

Modelamiento matemático de la cinética de secado de café robusta (*Coffea canephora*)

Study of the drying kinetics of robusta coffee (*Coffea canephora*)

María Eugenia García ², Tania Moreta ¹; Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga ³, Juan Gaibor Chávez ^{1*}

¹ Carrera de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad Estatal de Bolívar – Ecuador, CP:020150, tanmoreta@mail.es.ueb.edu.ec, jgaibor@ueb.edu.ec

² Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador, me.garcia@uta.edu.ec

³ Carrera de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo – Ecuador, saguerrero@unach.edu.ec

*Autor por correspondencia, jgaibor@ueb.edu.ec Available from: <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2023.08.04.10>

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue modelar la cinética de secado del café robusta (*Coffea canephora*). Se realizó la recolección, recepción, despulpado, limpieza del grano, pesado y posterior se sometió al proceso de secado. El estudio se realizó en una estufa marca Memmert a 104 °C durante 24 horas, se tomaron tres muestras de similar tamaño (6,49 g; 8,57 g; 7,78 g) con una humedad inicial de 36,64 % y humedad final de 1,04 %; 0,92 %; 1,00 %. También se ocupó un secador vertical de bandejas a escala de laboratorio a temperatura de 73°C tomando lecturas del peso durante 24 horas, obteniendo la humedad de equilibrio a las 13 horas. Las variables que se midieron fueron: humedad en base seca, humedad en base húmeda, humedad total, humedad en equilibrio, flujo de calor, cantidad de calor, velocidad de secado. Se notó que la velocidad de secado a mayores temperaturas favorece a la transferencia de masa y energía. El modelo que tuvo mejor ajuste para ambos casos fue el de Henderson y Pabis con un coeficiente de determinación de 99,196 % a 104 °C y 99,561 % a 73 °C. Concluyendo que la temperatura tiene un efecto en la variación de humedad de la materia prima a diferentes tiempos.

Palabras clave: Cinética, café robusta, secado, humedad en equilibrio, modelamiento matemático.

ABSTRACT

The research aimed to model the drying kinetics of robusta coffee (*Coffea canephora*). The grain was collected, received, pulped, cleaned, weighed and subsequently subjected to the drying process. The study was carried out in a Memmert oven at 104 °C for 24 hours; three samples of similar size (6.49 g, 8.57 g, 7.78 g) were taken with an initial humidity of 36.64 % and final humidity of 1.04%; 0.92%; 1.00%. A laboratory-scale vertical tray dryer was also used at a temperature of 73°C, taking weight readings for 24 hours and obtaining equilibrium humidity at 13 hours. The measured variables were dry base humidity, wet base humidity, total humidity, equilibrium humidity, heat flow, amount of heat, and drying speed. It was noted that the drying speed at higher temperatures favors mass transfer and energy. The model best fit for both cases was that of Henderson and Pabis, with a coefficient of determination of 99.196% at 104 °C and 99.561% at 73 °C. They concluded that temperature affects the humidity variation of the raw material at different times.

Keywords: Kinetics, robust coffee, drying, moisture in equilibrium, mathematical modeling.

INTRODUCCIÓN

El café es una bebida popular por su sabor único, es cultivado ampliamente en regiones tropicales y subtropicales del mundo, en la actualidad el café *Coffea canephora* (robusta) y *Coffea arabica* (arábica) son las especies más conocidas en el mercado¹. El café (*Coffea canephora*) es constituida como una materia prima dentro del sector agroindustrial, debido a que se pueden obtener distintos productos como: licor, tinta, alcohol, alquitrán, cafeína, celulosa, jarabe, aceite, extracto y carbonato de potasio. El café robusto contiene carbohidratos (60 %), cafeína (1 - 2 %), azúcar reductor (1-0%), sacarosa (7-0%), pectina (2.0%), almidón (10.0%), pentano (5.0%), hemicelulosa (15.0%), celulosa entera (18.0%), lignina (2.0%), grasa (13.0%), proteína (13.0%), ácido tánico². Para ser procesado, se necesita una operación unitaria previa que es el secado; un método que se realiza para la conservación de alimentos, es decir que cumple la función de eliminar el contenido de agua de los productos. Hoy en día se pueden encontrar diferentes tipos de secado para el grano de café siendo el más utilizado el que consiste en colocar mantos directamente en el suelo, ya sea en la calzada o en pisos de cemento a expensas de sol y viento³. Para el proceso de secado es importante conocer los parámetros que intervienen en la operación y manejarla como tal para garantizar la conservación de las características organolépticas⁴. Este proceso tiene como finalidad la remoción de la humedad del grano mediante fenómenos de transferencia de masa y energía en forma simultánea⁵. De acuerdo a¹ el proceso de secado al sol o natural depende mucho del clima y tarda entre 3 a 4 semanas en alcanzar un contenido de humedad del 12 %, por ende, el tiempo de secado se puede acelerar utilizando secadores artificiales. El secado artificial utiliza condiciones controladas de temperatura y en algunos casos usa la convección forzada⁶, el secado en los granos de café se describe usando modelos matemáticos tales como Newton Lewis, Page, Henderson y Pabis que permiten predecir la cinética del proceso⁷, que se define como la “dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación en función del tiempo”⁸. En un ambiente controlado podemos establecer un modelo matemático que se ajuste a la cinética⁹, de esta manera garantizar la conservación nutricional del producto¹⁰, además de evitar el desperdicio de granos y optimizar el proceso¹¹. El objetivo de esta investigación fue estudiar la cinética de secado del café robusta (*Coffea canephora*), de esta manera direccionar a la optimización del tiempo y temperatura empleados en el proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo fue realizado en el laboratorio del Laguacoto II, perteneciente a la Universidad Estatal de Bolívar, la materia prima (café robusto) se recolectó manualmente en una finca cafetera del recinto Matilde Esther, perteneciente al cantón Bucay – Ecuador, se trabajó con 100% de café maduro, dado que¹² indican que encontraron mejores características organolépticas para la elaboración de café pasado. Como segundo paso, se pesaron 3kg de la materia, se procedió a despulpar las almendras y desechar aquellas que presentaron daño físico o mecánico, así se quedó con 400 g para la experimentación, la cual se trabajó por triplicado para posterior obtener un promedio. Luego, se determinó el contenido de humedad del grano fresco en una balanza analítica marca BOECO. Para el proceso de secado se manejaron las variables independientes de tiempo y temperatura y se midió la variable dependiente de contenido de humedad hasta obtener un peso constante de la materia prima. En la figura 1 se indica un diagrama del proceso, desde la entrada de la materia prima.

Cinética de secado

Para determinar la cinética de secado se trabajó por triplicado, a partir de café despulpado, el mismo que se depositó en bandejas de aluminio de 10 cm de radio, una estufa de laboratorio marca Memmert a 104 °C, las muestras presentaron una humedad inicial de 36,64 %, en cuanto al peso, presentaron 6,49 g; 8,57 g; 7,78 g. Las muestras fueron pesadas en intervalos de 1 hora durante 24 horas.

Para la construcción de curvas de secado, se graficó la humedad (MR) como variable dependiente, versus al tiempo como variable independiente¹³. Para modelar, se utilizaron los siguientes modelos Newton-Lewis, Page, Henderson y Pabis.

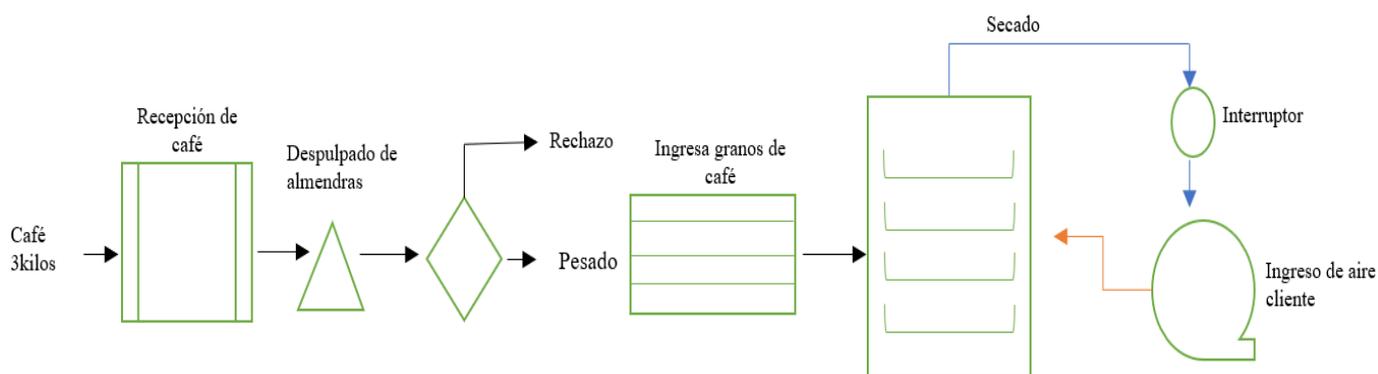


Figura. 1. Diagrama de proceso de secado de café robusto

Modelos matemáticos

La curva de secado obtenida experimentalmente se modela por los modelos matemáticos (1), (2), (3), de acuerdo al artículo “Dendrometric characterization of corn cane residues and drying models in natural conditions in Bolivar Province (Ecuador)”, según⁷, donde a , k , n son constantes, t es tiempo y MR relación de humedad adimensional.

$$\text{Modelo de Newton Lewis} \quad MR = e^{-k \cdot t} \quad (1)$$

$$\text{Modelo de Page} \quad MR = e^{-k \cdot t^n} \quad (2)$$

$$\text{Modelo de Henderson y Pabis} \quad MR = a \cdot e^{-k \cdot t^c} \quad (3)$$

Se determinó el contenido de humedad en base húmeda (ω)¹⁴, de las tres muestras de café robusta, en relación a masa de agua (m_{H_2O}) y masa inicial (m_0) de la materia, además el peso seco ($m_{\text{materia seca}}$) mediante las ecuaciones (4) y (5).

$$\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_0} \quad (4)$$

$$m_{\text{materia seca}} = m_{\text{materia húmeda}} \left(1 - \frac{\omega}{100}\right) \quad (5)$$

La razón de humedad (MR) durante el secado fue calculada mediante la ecuación (6)¹⁵, la cual sirve para realizar la cinética de secado donde ω_t es contenido de humedad en cualquier momento y ω_0 es humedad inicial.

$$MR = \frac{\omega_t - \omega_e}{\omega_0 - \omega_e} \quad (6)$$

Se calculó la humedad en equilibrio (ω_e) mediante la ecuación (7)¹⁶ que relaciona el peso de la masa cuando alcanza el punto de equilibrio (m_e) con base al peso de la masa seca (ms).

$$\omega_e = \frac{m_e - ms}{m_e} * 100 \quad (7)$$

La eficiencia del secador se determina de la siguiente manera:

$$n = \frac{(Mh - Ms) * hfg}{\frac{Q_u * Ac}{Ab}} \quad (8)$$

n : Eficiencia del secador (%); Mh : Masa de gramínea con humedad (kg); Ms : Masa total de gramínea seca (kg); hfg : Calor de vaporización del agua ($\frac{KJ}{kg}$); Q_u : Calor útil (kg); L_{camara} : Largo exterior de la cámara. (m); A_{camara} : Ancho exterior de la cámara (m); L : Largo de la bandeja (m); A : Ancho de la bandeja (m).

Para determinar el flujo de calor promedio (\dot{q}_{prom}) se ocupa la ecuación (9) donde relaciona el índice de transferencia de calor promedio (\dot{Q}_{prom}) con el área (A)¹⁷.

$$\dot{q}_{prom} = \frac{\dot{Q}_{prom}}{A} \quad (9)$$

Deshidratación

Se utilizó un secador a escala de laboratorio con una variación de temperatura entre 60 – 80 °C, con bandejas de forma rectangular de longitudes de 61 cm×78,5 cm×3,06 cm, apoyado en un sistema de convección forzada donde se calienta el aire por medio de un ventilador eléctrico con resistencias de 110 V y 4A. Para la lectura de la temperatura en el secador se utilizó un termómetro marca HANNA %, trabajando a una temperatura estable de 73°C. Cada hora se procedió a pesar la muestra hasta que llegaron a un peso constante; empezando con un peso inicial de 454,00 y una humedad inicial de 36,64%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de secado

Las tasas de reducción de humedad más significativas se manifestaron en el proceso inicial del secado. Posterior se evidenció una disminución de manera constante en el tiempo, considerando así que se llegó al equilibrio., como se ha demostrado en estudios similares donde se trabajaron con materias primas vegetales¹⁸.

El contenido de humedad de la materia prima café inicial fue de 36,64 % que se trabajó por triplicado, cada muestra finalizó con un contenido de humedad de 1,4%; 0,92%; 1%, después de ser secada a 104 °C en la estufa.

En la tabla 1 se muestran los resultados de la humedad en base seca, humedad en base húmeda, humedad total, humedad en equilibrio, materia seca, para las dos temperaturas empleadas en el estudio.

Variable	Valor a 104 °C	Valor a 73°C
Humedad en base seca	98,67 %	76,65 %
Humedad en base húmeda	53,01 %	56,61 %
Humedad total	97,31 %	95,91 %
Humedad en equilibrio	0,34 %	0,61 %
Materia Seca	3,58 g	

Tabla 1. Cinética de secado en la estufa 104 °C y deshidratador a 73°C

En la figura 2 y tabla 2 se pueden observar que el peso de la materia se vuelve constante a partir de la hora 13 para la temperatura de 104°C y a partir de la hora 19 para la temperatura de 73°C, pues se produjo una disminución en el tiempo de secado cuando la temperatura era mayor porque una temperatura de secado alta aumenta la energía cinética de una molécula de agua hasta que se libera de la fuerza cohesiva, tal como indican¹⁹.

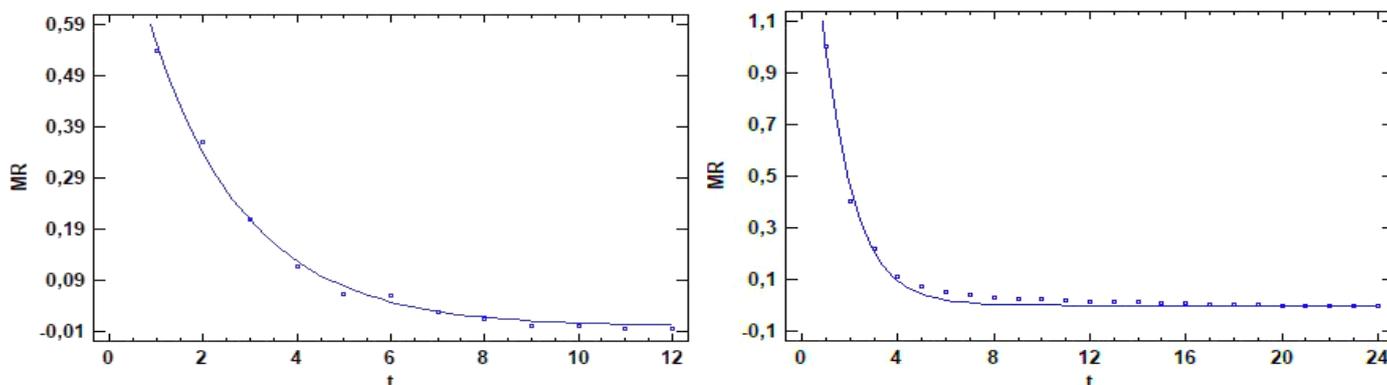


Figura 2. Cinética de secado a 104°C y 73°C, que se ajustan al modelo de Henderson y Pabis

Donde podemos apreciar que al iniciar el proceso de secado su velocidad es más elevada tendiendo a ser lineal, mientras que con el transcurso del tiempo su velocidad se va reduciendo considerablemente, cotejando con otros estudios de cinética de secado^{20, 21}.

Tiempo (h)	Peso (g) T=73°C	Peso (g) T =104°C
1	336,10	7,61
2	290,20	5,22
3	251,80	4,47
4	227,80	4,04
5	214,00	3,88
6	213,60	3,80
7	205,00	3,75
8	201,60	3,71
9	199,00	3,70
10	198,00	3,68
11	197,20	3,66
12	197,00	3,65
13	197,00	3,64
14	197,00	3,64
15	197,00	3,63
16	197,00	3,62
17	197,00	3,61
18	197,00	3,60
19	197,00	3, 58
20	197,00	3, 58
21	197,00	3, 58
22	197,00	3,58
23	197,00	3,58
24	197,00	3,58

Tabla 2. Peso de la materia prima transcurrido cada hora de pesado

T°C	Nombre del Modelo	Ecuación	Parámetros del modelo	Estadísticas
104 °C	Newton (Lewis)	$MR = e^{-k \cdot t}$	$k = 0,409$	$R^2 = 87,584 \%$
	Page	$MR = e^{-k \cdot t^n}$	$k = 0,146$ $n = 2,197$	$R^2 = 95,608 \%$
	Henderson y Pabis	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t}$	$k = 0,780$ $a = 2,149$	$R^2 = 99,196 \%$
73°C	Newton (Lewis)	$MR = e^{-k \cdot t}$	$k = 0,540$	$R^2 = 99,051 \%$
	Page	$MR = e^{-k \cdot t^n}$	$k = 0,580$ $n = 0,920$	$R^2 = 99,386 \%$
	Henderson y Pabis	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t}$	$k = 0,488$ $a = 0,896$	$R^2 = 99,561 \%$

Tabla 3. Ajuste a los Modelos Matemáticos

Modelo matemático

Utilizando los datos recopilados en nuestro experimento, se procedió a calcular los parámetros para ajustar a los modelos propuestos, así se identificó la ecuación apropiada que fuera capaz de describir y predecir de manera efectiva el comportamiento del secado del café a lo largo del proceso, el cual estaba siendo controlado en términos de temperatura.

La tabla 3 muestra los modelos matemáticos con los valores de los parámetros experimentales cuales fueron obtenidos a partir del software estadístico Statgraphics, donde se puede observar que tanto para para 104 °C como 73°C muestra los datos que los datos experimentales obtenidos que se ajustan a los criterios de aceptación de los coeficientes de R^2 para el modelo de Henderson y Pabis, al igual que^{22,23,24} quienes también consideran los modelos estudiados para la modelización . Con esto se desea brindar un estudio en el café ecuatoriano y optimizar el proceso de secado al ambiente que actualmente se realiza en las fincas cafeteras como el estudio de²⁵.

CONCLUSIONES

La temperatura y el tiempo ejercen un impacto directo en la reducción del contenido de humedad en las materias primas. Cuando las partículas absorben la energía necesaria para evaporar su contenido de agua, inicia un proceso en el que la velocidad de secado se modifica con el transcurso del tiempo. Esta velocidad de secado disminuye significativamente hasta que la humedad alcanza un valor constante en función del tiempo. El parámetro que mejor se ajusta a esta dinámica es el ratio de humedad (MR), que se define como la relación entre la humedad en un momento dado menos la humedad de equilibrio y la diferencia entre la humedad en el estado inicial y la humedad de equilibrio.

Las curvas de régimen de secado, que representan la velocidad de secado (expresada como la primera derivada dw/dt , muestran que al inicio del proceso se observa una disminución más marcada de la humedad, mientras que conforme se acerca al final, la pérdida de humedad se vuelve mínima, aproximándose a una recta constante. En este punto, se toma como referencia la humedad final del proceso.

En el contexto de la cinética de secado del café, se ha determinado que el modelo que mejor se ajusta a los datos obtenidos a dos temperaturas diferentes es el modelo Henderson y Pabis ($MR = [a \cdot e]^{-kt}$), con un coeficiente de determinación $[R]^2 = 99,196\%$ a $104\text{ }^\circ\text{C}$ y $[R]^2 = 99,561\%$ a $73\text{ }^\circ\text{C}$. Los resultados obtenidos mediante la aplicación de este modelo pueden ser de utilidad para prolongar la vida útil del producto o para su aplicación en operaciones unitarias subsiguientes, como es el caso del café seco y molido destinado a la preparación de café pasado.

Conflicts of Interest: Los autores declaran no tener conflicto de interés.

REFERENCIAS

1. Zhang, K., Cheng, J., Hong, Q., Dong, W., Chen, X., Wu, G., & Zhang, Z. Identificación de cambios en los compuestos volátiles de granos de café robusta durante el secado basado en análisis HS-SPME/GC-MS y E-nose con la ayuda de quimiometría. ELSEVIER,. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113317>. 2022. p161.
2. Beltran, C. Estudio del impacto de las propiedades funcionales del café arábica (*coffea arabica*) durante las etapas post cosecha para su industrialización. Universidad Técnica De Machala, Machala, El Oro, Ecuador:, agosto de 2022.
3. Prada, Á., Vela, C., Bardález, G., & Saavedra, J. Efectividad de un Proceso de Secado de Café usando Secadores Solares con Sistema de Flujo de Aire Continuo Impulsado por Energía Fotovoltaica, en la Región San Martín, Perú. Scielo, 30(6), 2. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600085>. 2019
4. Benítez, O., & Campo, D. Evaluación de la calidad el café tostado utilizando herramientas de procesamiento digital de imágenes. EBSCO, 2018. p 12.
5. Borja Velázquez, M. Principios del secado | | UPV. 2018. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=Lf4F7caSYrg>
6. Peña, M. P. Incidencia del secado artificial en las propiedades físicas y mecánicas de la madera de la especie forestal *Triplaris cumingiana* Fisch. Jipijapa, Manabí, Ecuador: Universidad Estatal del sur de Manabí. 2019.
7. Gaibor Chávez, J., Pérez Pacheco, S., Velazquez Martí, B., Nino Ruiz, Z., & Dominguez Narváez, V. Dendrometric characterization of corn cane residues and drying models in natural conditions in Bolivar Province. Renewable Energy. doi:doi:10.1016/j.renene.2015.09.009. 2016.
8. Quishpe, D. A. Determinación de la Cinética de Secado de una torta de lodo proveniente del tratamiento de agua de enjuague del proceso de Decapado. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador. 2018.
9. Flores, G. Determinación experimental de la cinética de secado de especias (*Allium schoenoprasum*, *Erygium foetidum* y *Mansoa alliacea* L.). Pastaza, Ecuador: Universidad Estatal Amazónica, 2019.
10. Flórez, F. Efecto del tiempo de fermentación sobre la calidad nutricional del ensilaje de pulpa de *Coffea arabica* L. Cienc. Tecnol. Agropecuaria, 3(21). doi:https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1423. 2020.
11. Carretero, A. Impactos sociales, económicos y medioambientales derivados de la pérdida y el desperdicio de alimentos. Przeglad Prawa Rolnego, 2018, 14. doi:10.14746/ppr.2018.23.2.9 . p23(2).
12. Bolívar Fabián Mendoza Marcillo, B. F. Influencia de la cosecha de café maduro y verde sobre la calidad física y organoléptica del café (*Coffea arábica* L.). Revista Agrosilvicultura y Medioambiente, 2023, p 14-25.
13. Camaño, J., Rivera, A., & Zapata, J. Efecto del espesor de película y de la ubicación de la muestra en un secador solar directo, sobre la cinética de secado de ensilado de vísceras de tilapia roja (*Oreochromis* sp.). Scielo, 31(1), 53-66. 2011. Obtenido de doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100053>

14. Martines, E., & Lira, L. Analisis y Aplicación de las expresiones del contenido de humedad en solidos. Simpicio de metrologia. 2010. Obtenido de <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>
15. León, U., Muñoz, J., Vargas, G., & Pacheco, Y. Cinética de secado del coco por radiación. Tecnología en marca, 32, 115-121. doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4269>. 2018.
16. Salazar, M. Modelo de la cinética de secado por convección forzada de la semilla de Pajuro(*Erythrina edulis* Triana). Modelo de la cinética de secado por convección forzada de la semilla de Pajuro(*Erythrina edulis* Triana). Perú: Universidad Nacional Agraria de la selva. 2020.
17. Cengel , Y., & Ghajar, A. Fundamentos de la convección. En Transferencia de calor y masa . McGrawHill, 2011.
18. Siqueira Valdiney Cambuy, G. E. Drying Kinetics of Processed Natural Coffee with High Moisture Content. Coffee Science, 2017. p400-409.
19. Phitakwinai, Sutida S. T. Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity. Food Science and Nutrition. 2019. p 2921–2931.
20. Bejenari, Victoria C. L. Isothermal Drying Kinetic Study of Spent Coffee Grounds Using Thermogravimetric Analysis. International Journal of Chemical Engineering, 2022.
21. Mizera C, H. D. Describing of drying curves of green coffee beans using mathematical model . 2nd Nommensen International Conference on Technology and Engineering. 2018.
22. Wanich Nilnont, S. P. Thin-layer Drying Kinetics of Robusta Coffee. International Journal of Advanced Culture Technology. 2015, p138-143.
23. Guilherme E. Alves, F. M. Influence of Different Temperatures and Airflows on Drying of. Enghenaria Agricola, 2020. p 192-200.
24. Fatharani, A. Y. Drying characteristics of robusta coffee beans using YSDUNIB18 hybrid dryer based on thin-layer drying kinetics fitting model . International Journal of Agricultural Technology, 2023, 37-52.
25. Gallego Agudelo Claudia Patricia, L. C. Influencia del Proceso de Secado del Café Natural en las Características Físicas del Grano y la Calidad Sensorial. Revista Cenicafé, 2023. p94 – 110

Received: 28 September 2023/ Accepted: 15 November 2023 / Published:15 December 2023

Citation. García M E, Moreta T; Guerrero Luzuriaga S A, Gaibor Chávez J. Modelamiento matematico de la cinética de secado de café robusta (*Coffea canephora*). Revis Bionatura 2023;8 (4)
10. <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2023.08.04.10>

Additional information Correspondence should be addressed to jalbujar@uc.edu.ve

Peer review information. Bionatura thanks anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are made freely and permanently accessible online immediately upon publication, without subscription charges or registration barriers.

Bionatura ISSN. 13909355. **Scopus coverage years:** from 2016 to the Present

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2023 by the authors. They were submitted for possible open-access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).