

ANÁLISIS DEL EQUILIBRIO TÉRMICO E HIGROSCÓPICO DEL AIRE EN CONTACTO CON LOS GRANOS DE CAFÉ RECIÉN TOSTADOS

PAULA AGÜERO-DELGADO¹, DANIEL ALPÍZAR-SEGURA², GUSTAVO GUTIÉRREZ-VÁSQUEZ³, NICOLE SALAZAR-MORA⁴, GUILLERMO A. VARGAS-ELÍAS⁵

¹ Estudiante, Escuela de Ing. Biosistemas, Universidad de Costa Rica (U.C.R.), paula.aguero@ucr.ac.cr, San José-CR

² Estudiante, Escuela de Ing. Biosistemas. U.C.R.

³ Estudiante, Escuela de Ing. Biosistemas. U.C.R.

⁴ Estudiante, Escuela de Ing. Biosistemas, U.C.R.

⁵ D. Sc., Ing. Agrícola. Profesor. U.C.R.

Apresentado no
LIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2024
6 a 8 de agosto de 2024 – Natal - RN, Brasil

RESUMEN: Los granos de café recién tostados se desgasifican e inician una estabilización interna en relación con el dióxido de carbono, la temperatura y el contenido de humedad; indirectamente el aire en contacto con los granos también se estabiliza cuando las condiciones son herméticas. El objetivo de esta investigación fue ajustar el perfil de temperatura y humedad relativa del aire en contacto con los granos de café durante el enfriamiento en cámara fría. La temperatura inicial de los granos fue de 30 ± 2 °C. Se utilizaron dos réplicas, las cuales contenían 224,88 y 294,70 g en dos recipientes herméticos. Se colocaron dos registradores de temperatura y humedad relativa del aire en contacto con los granos. Los valores se ajustaron adecuadamente al utilizar la ecuación exponencial de tres parámetros. Además, se determinó que el equilibrio de la humedad se alcanza en 1,0 h y la temperatura en 4,5 h con un coeficiente de determinación mayor a 0,95.

PALABRAS CLAVE: cinética, *coffea arabica*, equilibrio.

COMPARISON BETWEEN THERMAL AND HYGROSCOPIC EQUILIBRIUM OF AIR IN FRESHLY ROASTED COFFEE BEANS

ABSTRACT: Freshly roasted coffee beans are degassed and initiate internal stabilization in relation to carbon dioxide, temperature and moisture content; indirectly the air in contact with the beans is also stabilized when conditions are airtight. This research's objective is to adjust the temperature and humidity profile of the air in contact with the coffee beans during cooling in a refrigerator. The temperature of the beans was 30 ± 2 °C and two replicates were used, which contained 224.88 g and 294.70 g in two different sized containers. The data were properly fitted by using the three-parameter exponential equation. In addition, moisture equilibrium was determined to be reached in an hour and temperature equilibrium in four and a half hours with a coefficient of determination greater than 0.95.

KEYWORDS: *coffea arábica*, equilibrium, kinetics.

INTRODUCCIÓN: El enfriamiento de los granos del café es un proceso esencial, ya que permite detener las reacciones químicas y evita un tueste excesivo. Este enfriamiento debe ocurrir de forma inmediata para evitar la carbonización del producto y donde se fuerza el paso del aire a temperatura ambiente a través de la superficie en los granos (Ledezma et al., 2017). El aire en contacto con los granos inicia un equilibrio entre la temperatura del medio y los

granos; así como el equilibrio higroscópico mediante la lectura de la humedad relativa del aire, denominado como equilibrio semiestático (JIMENEZ; VALVERDE; 1999). Los granos tostados presentaron un contenido de humedad bajo y deshidrató el aire en contacto con el café, por lo que la cinética del equilibrio en la humedad relativa se representó adecuadamente con el modelo de Page para su tendencia exponencial decreciente, estabilizándose en 8 h para granos con varios niveles de tueste (VARGAS-ELÍAS et al., 2023). El objetivo de esta investigación fue ajustar el perfil de temperatura y el de humedad relativa del aire en contacto con los granos de café tostados durante el enfriamiento en cámara fría.

MATERIALES Y MÉTODOS: El estudio para obtener el equilibrio térmico e higroscópico de granos de café por 24 horas se realizó con granos de café previamente tostados, la temperatura de los granos al ingresar en los recipientes fue de 30 ± 2 °C. Se utilizaron dos réplicas, las cuales contenían 224,88 y 294,70 g en dos recipientes herméticos. Para obtener las curvas de equilibrio de los granos de café en una refrigeradora, se utilizó un almacenador (datalogger HOBBO) de la marca Onset para el registro de la temperatura (T) y humedad relativa (HR) dentro del recipiente que contenía los granos. La humedad relativa inicial fue 75% y la temperatura de 25 ± 1 °C. La incertidumbre asociada al instrumento fue de 0,5°C para la temperatura y 3,5 % para la humedad relativa. Se utilizó el software SigmaPlot15 para el ajuste de cuatro modelos matemáticos a los valores obtenidos de temperatura y la humedad relativa del aire, las ecuaciones utilizadas fueron el modelo de Page desarrollado (Ecuación 1), el exponencial decreciente de tres parámetros (Ecuación 2), el logarítmico de 2do orden (Ecuación 3) y el modelo hiperbólico decreciente de tres parámetros (Ecuación 4). Para determinar el modelo de mejor ajuste se utilizó el máximo coeficiente de determinación (R^2), y el menor error estándar de estimación (ESS). Se analizó individualmente cada repetición y luego se ajustó de forma general todos los datos para ambas variables. Se calculó la razón de enfriamiento y de humedad relativa (RY) utilizando la Ecuación 5.

$$Y = Y_e + (Y_a - Y_e) * (\exp^{-k * (t^n)}) \quad (1)$$

$$Y = Y_0 + a * (\exp^{-k * (t)}) \quad (2)$$

$$Y = Y_0 + a * \ln(\text{abs}(t)) + b * \ln(\text{abs}(t))^2 \quad (3)$$

$$Y = Y_0 + (a * b) / (b + t * a) \quad (4)$$

$$RY = (Y - Y_a) / (Y_a - Y_e) \quad (5)$$

Donde:

Y: temperatura (°C) y humedad relativa (%)

Y_a : Condición inicial (°C, %)

Y_e : Condición de equilibrio (°C, %)

t: tiempo (h)

k, Y_0 , a, b, n: coeficientes para cada modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN: Las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire en contacto con los granos de café tostados se estabilizan en tiempos diferentes como se observa en la Figura 1. La humedad relativa presentó una tendencia decreciente hasta estabilizarse (Figura 1b), mientras que se observa que el aire fue calentado por los granos, que fueron retirados del enfriador cuando aún estaban calientes (Figura 1a).

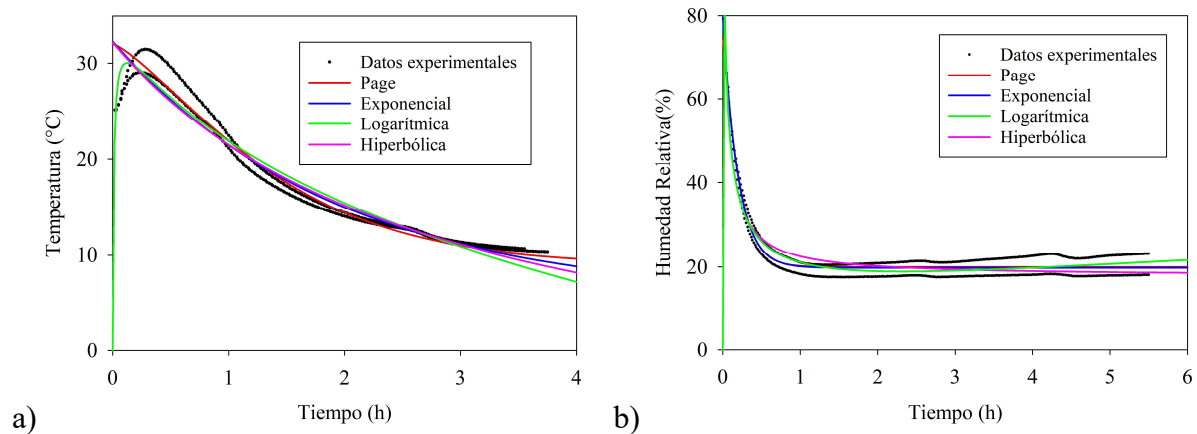


FIGURA 1. Condiciones de equilibrio del aire en la temperatura (a) y humedad relativa (b)

Los cuatro modelos aplicados representaron adecuadamente la tendencia de los valores en un porcentaje mayor al 94,6 %, según el coeficiente de determinación (R^2). El modelo exponencial de tres parámetros fue el mejor ajuste con coeficiente de determinación de 0,9634 y un bajo error de estimación de 1,74, como se observa en la Tabla 1. Como se observa, la temperatura se ajusta mejor en el modelo de Page desarrollado, sin embargo, se selecciona el modelo exponencial de tres parámetros para el ajuste de las dos variables. Esto se debe a que la diferencia entre variables en este modelo es inferior a 0,1, mientras que en el modelo de Page supera este valor.

TABLA 1. Resumen de resultados de los modelos aplicados a la cinética de la temperatura y humedad relativa del aire en contacto con los granos de café tostados.

Variable	Modelo	Constantes	R^2 (dec)	R^2 adj (dec)	ESS (%)
Temperatura (°C)	Hiperbólica decreciente 3 parámetros	a = 40,9169 k = 2,8190 y0 = -8,7298	0,9465	0,9462	1,5143
	Page desarrollada	k = 0,5792 n = 1,3143 y0 = 21,8558	0,9631	0,9630	1,2564
	Logarítmica 2do orden	a = -7,9111 k = -1,1927 y0 = 5,4298	0,9582	0,9580	1,2281
	Exponencial 3 parámetros	a = 26,8379 k = 0,5157	0,9514	0,9512	1,4433
Humedad Relativa (%)	Hiperbólica decreciente 3 parámetros	a = 82,5448 k = 0,0705 y0 = 16,4841	0,9315	0,9311	2,3792
	Page desarrollada	k = 4,1209 n = 0,9626 y0 = 20,9711	0,9413	0,9411	2,1999
	Logarítmica 2do orden	a = -4,9253 k = 3,1708 y0 = 19,5267	0,9355	0,9352	2,3083
	Exponencial 3 parámetros	a = 59,8130 k = 5,0978	0,9634	0,9632	1,7382

La razón entre las constantes de equilibrio ($k_{HR} / k_T = 5,0978/0,5157$) del modelo seleccionado indica que la humedad relativa se equilibra 10 veces más rápido que la temperatura en el equilibrio semiestático con granos de café. Esta tendencia se observa en la Figura 2a, en donde la humedad relativa se estabiliza antes de la primera hora, mientras la temperatura se mantiene

constante hasta las 4,5 horas. La razón de la humedad relativa y de la temperatura permite analizar dos propiedades diferentes del aire en forma adimensional (Figura 2.b). Los resultados obtenidos en la presente investigación presentan valores similares al estudio realizado por Vargas et al. (2023) en el intervalo entre el 17 y el 23 %, en donde la humedad relativa se estabilizó en menos de 8 horas con el doble de la masa.

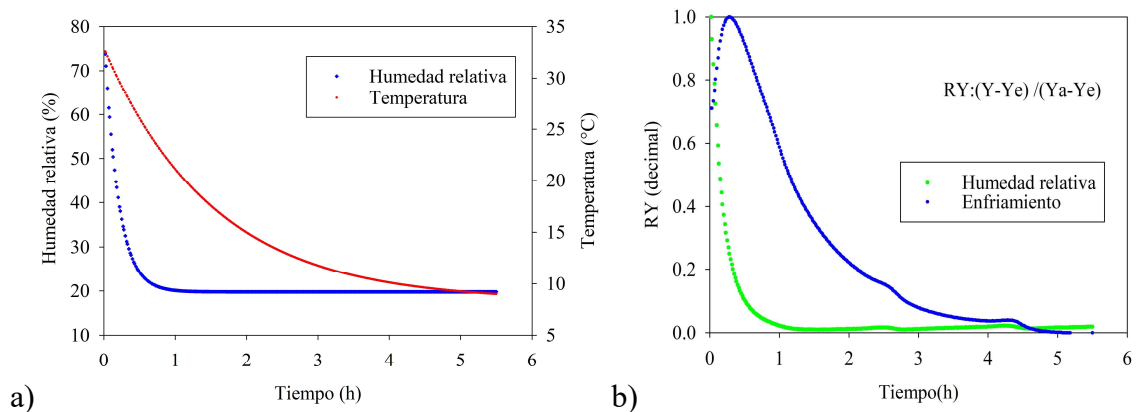


FIGURA 2. Análisis general del equilibrio térmico e higroscópico del aire en contacto con granos de café recién tostados con el modelo exponencial de tres parámetros (a) y las razones de enfriamiento y humedad relativa (b).

CONCLUSIONES: El modelo matemático exponencial y decreciente de tres términos ajustó adecuadamente el equilibrio semiestático del aire en contacto con los granos de café tostado. El tiempo necesario de equilibrio para la temperatura y la humedad relativa del aire fue de 4,5 h y 1 h, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS: A la empresa Coopedota por su apoyo en la elección del café.

REFERENCIAS:

- ABARCA, R. **Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional**. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Agrícola. Universidad de Costa Rica. 2017. Disponible en: < <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75352> > Accedido el: 13 de abril de 2024.
- BOGANTES-LEDEZMA, D., VARGAS-ELÍAS, G. A., & ABARCA-MORA, R. (2017). Infrared sensor used for the capture of data from cooling process in roasted coffee. 2017 IEEE Central America and Panama Student Conference, **CONESCAPAN 2017**, 2018. Disponible en: <<https://doi.org/10.1109/CONESCAPAN.2017.8277595>> Accedido el: 14 de abril de 2024.
- JIMÉNEZ, R.; VALVERDE, R. Relaciones de humedad de equilibrio para café (*Coffea arabica*) de primera calidad en Costa Rica. **Revista Tecnología En Marcha**, v. 13, n. 2, p. 61–69, 1999. Disponible en: <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4144> Accedido el: 14 de abril de 2024.
- SANDÍ, A. **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**. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería de Biosistemas. Universidad de Costa Rica. 2023.
- VARGAS-ELÍAS, G. A., PÉREZ-FERNÁNDEZ, A., VARGAS-GÓMEZ, D., BADILLA-MENA, B., & JIMÉNEZ-REY, F. Modelagem matemática da umidade relativa do ar em contato com os grãos de café recém torrados. **Memorias de LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2023.