quispe, P. W. y Carrión-Sánchez, H. M. (2022). Uso de sensores para modelamiento matemático durante el tostado de granos de cacao (*Theobroma cacao*) de la variedad Chuncho. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(2), 84-93. DOI: <https://doi.org/10.18271/ria.2022.419>



En la Provincia de La Convención hay diversos pequeños productores y emprendedores que elaboran pasta pura de cacao y chocolates de boca. Estos realizan el tostado de los granos de cacao en hornos rotatorios con calentamiento a gas o leña y están sujetos a excesos de temperatura en el tostado que confieren aromas a quemado, quitándole el aroma típico del chocolate de cacao Chunchu. Las empresas chocolateras utilizan hornos con sus debidos controles de tiempo y temperatura. Una investigación sobre las propiedades sensoriales del chocolate utilizó 118-122 °C/11 min y 110-120 °C/9 min para el tostado de granos de cacao de Quillabamba y de Bagua, respectivamente, sin datos de lugar de medición ni tipo de termómetro utilizado (Mejía et al., 2021). La temperatura de los procesos de transformación de alimentos en hornos convencionales es controlada visualmente o con termómetros analógicos, lo que dificulta un debido tostado. Este procedimiento no garantiza cómo la temperatura estará distribuida en todo el volumen del alimento, puesto que lo primero que se calentará es la superficie del mismo. Un control más preciso sería mediante sensores insertados en los granos de cacao. En el mercado actual existen diversos tipos de sensores. Uno de los más utilizados son los sensores tipo K, que están hechos con la unión de dos alambres fabricados con níquel cromo y aluminio. Diversas investigaciones utilizaron sensores tipo K para control de temperaturas durante la cocción de carne por convección natural y ebullición (Ahmad et al., 2015), tostado de café en grano (Fabbri et al., 2011), cocción de carne de res (Isleroglu & Kaymak-ertekin, 2016; Kondjoyan et al., 2013) y control de temperatura del aire de ambiente de crianza de pollos (Oliveira et al., 2018b). Un análisis de los diversos tipos de sensores recomienda el uso de sensores tipo termocupla en el control, de procesos de elaboración de alimentos por ser más económicos (Quispe, Calderón, 2016).

El tostado de los granos de cacao es un proceso muy importante en la elaboración de chocolates. El tostado es un proceso de transferencia de calor y está sujeta a la temperatura del tostador y el tiempo de tostado. Conocer la temperatura del centro geométrico del grano es de vital importancia, pues es la máxima temperatura del grano durante el tostado y ésta puede afectar positiva o negativamente las propiedades fisicoquímicas del alimento (Fernández-Romero et al., 2020; Rabeler & Feyissa, 2018). Se ha monitoreado la temperatura del centro de granos de café mediante termocuplas tipo K inseridas en el centro en un tostador rotatorio (Fabbri et al., 2011). Hay varias investigaciones, sobre el efecto en el incremento de fenoles y flavonoides en leguminosas (Hong et al., 2020), en el trigo sarraceno (Ryu et al., 2020), en granos de café (Kwok et al., 2020; Münchow et al., 2020), en la calidad de chocolate (Edem et al., 2016; Fernández-Romero et al., 2020; Kadow et al., 2015), entre otros alimentos (Ciou et al., 2021; Górecki & Hallmann, 2020; Hong et al., 2020; Rabeler & Feyissa, 2018). El análisis de la transferencia de calor con ayuda de

sensores de temperatura, es una herramienta valiosa para monitorear o predecir las temperaturas del grano durante el tostado.

En ingeniería se utilizan diversos modelos matemáticos para entender los fenómenos en los procesos de transferencia. Fabbri et al., (2011) utilizó modelos matemáticos a datos de temperatura del grano durante el tostado con buen ajuste. Se utilizaron modelos matemáticos en el tostado de granos de cacao en tostador cilíndrico con ayuda de sensores en la superficie y centro geométrico del cilindro (Ariana et al., 2019), pero no modelaron la temperatura de los granos. Otras investigaciones sobre uso de modelos matemáticos durante transferencia de calor utilizaron sensores inseridos en varios lugares del alimento como, en la cocción de pollo (Rabeler & Feyissa, 2018), en la crianza de pollos (Oliveira et al., 2018a) y en la cocción de carne (Ahmad et al., 2015). El modelo de sistemas concentrados considera el alimento con propiedades uniformes durante el proceso, permitiendo determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor. Este modelo fue utilizado para el estudio de la cocción de carne en horno (Isleroglu & Kaymak-ertekin, 2016). La ley de Fourier de la conducción del calor permite determinar la difusividad térmica del alimento entre otras propiedades y pueden ayudar a los procesadores de alimentos con calor para obtener mejores condiciones de proceso (Dash et al., 2022). La ley de Fourier fue utilizada para el modelamiento del calentamiento por microondas de arroz congelado (Klinbun & Rattanadecho, 2019) y secado solar de papas en forma de cilindro (Dhalsamant et al., 2018). Los modelos matemáticos empíricos como el modelo de Peleg, Page, Weibull y Midilli, fueron utilizados de forma simple en diversas investigaciones como en el secado de mango (García Paternina et al., 2015) y tostado de cacao (Ariana et al., 2019). Pequeños, medianos y grandes procesadores de cacao podrían utilizar modelos simples para cuidar que su proceso de tostado no degrade las características de aroma del cacao.

Por lo expuesto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la temperatura del centro geométrico de los granos de cacao Chunchu durante el tostado en horno eléctrico, mediante seis modelos matemáticos.

Materiales y métodos

El cacao chunchu es de producción entre los meses de noviembre a marzo. Granos del cacao Chunchu de la campaña 2019/20 fueron obtenidos de una parcela de cultivo ubicado en el sector de Serranuyoc (latitud 12° 46' 55.09" S y longitud 72° 39' 58.31" W), Quillabamba, distrito de Santa Ana, provincia La Convención y región Cusco, Perú. Los experimentos fueron realizados en el Taller de Procesos Alimenticios de la Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba.

Los granos fueron fermentados durante cinco días, secados al sol hasta masa constante y almacenados en bolsas plásticas de polietileno. Antes de los experimentos de tostado, los granos secos fueron seleccionados por tamaño en pequeños, medianos y grandes. Los granos medianos se utilizaron para los experimentos de tostado. El contenido de agua fue determinado por el método patrón de estufa (105°C/24 h) en 3 repeticiones. Las propiedades axiales de los granos secos fueron determinadas midiendo el diámetro mayor (a), diámetro medio (b) y diámetro menor (c) de 20 granos al inicio del tostado utilizando un Vernier digital marca Vogel Germany (Modelo IP54 Absolute). El diámetro c fue utilizado para el modelo de sistema concentrado y el modelo de placa plana infinita. La masa unitaria se determinó pesando 51 g y dividiendo por el número de granos en balanza de plataforma de 4 kg de capacidad (0.1g) marca Torrey (Modelo L-EQ).

Las dimensiones axiales, como el diámetro medio geométrico (*dmg*) y la esfericidad (φ), fueron determinadas antes del tostado por las siguientes ecuaciones (Mohite et al., 2019):

$$dmg = (a * b * c)^{1/3} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{(a * b * c)^{1/3}}{a} \quad (2)$$

El esquema del tostado en horno eléctrico convencional de la marca IMACO (Modelo HES35R, China), potencia de 1200 W, resistencias eléctricas en la parte superior e inferior, temperatura máxima de 250°C y tiempo máximo de 120 min, es mostrado en la Figura 1.

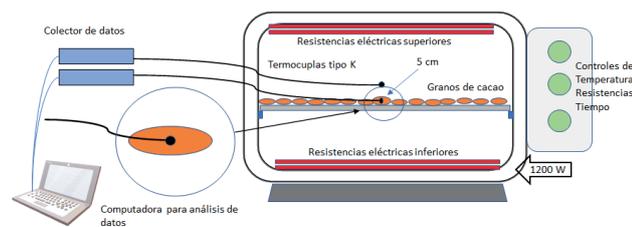


Figura 1. Esquema de tostado de granos de cacao en horno eléctrico convencional.

Para el control de la temperatura, se utilizó sensores tipo K conectados con transmisor vía Bluetooth de la marca PASCO modelo PS-3209. Considerando que los granos deben estar uno al lado del otro en la bandeja del horno, se consideró hacer pruebas con dos grupos de masas de cacao. Masas de 100 y 200 g ocupan más del 50 % de la capacidad de la bandeja que tiene un área de 0.085 m² (0.25 m x 0.34 m). Se peso 100 o 200 g de cacao seleccionado, en uno de los granos se hizo un agujero de 1.35 mm hasta el centro geométrico del grano con un mini perforador eléctrico. Los granos fueron colocados en una bandeja negra a temperatura ambiente. Se colocó dos sensores termocupa

tipo K por dos agujeros al costado del horno. Un sensor fue para controlar la temperatura del aire a 5 cm de los granos y el otro para los granos. Se encendió el controlador de temperatura y el horno hasta que alcance la temperatura máxima de 250 °C. Alcanzado esa temperatura, se abrió la puerta. Inmediatamente se colocó en sensor tipo K en el grano perforado y colocado en el centro geométrico de la bandeja y se cerró la puerta. El segundo sensor estuvo a 5 cm de la superficie de los granos de cacao, permitiendo conocer la temperatura del aire circundante a los granos. El tostado se verificó con los estallidos (cracks) por la salida de vapor de agua de los granos y por la temperatura del centro geométrico del grano. Aproximadamente 1 minuto antes del final del tostado, se desligó el horno, para luego retirar la bandeja caliente. Los datos colectados por los sensores fueron ajustados a los modelos matemáticos en una planilla Excel y graficados mediante el software ORIGIN PRO 2021b. Los experimentos se realizaron con 4 repeticiones.

Para el análisis de los datos experimentales, se consideró que los granos de cacao, por ser pequeños, pueden ajustarse al modelo de sistema concentrado de transferencia de calor en estado transitorio. En este modelo, se considera que el calor se transfiere por convección hacia la superficie de los granos, incrementando la energía de forma instantánea sin formar gradiente. La ecuación de sistema concentrado (Çengel & Ghajar, 2011) es:

$$\frac{T_t - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\frac{hA_s}{mC_p}t} \quad (3)$$

Donde, T_t es la temperatura (°C) del grano en el tiempo t, T_i es temperatura inicial, T_∞ es la temperatura a 5 cm de la superficie de los granos de cacao, h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m °C), A_s es el área superficial de los 100 o 200 g que forman una placa plana (m²), m es la masa (g) y C_p es el calor específico (J/kg °C). El calor específico fue determinado por la ecuación de Siebel, que es muy utilizada en alimentos con buena aproximación:

$$C_p = X_{bh} .3348 + 837 \quad (4)$$

Donde, X_{bh} es el contenido de agua en base húmeda.

El modelo de sistemas concentrados es útil para determinar experimentalmente el coeficiente convectivo de transferencia de calor, el mismo que se utiliza para determinar el número de Biot.

El segundo modelo matemático utilizado es el de la ley de Fourier de la transferencia de calor (Çengel & Ghajar, 2011). El mismo que mediante un análisis unidireccional de la transferencia de calor en estado transitorio en función del tiempo, es expresada por una ecuación diferencial.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

Donde, T es la temperatura, x es la dirección de la transferencia, α es la difusividad térmica (m^2/s) y t es el tiempo (s).

La solución de la Ec. 5, por el método de separación de variables y para la aproximación de un término en la determinación de la temperatura a lo largo de x,

$$\frac{T_{(x,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 e^{-\frac{\lambda_1^2 \alpha}{L^2} t} \cos(\lambda_1 x/L) \tag{6}$$

y para la temperatura en el centro geométrico del grano es:

$$\frac{T_0 - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 e^{-\frac{\lambda_1^2 \alpha}{L^2} t} \tag{7}$$

Donde, T_0 es la temperatura del centro geométrico del grano en el tiempo ($^{\circ}C$), $T_{(x,t)}$ es la temperatura a lo largo de x durante el tostado del grano en el tiempo ($^{\circ}C$), T_i es la temperatura inicial ($^{\circ}C$), T_{∞} es la temperatura del infinito o del horno ($^{\circ}C$), α es la difusividad térmica (m^2/s), t el tiempo (s), L es la mitad del espesor c (m), A_1 y λ_1 son los coeficientes utilizados en la aproximación de un término en base al número de Biot.

$$B_i = \frac{hL}{k} \tag{8}$$

Donde, k es la conductividad térmica ($W/m^{\circ}C$) de los granos de cacao. El mismo que fue determinado por la ecuación lineal para granos de cacao (Bart-Plange, 2012).

$$k = 0.0007 T + 0.0024 \tag{9}$$

Donde, T es la temperatura promedio del aire del horno ($^{\circ}C$).

Los modelos empíricos de Page, Weibull, Midilli y Peleg, respectivamente, fueron utilizados en esta investigación para determinar las constantes de velocidad del tostado de los granos. Estos y otros modelos fueron utilizados en el tostado de cacao, pero para la difusión de agua (Ariana et al., 2019).

$$\frac{T_t - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \exp(-k_1 t^n) \tag{10}$$

$$\frac{T_t - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \exp\left(-\left(\frac{t}{k_1}\right)^n\right) \tag{11}$$

$$\frac{T_t - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = a \exp(-k_1 t^n) + bt \tag{12}$$

$$T_t = T_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 * t} \tag{13}$$

Donde, a, b, k_1 , k_2 y n son constantes de los modelos empíricos.

El ajuste de los modelos fue realizado probando un valor aproximado de las constantes de los modelos y

ajustado el error mediante la herramienta Solver del Excel 2010®. Los valores ajustados fueron evaluados mediante un análisis estadístico y validados mediante el coeficiente de determinación R^2 , la Media Residual Cuadrática del Error (MRSE) y la media Absoluta Porcentual del Error (MA%E). Si el R^2 es próximo de 1 indica que la curva de ajuste es muy semejante al experimental. Si el MRSE es próximo de 0, indica que el error tiende a cero. Si el MA%E esta entre 5 - 10% indica un ajuste bueno y si es menor a 5%, indica un ajuste muy bueno a los datos experimentales. El MRSE y MA%E es definido como:

$$MRSE = \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(X_{exp} - X_{Cal})^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{14}$$

$$MA\%E = \frac{100}{N} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|X_{exp} - X_{Cal}|}{X_{exp}} \tag{15}$$

Para verificar si los tratamientos con 100 y 200 g de cacao son significativamente diferentes, se aplicó la prueba de ANOVA al 95% de probabilidad y Tukey (0.05 de error) en base los Coeficientes convectivos de transferencia de calor (h) y difusividades térmicas determinados en cada repetición para el modelo de sistema concentrado y la ley de Fourier.

Resultados y discusión

Las propiedades axiales de los granos de cacao al inicio del tostado son mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades axiales, gravimétricas y otras de los granos de cacao utilizadas en el experimento.

Medidas	Unidad	Valor	*Desvío
Diámetro mayor, a	mm	18,27	$\pm 1,02$
Diámetro medio, b	mm	10,39	$\pm 0,78$
Diámetro menor, c	mm	7,30	$\pm 0,85$
Diámetro Medio Geométrico, DMG	mm	11,13	$\pm 0,56$
Esfericidad	Adim	0,61	$\pm 0,04$
Masa de un grano	g	0,66	$\pm 0,01$
Calor específico	J/kg $^{\circ}C$	1138,19	$\pm 4,05$
Conductividad térmica	W/m $^{\circ}C$	0,096	$\pm 0,001$

* La desviación estándar es la medida de la dispersión de los valores respecto a la media (valor promedio).

Las propiedades axiales muestran que los granos de cacao Chuncho son pequeños en comparación a las variedades comerciales. Granos de cacao hibrido tuvieron diámetro mayor, medio y menor de 28,3; 12,9; y 10,5 mm, respectivamente (Bastos et al., 2018). Los diámetros a, b y c del cacao Chuncho del presente trabajo son considerablemente menores. Granos de cacao hibrido tuvieron un *dmg* de 15,65 mm y esfericidad de 0,55. Los granos de cacao Chuncho en este trabajo tuvieron *dmg* de 11,13 mm y esfericidad de 0,61, siendo estos más pequeños y más esféricos que el hibrido. Consideramos que los granos de cacao chuncho son más esféricos que los granos de cacao hibrido como una característica típica de esta variedad.

Para el modelamiento matemático por el modelo de la ley de Fourier, el valor de L , que es la media espesura en la transferencia de calor se consideró la mitad del valor del diámetro c , siendo $0,0037\text{ m}$ o $3,65\text{ mm}$.

En la Figura 2, se muestra los puntos experimentales de las temperaturas del horno y del centro geométrico del grano en los ensayos con 200 g de cacao desde el inicio del experimento obtenidos por sensores tipo K.

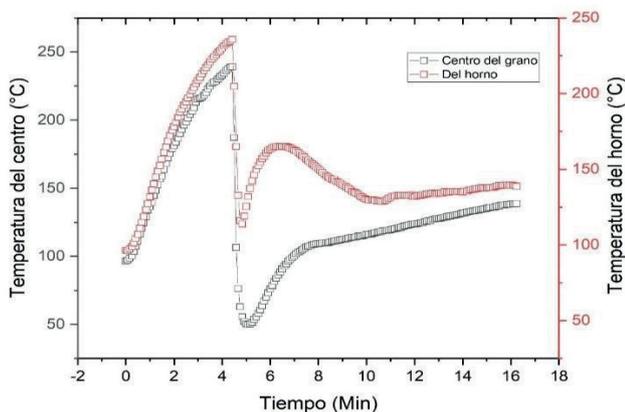


Figura 2. Temperaturas obtenidas por los sensores tipo K del centro geométrico del grano de cacao y del horno durante el proceso de tostado.

En la Figura 2, se observa el inicio del calentamiento del horno con los dos sensores sin los granos de cacao hasta un poco más de 4 min. El sensor para el control de la temperatura del grano estuvo más alejado de las resistencias eléctricas, por lo que al inicio hay una diferencia. Entre 4 y 5 min de calentamiento los sensores mostraron valores próximos de $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, momento en el cual se abrió la puerta, se colocó la bandeja con los granos de cacao, se introdujo el sensor en el grano perforado y se cerró la puerta. Se observa que al cerrar la puerta el sensor de control de la temperatura del horno muestra un incremento de la temperatura con mayor velocidad que la temperatura del sensor inserido en el centro del grano. La temperatura del horno cae al abrir la puerta para colocar el producto, es por el ingreso de aire frío y salida de aire caliente. En el incremento de temperatura del grano, se observa una fase de homogenización a las nuevas condiciones de temperatura. Luego se observa una curva típica de transferencia de calor en estado transitorio. Al contrario, la temperatura del aire se incrementa durante 1 minuto y cae ligeramente por la absorción de calor por los granos. Comportamiento semejante a la temperatura de los granos fue observada durante el tostado de granos de café en tostador artesanal israelí (Kwok et al., 2020).

En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la temperatura del horno a 5 cm de los granos para el tostado de 100 y 200 g de cacao en 4 repeticiones.

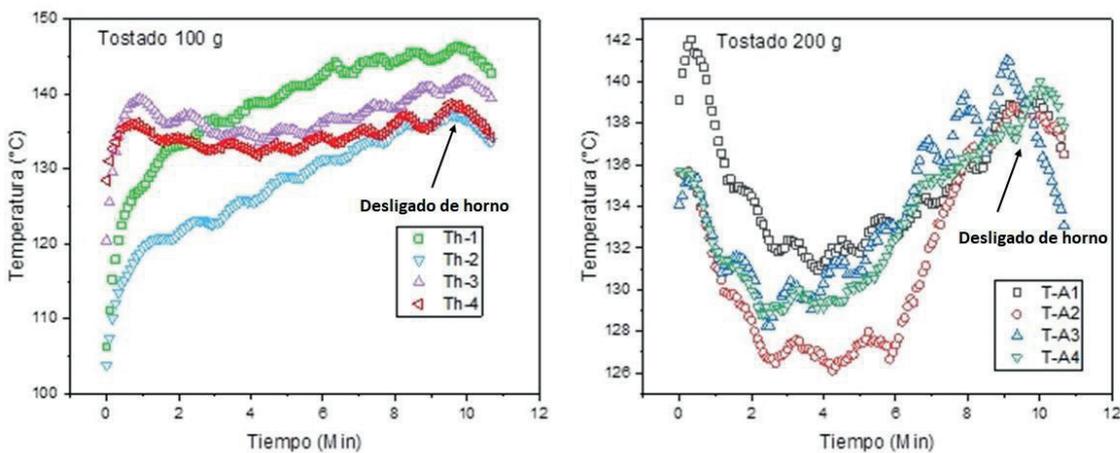


Figura 3. Temperaturas del horno (Th y T-A) a 5 cm de los granos mediante sensores tipo K durante el tostado de 100 y 200 g de cacao en 4 repeticiones.

Por los datos de la Figura 3, se observa que, para el tostado de 100 g, la temperatura de los sensores en dos repeticiones aumenta exponencialmente, pero en las otras 2 repeticiones la temperatura cae ligeramente para continuar subiendo. La flecha en la Figura 3 muestra aproximadamente el momento del desligado del horno. La caída de la temperatura a partir de ese momento es evidente. Se observa que, en el tostado de 200 g de cacao, la temperatura del horno a 5 cm de los granos cae considerablemente entre 7 a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 2 minutos, manteniendo esa temperatura entre 3 a 4 minutos para luego subir a más de $135\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al parecer,

esta caída es una muestra de la absorción de calor por los 200 gramos de cacao por el mecanismo de radiación. Por otro lado, al desligar el horno se muestra la caída de la temperatura del horno, pero la temperatura del centro sigue en aumento. Esto confirma que la velocidad de enfriamiento del aire es superior al grano de cacao y que el centro del grano sigue bajo un gradiente de temperatura.

Mayor masa durante el tostado, mayor fluctuación de la temperatura del aire del horno. Por lo visto, en la Figura 3, las muestras de cacao absorben calor del aire del horno

haciendo que su temperatura disminuya. La velocidad de absorción de calor por los granos es mayor a la velocidad de calentamiento por las resistencias del horno. La forma de ondas en el incremento de las temperaturas indica que se generan movimiento de aire caliente y frío alrededor del sensor. También puede ser entendido que las oscilaciones de temperatura se deben a la evaporación de agua de los granos y consecuente absorción de calor latente de evaporación. A este movimiento imperceptible se le denomina convección natural. Eso es más intenso durante el tostado de 200 g de cacao. Resultados semejantes fueron observados en el

control de la temperatura del horno mediante termopares en la cocción de carne (Isleroglu & Kaymak-ertekin, 2016).

Para el análisis de la transferencia de calor durante el tostado se seleccionó los datos de temperatura al inicio del tostado, luego de cerrar la puerta del horno. Los datos promedio obtenidos de 4 repeticiones en el tostado de 100 y 200 g de cacao, fueron ajustados a los 6 modelos matemáticos. En la Figura 4 son mostrados los datos experimentales y los ajustados por el modelo de Sistema Concentrado (Ec. 3).

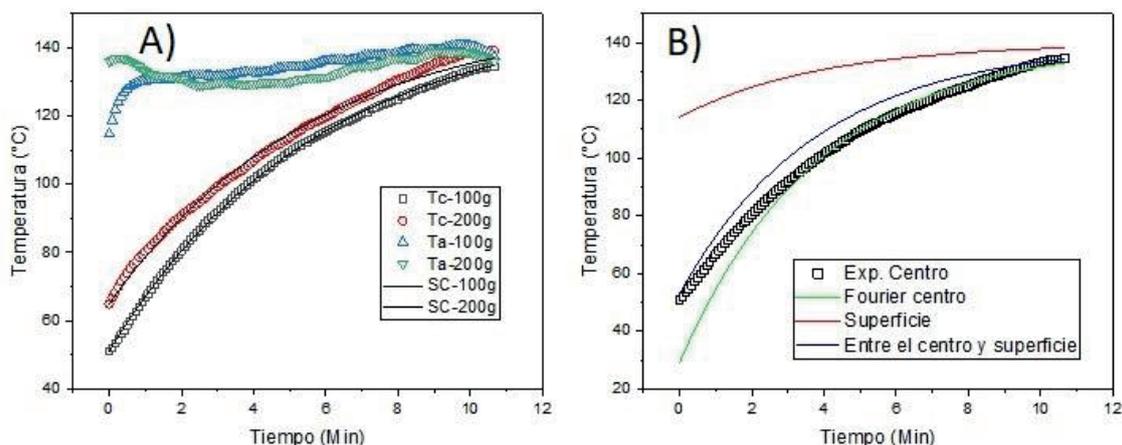


Figura 4. Datos experimentales: A) Tostado de 100g, 200 g y modelo de sistema concentrado y B) Datos ajustados por los modelos matemáticos (Ec. 3 y 4) de la ley de Fourier para las temperaturas del centro, entre el centro y la superficie y la superficie de los granos durante el proceso de tostado de 100 g en horno eléctrico convencional.

Por los datos experimentales de la Figura 4-A, la curva de calentamiento de 100 g es más curvada que el calentamiento de 200 g de cacao, pero las temperaturas son menores que en el tostado de 200 g. Resultados semejantes fueron obtenidos con el uso de sensores de temperatura en el tostado de café, en la cocción de carne de pollo en horno eléctrico (Rabeler & Feyissa, 2018). En la cocción de carne de pollo, las temperaturas del horno fueron de 170 y 230 °C. Al parecer, la transferencia de calor por radiación, no considerado en esta investigación, tiene efectos directos en la mayor temperatura de los granos. Los 200 g de cacao tiene mayor área superficial y a mayor área, mayor transferencia de calor principalmente por radiación.

En la Figura 4-B, la línea roja muestra el pronóstico de la temperatura de la superficie de los granos (Ec. 6), siendo que al final del tostado la diferencia del centro y la superficie fue de 3,66°C, mientras que la temperatura de la mitad del espesor del grano prácticamente es la misma que la temperatura del centro. Los resultados para el tostado de 200 g fueron semejantes.

En la Tabla 2 se muestran las constantes de los modelos ajustados con sus respectivos coeficientes R^2 , MRSE y MA%E.

Tabla 2. Constantes de los modelos matemáticos con sus respectivas medidas de error del tostado de 100 y 200 g de cacao.

Modelos	Constantes				Medidas de error		
	h, W/m ² s				R ²	MRSE (°C)	MA%E (%)
Sistemas concentrados							
100 g	5,78±0,75 ^A	--	--	--	1,000	0,425	0,369
200 g	5,81±0,33 ^A	--	--	--	0,996	1,519	1,107
2ª Ley de Fourier	α, m²/s (x10⁻⁸)				R²	MRSE	MA%E
100 g	3,24 ^A	--	--	--	0,991	6,103	5,014
200 g	3,58 ^A	--	--	--	0,964	5,795	4,344
Page	k₁	n			R²	MRSE	MA%E
100 g	0,0022	1,0811	--	--	0,999	1,000	0,513
200 g	0,0014	1,1804	--	--	0,987	2,755	1,976
Weibull	K₁	n			R²	MRSE	MA%E
100 g	281,3388	1,0810	--	--	0,951	1,001	0,512
200 g	263,8486	1,1801	--	--	0,966	5,840	8,843
Midilli	A	k	n	b	R²	MRSE	MA%E
100 g	0,9968	0,0022	1,0856	0	0,999	0,990	0,518
200 g	0,9970	0,0024	1,0869	0,00000001	0,986	3,007	1,953
Peleg	k₁	k₂			R²	MRSE	MA%E
100 g	3,1490	0,0069	--	--	1,000	0,620	0,549
200 g	4,0400	0,0069	--	--	0,999	0,820	0,605

Letras iguales del superíndice muestran que no hay diferencia significativa.

Por los datos de la Tabla 2, e coeficiente convectivo de transferencia de calor, h y la difusividad térmica (α) de los granos de cacao Chuncho no tuvieron diferencia significativa. Es decir, en el tostado de 100 y 200 g de cacao la transferencia de calor es muy parecida. Pueden utilizarse masas de granos entre 100 y 200 g durante el tostado y obtener resultados satisfactorios. El h fue de 5,81 W/m² °C para ambos grupos de tostado. Este valor correspondería a un proceso de transferencia de calor por convección natural. Durante la cocción de carne en forma de cilindro por convección natural determinaron un valor de 3,539 W/m² °C (Ahmad et al., 2015). La difusividad térmica (α) de los granos de cacao secos en secador solar fue en el orden de 10⁻⁸ m²/s (Koua et al., 2019), siendo estos valores inéditos para este tipo de granos. En simulaciones de tostado de café utilizaron valores de α entre 5 a 9x10⁻⁵ m²/s (Fabbri et al., 2011). Granos de cañihua y quinua con 10% de contenido de agua tuvieron α en el orden de 10⁻⁸ m²/s (Huamán Castilla et al., 2016). Las constantes de los modelos empíricos también son semejantes para ambos grupos de tostado. Por los resultados obtenidos, el uso de sensores de temperatura, a pesar que el horno eléctrico convencional no es diseñado para investigación, ofrece resultados que pueden ayudar a los pequeños, medianos y grandes productores de chocolates a controlar sus procesos de tostado sin comprometer la calidad de cacao debido al incremento excesivo de temperatura.

Todos los modelos matemáticos ajustaron bien a los datos experimentales. Como mencionado en el párrafo anterior, el modelo de Sistema Concentrado y el de la Ley de Fourier permitieron determinar dos propiedades térmicas (h y α). Las constantes de los modelos empíricos, Page, Weibull,

Midilli y Peleg, permiten de forma simple pronosticar las temperaturas del grano de cacao en función del tiempo durante el tostado en horno eléctrico convencional. Las constantes de los modelos empíricos generalmente aumentan a mayor masa en el tostado. Resultados semejantes fueron obtenidos con modelos empíricos en el tostado de cacao (Ariana et al., 2019). Al usar las constantes de los modelos empíricos en el tostado se debe considerar el tipo del horno utilizado en esta investigación, pues hornos diferentes pueden dar otros resultados.

Con respecto a las medidas de error en el uso de los modelos matemáticos. El R² varió de 0,95 a próximo de 1, siendo este resultado muy bueno. La MRSE entre los datos de temperatura observados y pronosticados oscilaron entre 0,425 y 6,347 °C para los procesos de tostado de 100 y 200 g de cacao. La MA%E en todos los modelos es menor a 10%. El modelo que más ajusta es el de sistema concentrado con un valor de 0.369%. En general todos los modelos tienen buenos valores de ajuste.

Conclusiones

Las temperaturas del centro geométrico de granos de cacao y del aire a 5 cm de los mismos, fueron determinadas mediante sensores tipo K. Las temperaturas de los granos presentaron formas típicas de la transferencia de calor en estado transitorio.

Los datos experimentales se ajustan muy bien a los 6 modelos matemáticos, permitiendo conocer el coeficiente convectivo de transferencia de calor, la difusividad térmica y las constantes de los modelos empíricos. Los modelos y sus

constantes permitirán predecir los tiempos de tostado de 100 a 200 g de cacao Chunchu en horno eléctrico convencional. El mejor modelo matemático que puede ser utilizado es el de Peleg.

El uso de sensores puede ser una alternativa económica de controlar la temperatura de los granos durante el tostado y de acuerdo al tipo de horno tostador a utilizar. Experimentos previos ser realizados para cada tipo de horno siguiendo la metodología utilizada en esta investigación. De esta forma los pequeños empresarios podrán mejorar la calidad de los derivados de cacao que los mismos fabrican.

Agradecimientos

A Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba y la vicepresidencia de investigación por el financiamiento del proyecto de investigación (Resolución N° 127-2018-CO-UNIQU).

Referencias

- Ahmad, S., Khan, M. A., & Kamil, M. (2015). Mathematical modeling of meat cylinder cooking. *LWT - Food Science and Technology*, 60(2), 678–683. <https://www.scopus-com.scopeesprx.elsevier.com/record/display.uri?origin=recordpage&zone=relatedDocuments&eid=2-s2.0-84922324178&citeCnt=26&noHighlight=false&sort=plf-f&src=s&st1=Prediction+of+cooking+times+and+weight+losses+during+meat+roasting&st2=&sid=>
- Ariana, L., Concepci, I., Mercedes, L., Barajas-fern, J., Joaqui, F., & Garc, P. (2019). Cocoa Bean Roasting. *Processes*, 7, 770. <https://doi.org/10.3390/pr7100770>
- Bart-Plange, a. (2012). Effect of Moisture, Bulk Density and Temperature on Thermal Conductivity of Ground Cocoa Beans and Ground Sheanut Kernels. *Global Journal of Science Frontier Research*, 7(8), 1–5. <http://www.journalofagriculture.org/index.php/GJSFR/article/view/32>
- Bastos, V. S., Santos, F. S., Gomes, L. P., Leite, M. O., Flosi, V. M., & Del, E. M. (2018). Analysis of the cocobiota and metabolites of *Moniliophthora perniciosa*-resistant *Theobroma cacao* beans during spontaneous fermentation in southern Brazil. *J Sci Food Agric*, 98(2018), 4963–4970. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9029>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor e masa. Fundamentos y aplicaciones* (McGraw-Hill (ed.); 4a ed.).
- Ciou, J. Y., Chen, H. C., Chen, C. W., & Yang, K. M. (2021). Relationship between antioxidant components and oxidative stability of peanut oils as affected by roasting temperatures. *Agriculture (Switzerland)*, 11(4), 1–11. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040300>
- Dash, K. K., Sharma, M., & Tiwari, A. (2022). Heat and mass transfer modeling and quality changes during deep fat frying: A comprehensive review. *Journal of Food Process Engineering*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13999>
- Dhalsamant, K., Tripathy, P. P., & Shrivastava, S. L. (2018). Heat transfer analysis during mixed-mode solar drying of potato cylinders incorporating shrinkage: Numerical simulation and experimental validation. *Food and Bioproducts Processing*, 109, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.03.005>
- Edem, J., Hinneh, M., Walle, D. Van De, Ohene, E., Boeckx, P., & Dewettinck, K. (2016). Factors in influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile — A review. *Food Research International Journal*, 82, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.012>
- Eskes, A., Rodriguez, C. A. C., Cruz Condori, D., Seguíne, E., & Garcia Carrion, Luis Lachenaud, P. (2018). Large genetic diversity for fine-flavor traits unveiled in cacao (*Theobroma cacao* L.) with special attention to the native Chunchu variety in Cusco, Peru. *AgroTropica*, 30(3), 157–174. <https://doi.org/https://doi.org/10.21757/0103-3816.2018v30np157-174>
- Fabbri, A., Cevoli, C., Alessandrini, L., & Romani, S. (2011). Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process. *Journal of Food Engineering*, 105(2), 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.02.030>
- Fernández-Romero, E., Chavez-Quintana, S. G., Siche, R., Castro-Alayo, E. M., & Cardenas-Toro, F. P. (2020). The kinetics of total phenolic content and monomeric Flavan-3-ols during the roasting process of Criollo Cocoa. *Antioxidants*, 9(2), 7–10. <https://doi.org/10.3390/antiox9020146>
- García Paternina, M., Alvis Bermudez, A., & García Mogollon, C. (2015). Modelado de la cinética de secado de mango pre-tratadas con deshidratación osmótica y microondas. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(2), 22. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(13\)22-29](https://doi.org/10.18684/bsaa(13)22-29)

- Gea Galluzzi, J. van E. E. T. M. van Z. J. L. T. H. (2012). Present Spatial Diversity Patterns of *Theobroma cacao* L. in the Neotropics Reflect Genetic Differentiation in Pleistocene Refugia Followed by Human-Influenced Dispersal. *Plos One*, 7(10), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047676>
- Górecki, M., & Hallmann, E. (2020). The antioxidant content of coffee and its in vitro activity as an effect of its production method and roasting and brewing time. *Antioxidants*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/antiox9040308>
- Hong, S. J., Cho, J. J., Boo, C. G., Youn, M. Y., Lee, S. M., & Shin, E. C. (2020). Comparison of physicochemical and sensory properties of bean sprout and peanut sprout extracts, subsequent to roasting. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 49(4), 356–369. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2020.49.4.356>
- Huamán Castilla, N. L., Yupanqui, G., Allcca, E., & Allcca, G. (2016). Efecto del contenido de humedad y temperatura sobre la difusividad térmica en granos andinos. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 82(3), 259–271. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v82i3.56>
- Isleroğlu, H., & Kaymak-ertekin, F. (2016). Modelling of heat and mass transfer during cooking in steam-assisted hybrid oven. *Journal of Food Engineering*, 181, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.027>
- Kadow, D., Niemenak, N., Rohn, S., & Lieberei, R. (2015). Fermentation-like incubation of cocoa seeds (*Theobroma cacao* L.) e Reconstruction and guidance of the fermentation process. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 357–361.
- Klinbun, W., & Rattanadecho, P. (2019). Effects of power input and food aspect ratio on microwave thawing process of frozen food in commercial oven. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 53(4), 225–242. <https://doi.org/10.1080/08327823.2019.1677430>
- Kondjoyan, A., Ouilic, S., Portanguen, S., & Gros, J. (2013). Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. *MESCI*, 95(2), 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.061>
- Koua, B. K., Koffi, P. M. E., & Gbaha, P. (2019). Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(1), 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.01.002>
- Krysiak, W. (2011). Effects of convective and microwave roasting on the physicochemical properties of cocoa beans and cocoa butter extracted from this material. *Grasas y Aceites*, 62(4), 467–478. <https://doi.org/10.3989/gya.114910>
- Kwok, R., Lee Wee Ting, K., Schwarz, S., Claassen, L., & Lachenmeier, D. W. (2020). Current Challenges of Cold Brew Coffee—Roasting, Extraction, Flavor Profile, Contamination, and Food Safety. *Challenges*, 11(2), 26. <https://doi.org/10.3390/challe11020026>
- Mejía, A., Meza, G., Espichán, F., Mogrovejo, J., & Rojas, R. (2021). Chemical and sensory profiles of peruvian native cocoas and chocolates from the Bagua and Quillabamba regions. *Food Science and Technology (Brazil)*, 41(December), 576–582. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13999>
- Mohite, A. M., Sharma, N., & Mishra, A. (2019). Influence of different moisture content on engineering properties of tamarind seeds. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21(1), 220–224. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5226>
- Münchow, M., Alstrup, J., Steen, I., & Giacalone, D. (2020). Roasting conditions and coffee flavor: A multi-study empirical investigation. *Beverages*, 6(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/beverages6020029>
- Nieves-Orduña, H. E., Müller, M., Krutovsky, K. V., & Gailing, O. (2021). Geographic patterns of genetic variation among cacao (*Theobroma cacao* L.) populations based on chloroplast markers. *Diversity*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/d13060249>
- Oliveira, M. E. de, Oliveira, R. L. Z. de, Souza, M. F. L. Z. de, Harada, E. S., & Tech, A. R. B. (2018a). Desenvolvimento de sensores para monitoramento de ambiente aviário com ênfase em controle térmico. *Computers and Industrial Engineering*, 12(3), 234–240.
- Oliveira, M. E. de, Oliveira, R. L. Z. de, Souza, M. F. L. Z. de, Harada, E. S., & Tech, A. R. B. (2018b). DESENVOLVIMENTO DE SENSORES PARA MONITORAMENTO DE AMBIENTE AVIÁRIO COM ÊNFASE EM CONTROLE TÉRMICO. *Computers and Industrial Engineering*, 12(3), 234–240.

- Quispe, M., & Calderón, J. (2016). Uso de sensores industriales en la preparación de alimentos. *Campus*, 21(21), 81–89. <https://doi.org/10.24265/campus.2016.v21n21.08>
- Rabeler, F., & Feyissa, A. H. (2018). Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven. *Journal of Food Engineering*, 237, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.021>
- Ryu, J. Y., Choi, Y., Hong, K. H., Chung, Y. S., & Cho, S. K. (2020). Effect of roasting and brewing on the antioxidant and antiproliferative activities of tartary buckwheat. *Foods*, 9(9), 1–10. <https://doi.org/10.3390/foods9091331>