

Modelado matemático del secado solar de zanahoria (*Daucus carota*) a 3 832 m de altitud

Mathematical modeling of solar drying of carrots (*Daucus carota*) at 3 832 m of altitude

Miraya Esmeralda Cari Bellido
miraya.cari.bellido@gmail.com - Universidad Peruana Unión
 Fanel Milagros Carcausto Puma
fanel.milagros@gmail.com - Universidad Peruana Unión
 Melisa Ibet Surco Quispe
melisasurco@gmail.com - Universidad Peruana Unión
 Augusto Pumacahua Ramos
augusto.pumacahua@upeu.pe - Universidad Peruana Unión

Resumen

El clima andino ofrece condiciones interesantes para el secado de alimentos. Presión atmosférica de 63 kPa, humedades relativas inferiores a 30% y temperaturas inferiores a 25 °C. El objetivo de este trabajo fue estudiar la cinética del secado de zanahorias en tres diferentes medios de secado mediante tres modelos matemáticos. Las zanahorias fueron ralladas y colocadas en marcos de malla en tres medios de secado: al aire libre, metal ondulado (calamina) y bandeja metálica negra fosca. El secado se realizó durante un día ensolarado con nubes esporádicas hasta peso constante. Los datos de pérdida de agua fueron ajustados a los modelos matemáticos Page, Weibull y Midilli. Las constantes de los modelos fueron validados mediante el coeficiente de determinación (R^2) y la Media Aritmética porcentual del Error (MA%E). Las temperaturas promedio del aire circundante durante el secado en los tres medios de secado fueron de 24, 28 y 34 °C respectivamente. Se observó que tiempo de secado al aire libre fue menor que en metal ondulado y metal negro, a pesar que se tuvo menor temperatura de secado. El modelo Weibull obtuvo un mejor ajuste en las tres situaciones de secado, cuya constante de velocidad k , fue de 8.69×10^{-3} , 8.69×10^{-3} y 8.69×10^{-3} para las temperaturas de 24, 28 y 32 °C respectivamente. Se verificó que las condiciones del aire a 3800 m de altitud, son adecuadas para el secado de zanahorias y que el secado al aire libre, con mayor flujo de aire es más adecuado que aire caliente con poca circulación.

Palabras claves: Modelos matemáticos, Coeficiente efectivo de difusión, Energía de activación, Altiplano peruano.

Abstract

The Andean weather offers interesting conditions for the drying food. Atmospheric pressure of 63 kPa, relative humidity below 30% and temperatures below 25°C. The objective of this work was to study the kinetics of drying carrots in three different drying resources by means of three mathematical models. The carrots were grated and placed in web frames in three drying resource: outdoors, corrugated metal (calamine) and black metal tray. The drying was done during a sunny day with casual clouds so far constant weight. The loss data of water were adjusted to the Page, Weibull and Midilli mathematical models. The models constants were validated by means of the determination coefficient (R^2) and the Arithmetic Mean of Percent Error (MA%E). The average temperatures of the surrounding air during the drying in the three drying resources were 24, 28 and 34 °C respectively. It was observed that drying time in the outdoors was less than in corrugated metal and black metal, even although there was a lower drying temperature. The Weibull model obtained a better adjustment in the three drying situations, whose speed constant k , was 8.69×10^{-3} , 8.69×10^{-3} and 8.69×10^{-3} for the temperatures of 24, 28 and 32 °C respectively. It was verified that air conditions at 3800 m altitude, are suitable for drying carrots and the fresh air drying, with more flow of air is more suitable than the hot air with a little circulation.

Keywords: Mathematical models, Effective diffusion coefficient, Activation energy, Peruvian altiplano.

Como citar: Cari-Bellido, M.E., Carcausto-Puma, F.M., Surco-Quispe, M. & Pumacahua-Ramos, A. (2018). Modelado matemático del secado solar de zanahoria (*daucus carota*) a 3832 m de altitud. *ÑAWPARISUN - Revista de Investigación Científica*, 1(1), 35-42.

Introducción

El secado como método de conservación de alimentos es ampliamente usado para aumentar la vida de anaquel de alimentos perecibles. El secado disminuye la actividad de agua, minimiza las reacciones bioquímicas y consecuentemente el crecimiento de microorganismos causantes del deterioro (Abdullah, Nawawi, & Othman, 2000). Dentro de los diferentes sistemas de secado de productos alimentarios, el secado solar tradicional es, todavía hoy, el procedimiento más utilizado en las zonas rurales. Alimentos tradicionales como, cacao, café, pimientos, frejoles, achiote, cúrcuma, etc., son secados por esta metodología, siendo esta un sistema de bajo costo y eficiente.

Condiciones adecuadas del aire de secado permiten secar alimentos de forma satisfactoria. En el secado solar, la radiación incrementa la temperatura del aire, disminuyendo su humedad relativa (HR), así como elevan la temperatura del agua del alimento, disponibilizando energía para la evaporación de la misma. La HR del aire es la propiedad de mayor influencia en la evaporación del agua, pues al disminuir, aumenta la capacidad del aire de retener agua. Por psicrometría se sabe que un aire con 100 % de HR no puede retener más agua de lo que posee. Así, cuanto más baja la HR del aire, más capacidad de absorber y retener agua (Çengel & Ghajar, 2011).

Esta condición es la que permite secar los alimentos pues los secadores solares o convencionales aumentan la temperatura del aire y consecuente la disminución de la HR (Lopez et al., 2014; Samadi, Ghobadian, Najafi, & Motevali, 2014; Vijayavenkataraman, Iniyar, & Goic, 2012). Por otro lado, altas temperaturas del aire de secado no siempre son favorables a la calidad del alimento. Estudios de degradación de vitamina C de tomates secados a diferentes temperaturas mostraron que cuanto más alta la temperatura del secado, mayor la tasa de degradación (Marfil, Santos, & Telis, 2008).

Los andes sudamericanos (locales por encima de 1500 m de altitud) tienen condiciones atmosféricas muy interesantes para el secado de alimentos. Aire atmosférico de localidades que están entre 0 a 1500 m de altitud poseen altas HR's, y los que están a mayores altitudes poseen bajas HR's. La baja HR del aire en función de altitud es explicada por la disminución de la densidad del aire o aumento de su volumen. La disminución de la densidad del aire o incremento de su volumen es demostrado por la ecuación de estado de los gases ideales (Ec. 1), donde la densidad es directamente proporcional a la presión atmosférica:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad (1)$$

Donde, ρ es la densidad del aire (kg/m^3), m es la masa del aire (kg), V es el volumen del aire (m^3), P es la presión atmosférica local (kPa), R es la constante del aire ($\text{kPa m}^3/\text{kg K}$) y T es la temperatura absoluta (K).

La presión atmosférica depende también de la altitud, pues disminuye a mayores altitudes y puede ser determinada por la ecuación propuesta por (Cengel & Boles, 2012):

$$P = P_0(1 - 0.02256z)^{5.256} \quad (2)$$

Donde P_0 es la presión al nivel del mar (101.3 kPa), z es la altitud (km).

Por otro lado, la temperatura del aire a grandes altitudes disminuye considerablemente. Esto permite tener un aire atmosférico de baja HR y baja temperatura, ideal para el secado de alimentos donde sus propiedades nutritivas sean preservadas.

Diversos estudios la cinética del secado convencional y solar, así como el modelado matemático de diversos alimentos fueron realizados.

Entre los estudios están el secado de bananas (Baini & Langrish, 2007; Nguyen & Price, 2007; Pereira, Rodrigues, Maria, Silva, & Castro, 2015; Pereira, Silva, & Gomes, 2013; Porciuncula, Zotarelli, Carciofi, & Laurindo, 2013; Smitabhindu, Janjai, & Chankong, 2008; Thuwapanichayanan, Prachayawarakorn, Kunwisawa, & Soponronnarit, 2011), palillo (*Curcuma longa*) (Borah, Hazarika, & Khayer, 2015), piñas (Bala, Mondol, Biswas, & Das, 2003), fresas (De Oliveira, Aragao, De Oliveira, Silva, & Gusmao, 2015), mangos (Koua, Fassinou, Gbaha, & Toure, 2009; Ocampo, 2006) y manzanas (Silva, Melo, Alves, Fernandes, & Farias, 2009), entre otros alimentos.

Estudios de la cinética del secado en por lo menos tres temperaturas permite determinar la energía de activación (Corrêa et al., 2010; De Oliveira et al., 2015; Rocha et al., 2012). Los materiales metálicos tienen la capacidad de absorber energía solar y generar energía térmica. Los materiales negros absorben energía, así como los materiales metálicos, como la calamina. En el secado solar se puede incrementar la temperatura del aire ambiente adyacente a los alimentos mediante superficies metálicas y/o negras. De esta forma pueden determinarse las propiedades termodinámicas mencionadas.

Por lo expuesto, el objetivo de presente trabajo de investigación fue estudiar la cinética del secado al aire ambiente de zanahoria rallada mediante tres

modelos matemáticos y determinar algunas propiedades termodinámicas.

Materiales y métodos

Este trabajo se realizó en el campus de la Universidad Peruana Unión (UPeU) filial Juliaca, Chullunquiani, distrito de Juliaca, provincia de San Román, departamento de Puno. Las zanahorias fueron adquiridas en el mercado Santa Bárbara. Las muestras fueron lavadas en agua corriente, peladas mediante cuchillos, ralladas mediante un rallador manual donde se obtuvo un espesor aproximado de 2 mm por partícula. Previo a los ensayos de secado, se determinó la humedad inicial de la muestra mediante el método de estufa a 105°C durante 24 h en duplicado.

El contenido de agua durante el tiempo de secado fue determinado considerando que la masa seca no varía. Así, las masas de agua por diferencia de la inicial y el agua evaporada fue dividida por la masa seca.

Secado solar

En la Figura 1 se muestra el esquema del secado de zanahoria rallada en los tres medios de secado.

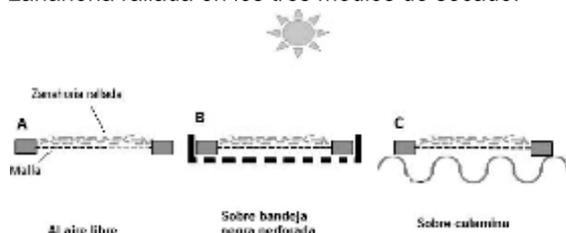


Figura 1. Secado de zanahoria rallada en tres diferentes medios, (A) al aire libre, (B) sobre bandeja negra perforada y (C) sobre calamina.

Las zanahorias ralladas fueron expuestas al aire libre, en un lugar abierto con libre circulación de aire. Se utilizaron secadores solares del tipo tablero con medidas de 25 cm x 40 cm x 3.76 cm y malla de fierro galvanizado de 2 mm x 2 mm de abertura. Cada partícula de las muestras tuvo un espesor aproximado de 1 mm en una cantidad aproximada de 290 g por tratamiento. Para obtener temperaturas diferentes al del aire circundante se utilizaron una plancha de fierro galvanizado ondulado (Calamina) y una bandeja de fierro galvanizado recubierto con pintura negra fosca (Bandeja negra) con aberturas en la parte del fondo. La superficie de estos dos medios absorbe energía solar y se calientan, permitiendo que la temperatura del aire circundante aumente más que la del aire libre. El secado se realizó en el mes de noviembre del 2015, desde las 8:55 a 13:55 h por tres repeticiones. Durante el proceso de secado las muestras fueron pesadas, cada 20 min y se midió la temperatura del aire, la humedad relativa del aire y la velocidad del aire a 10

cm del tablero mediante medidor digital provisto de termopar externo, sensor de humedad y anemómetro. Para la temperatura de la superficie de las zanahorias se utilizó un termómetro digital de hazte metálica colocado junto a las muestras. La masa seca de cada grupo de zanahorias se determinó por la siguiente ecuación,

$$M_s = M_i(1 - X_{bh}) \tag{1}$$

Donde, M_s es la masa seca (kg), M_i es la masa inicial (kg), X_{bh} es el contenido de agua inicial (kg agua /kg zanahoria)

Mediante las masas a cada 20 minutos de secado, se obtuvieron los contenidos de agua en base seca en todo el periodo de secado, por la fórmula:

El contenido de agua durante el secado fue determinado por:

$$X_t = \frac{M_t - M_s}{M_s} \tag{2}$$

Donde, X_t es el Contenido de agua en el tiempo de secado (kg agua/kg masa seca) y M_t es la masa de la zanahoria rallada en el tiempo de secado (kg).

Modelado matemático

Se utilizaron los modelos matemáticos de Page (Page, 1949), Weibull (Corzo, Bracho, Pereira, & Vásquez, 2008) y Midilli (Midilli, Kucukb, & Yapar, 2002) presentados en las Ecuaciones. (3), (4) y (5):

$$\text{Page } \frac{H_t - H_\infty}{H_i - H_\infty} = \exp(-kt^n) \tag{3}$$

$$\text{Weibull } \frac{H_t - H_\infty}{H_i - H_\infty} = \exp[-(kt)^n] \tag{4}$$

$$\text{Midilli } \frac{H_t - H_\infty}{H_i - H_\infty} = a \exp(-kt^n) + bt \tag{5}$$

Donde, H_t es el contenido de agua en base seca (kg agua/kg m.s.) de la zanahoria en el tiempo, H_i es el contenido de agua inicial (kg agua/kg m.s.), H_∞ es el contenido de agua de equilibrio (kg agua/kg m.s.), a , b , k y n son constantes de los modelos, t es el tiempo (min).

La velocidad de secado es la disminución del contenido de agua de las zanahorias en un intervalo de tiempo, así:

$$V_s = \frac{\Delta H_t}{\Delta t} \tag{6}$$

Donde V_s es la velocidad de secado (kg agua/kg m. s. min), ΔH_t es la pérdida del contenido de agua (kg agua/kg m.s.) en el lapso de 20 min y Δt es el tiempo de 20 min.

Para el ajuste de los modelos y la determinación de las constantes, fueron realizados ajustes GRG no lineares mediante la herramienta Solver® del Excel®

2010 del programa Windows. Los resultados de los contenidos de agua calculados por los modelos fueron validados mediante el coeficiente de determinación (R^2), raíz media cuadrática del error (RMSE) y la media aritmética porcentual del error (MA%E):

$$RMSE = \left[\left(\sum_{i=1}^7 (H_{t,i} - H_{exp,i})^2 \right) / N \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$MA\%E = \left(\frac{100}{N} \right) \sum_{i=1}^N \frac{(H_{t,i} - H_{exp,i})}{H_{exp,i}} \quad (8)$$

Investigaciones con modelos matemáticos mostraron que si los valores de RMSE son próximos a 0 y MA%E son menores a 10%, son buenos modelos para predecir tiempos y/o contenidos de agua experimentales (Almeida, Resende, Costa, Mendes, & Sales, 2009; Villa-Vélez, de Souza, Pumacaua-Ramos, Polachini, & Telis-Romero, 2015).

Resultados y discusión

Secado solar

La humedad inicial de la zanahoria rallada fue 9.213 ± 0.036 kg agua/kg m.s. y aproximadamente 2 mm de espesor. Se observó que el aire externo a veces estaba quieto y a veces en movimiento con una velocidad promedio de 0.26 m/s para los tres medios de secado.

El monitoreo de las temperaturas y humedades relativas del aire ambiente del 20 de octubre del 2015 son mostrados en la Figura 2.

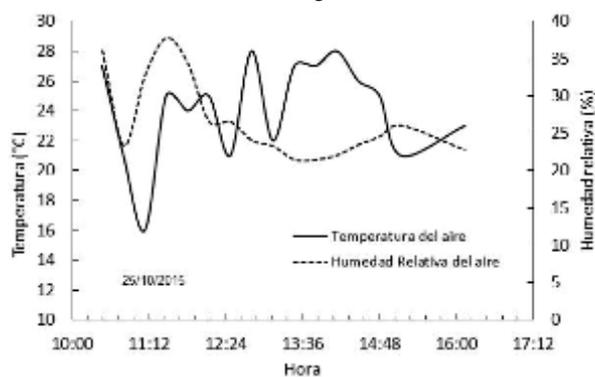


Figura 2. Temperaturas y humedades relativas del aire ambiente durante el secado de zanahoria rallada en tres medios de secado.

Las temperaturas del aire a 10 cm de las muestras e zanahoria fueron de $25 \pm 2,4$ °C, $29 \pm 2,1$ °C y $33 \pm 4,3$ °C para el secado al aire libre, secado sobre bandeja negra perforada y sobre calamina, respectivamente. De la misma forma las humedades relativas promedio fueron de $27 \pm 5,6$ %, $26 \pm 4,2$ %, y $27 \pm 4,6$ %, para el secado al aire libre, secado sobre bandeja negra perforada y sobre calamina, respectivamente. Se observa una diferencia sustancial entre las

temperaturas, pero las humedades relativas fueron casi las mismas.

De la misma forma se obtuvieron que las temperaturas de la superficie de las muestras fueron de 20.5, 21.5 y 22. 1 °C para el secado al aire libre, secado sobre bandeja negra perforada y sobre calamina respectivamente. En la bandeja negra perforada se permite circulación parcial del aire y un ligero incremento de la temperatura. En el secado sobre la calamina el aire aumenta la temperatura en 8 °C, pero tiene poca circulación del aire. En la humedad relativa del aire y la velocidad del aire no hubo variación significativa, pero sí en la temperatura del aire próximo a la zanahoria rallada. El incremento de la temperatura en la bandeja negra perforada y en la calamina se debe a la absorción de energía de radiación y consecuente conversión en energía térmica, permitiendo incrementar entre 4 y 8 °C, respectivamente.

El contenido inicial de agua y la masa respectiva de la zanahoria rallada en el pesado de los tableros permitieron obtener los contenidos de agua (kg agua/kg m. s.) a cada 20 min. El resultado esta mostrado en la Figura 3.

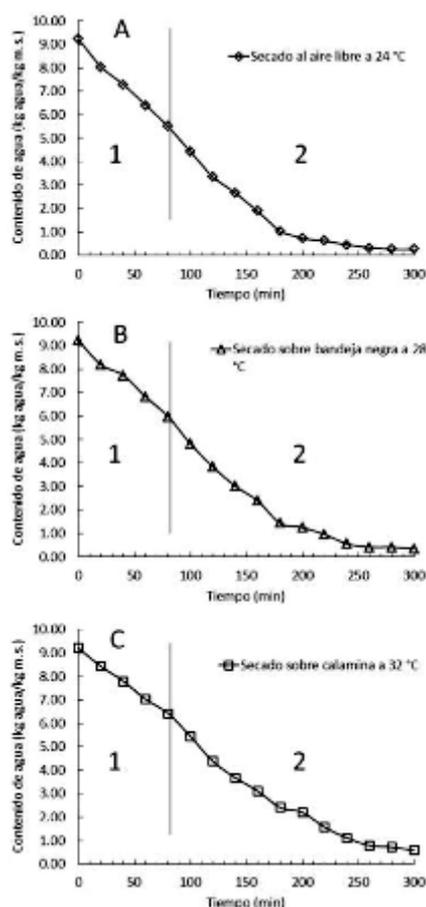


Figura 3. Curvas de secado de zanahoria rallada en tres tipos de superficie, A) al aire libre, B) sobre bandeja negra y C) sobre calamina.

Se observa dos etapas de secado, una decreciente y otra logarítmica, haciendo de la curva del tipo asintótica, típicos de secado solar natural. En la

primera etapa la pérdida de agua es casi lineal, seguida de una segunda etapa exponencial hasta que la curva asintóticamente llega al equilibrio de 0.27, 0.34 y 0.59 kg agua/kg masa seca para el secado al aire libre, sobre bandeja negra y sobre calamina, respectivamente. Una primera etapa decreciente y una segunda etapa logarítmica fue observada en el secado solar de cúrcuma (Borah et al., 2015), patatas en rodajas (Chouicha, Boubekri, Mennouche, & Berrbeuh, 2013), anacardo (Machado, Oliveira, Santos, & Oliveira, 2010) y mango, plátano y yuca (Koua et al., 2009).

Existen diferencias en el secado solar natural en los tres medios de secado. Las curvas de secado al aire libre (Figura 3-A) y sobre bandeja negra (Figura 3-B) muestran que a los 20 minutos iniciales pierden aproximadamente 1(kg agua/kg masa seca) unidad del contenido de agua. Al contrario que el secado sobre calamina (Figura 3-C) pierde aproximadamente 0.6 (kg agua/kg masa seca) unidades de contenido de agua. El agua superficial evapora más rápidamente por la convección alrededor del alimento que en la superficie de calamina, pues en los dos primeros medios existe una mayor circulación de aire próximo al alimento. En el secado sobre calamina la temperatura es mayor, pero la convección de aire es menor. Luego de los 20 minutos se observa una disminución de la evaporación de agua, pues el agua el interior del alimento demora en difundir a la superficie. Esta disminución es hasta los 80 minutos de secado. Otro hecho interesante es que a partir de los 80 minutos de secado la velocidad desciende en forma exponencial. El tiempo de secado duró aproximadamente 5 h (300 min) hasta un contenido de agua menor a 30%.

Velocidad de secado

La Figura 4 muestra las curvas de velocidad de secado (V_s) (Ec. (2) de la zanahoria rallada en tres temperaturas y tres tipos de superficie mediante las humedades calculadas por el modelo de Weibull.

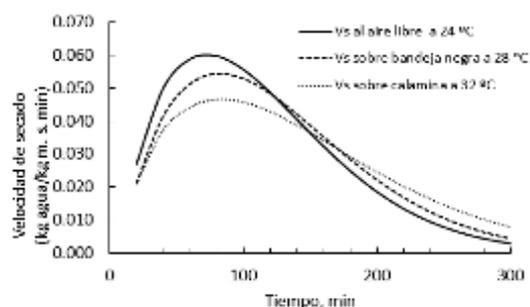


Figura 4. Curvas de velocidad de secado de zanahoria rallada en tres temperaturas y tres tipos de superficie determinadas por las humedades mediante el modelo Weibull.

Como se observa en la Figura 4, que la velocidad de secado al aire libre es mayor que el secado sobre bandeja negra y sobre calamina. Este resultado es coherente a las curvas de secado (Figura 3) y muestra la influencia de la mayor circulación del aire sobre las muestras de zanahoria al aire libre en la velocidad del secado. Hay varios factores que influyen directamente a la velocidad de evaporación del agua del alimento. Dos de ellos son la temperatura y la velocidad de aire. Se observa que la velocidad o circulación del aire es predominante al incremento de temperatura. De acuerdo a la Figura 1-A, el tiempo de secado solar al aire libre es menor que sobre calamina y bandeja negra. En los otros dos medios de secado, la temperatura del aire fue mayor, pero la pérdida de agua fue menor. Bajo estos resultados podemos afirmar que el secado de zanahoria rallada con libre circulación de aire es más conveniente que aire más caliente pero con poca circulación.

Modelos matemáticos

Los datos de secado solar (Figura 2) y su respectivo ajuste a los tres modelos matemáticos, permitieron obtener las constantes de cada modelo. Estos son presentados en la Tabla 1 con sus respectivos R^2 , RMSE y MA%E.

Tabla 1. Constantes de los modelos de ajuste a los datos experimentales del secado solar de zanahoria rallada en tres medios.

Secado solar	Modelos	A	B	k	n	R ²	RMSE	MA%E
Al aire libre (24 °C)	Page	-	-	0.000402	1.640	0.996	0.251	9.29
	Weibull	1.601	-	0.008694		0.995	0.238	9.18
	Midilli	0.960	0.000	0.000444	1.612	0.996	0.198	10.81
Sobre bandeja negra perforada (28 °C)	Page	-	-	0.000485	1.595	0.994	0.268	9.17
	Weibull	1.643	-	0.007830		0.997	0.188	6.67
	Midilli	0.999	0.000	0.000562	1.543	0.997	0.197	11.25
Sobre calamina (32 °C)	Page	-	-	0.000577	1.497	0.997	0.151	5.14
	Weibull	1.536	-	0.006870		0.997	0.155	3.98
	Midilli	1.027	0.000	0.001786	1.273	0.993	0.265	11.92

Los tres modelos tuvieron un buen ajuste por el R^2 , pero en el MA%E el modelo de Page y Weibull tuvieron los valores por debajo 10%, por los que se considera un buen ajuste. En el caso del secado solar sobre calamina el modelo Weibull tuvo un ajuste de 3.98% considerado muy buen ajuste. Un promedio de los MA%E de los tres modelos revela que el MA%E del modelo Weibull tiene 6.61%, menor que 7.87% y 11.33% de los modelos Page y Midilli. Para un mejor análisis del ajuste del modelo de Weibull para los tres medios de secado, se muestra la Figura 5.

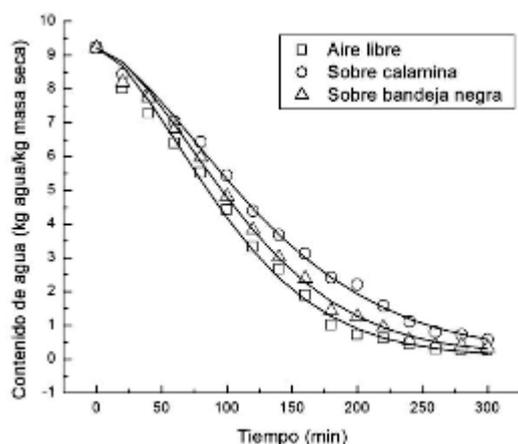


Figura 5. Ajuste del modelo Weibull sobre las curvas de secado solar de zanahoria rallada en tres medios.

Conclusiones

Se verificó que a condiciones atmosféricas de baja temperatura y baja humedad relativa de la ciudad de Juliaca, es posible secar zanahorias ralladas sin necesidad de precalentar el aire como en el secado convencional.

El secado al aire libre fue el que mostró mayor velocidad de secado, a pesar de que tuvo una menor temperatura del aire, comparado al secado sobre bandeja negra y calamina.

Los modelos matemáticos ajustaron bien a los datos experimentales con R^2 próximos de 1, MRSE menores a 1 y MA%E menores a 10%, siendo el mejor, el modelo de Weibull.

Los coeficientes efectivos de difusión (D_{ef}) variaron entre $1.31 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (Aire libre a 24°C), $1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (sobre calamina a 28°C) y $1.25 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (sobre bandeja negra a 32°C).

Referencias bibliográficas

- Abdullah, N., Nawawi, A., & Othman, I. (2000). Fungal spoilage of starch-based foods in relation to its water activity (aw). *Journal of Stored Products Research*, 36, 47–54.
- Almeida, D. P., Resende, O., Costa, L. M., Mendes, U. C., & Sales, J. de F. (2009). Cinética de secagem do feijão adzuki (Vigna angularis). *Global Science and Technology*, 2(1), 72–83.
- Baini, R., & Langrish, T. A. G. (2007). Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 79, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.068>
- Bala, B. K., Mondol, M. R. A., Biswas, B. K., & Das, B. L. (2003). Solar drying of pineapple using solar tunnel drier. *Renewable Energy*, 28, 183–190.
- Borah, A., Hazarika, K., & Khayer, S. M. (2015). Drying kinetics of whole and sliced turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.) in a solar conduction dryer. *Informaioin Processing in Agriculture*, 2, 85–92.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica (7°)*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor e masa. Fundamentos y aplicaciones*. (McGraw-Hill, Ed.) (4a ed.). Mexico.
- Chouicha, S., Boubekri, A., Mennouche, D., & Berrbeuh, M. H. (2013). Solar drying of sliced potatoes. An experimental investigation. *Energy Procedia*, 36, 1276–1285. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.144>
- Corrêa, P. C., Henrique, G., Oliveira, H., Botelho, F. M., Luis, A., & Goneli, D. (2010). Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. *Revista Ceres Vicoca*, 57(5), 595–601.
- Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., & Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 2023–2028. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.01.002>
- De Oliveira, G. H. H., Aragao, D. M. S., De Oliveira, A. P. L. R., Silva, M. G., & Gusmao, A. C. A. (2015). Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. *Brazilian Journal of Food Technology*, 18(4), 314–321.
- Koua, K. B., Fassinou, W. F., Gbaha, P., & Toure, S. (2009). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy*, 34(10), 1594–1602. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.005>
- Lopez, R., Vaca, M., Terres, H., Lizardi, A., Morales, J., Flores, J., ... Chávez, S. (2014). Kinetics modeling of the drying of chickpea (*Cicer arietinum*) with solar energy. *Energy Procedia*, 57, 1447–1454. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.136>
- Machado, A. V., Oliveira, E. L., Santos, E. S., & Oliveira, J. (2010). Estudio del Secado de Anacardo (*Anacardium occidentale* L.) mediante Secador Solar de Radiación Directa. *Información Tecnológica*, 21(1), 31–37. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4137it.08>
- Marfil, P. H. M., Santos, E. M., & Telis, V. R. N. (2008). Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 1642–1647. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.11.003>
- Midilli, A., Kucukb, H., & Yaparc, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology: An International Journal*, 20(7), 1503–1513.
- Nguyen, M., & Price, W. E. (2007). Air-drying of banana : Influence of experimental parameters , slab thickness , banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering*, 79, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.063>
- Ocampo, A. (2006). Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista EIA*, 5, 119–128.
- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*.
- Pereira, W., Rodrigues, A. F., Maria, C., Silva, D. P. S., & Castro, D. S. De. (2015). Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. *Journal of Food Engineering*, 166, 230–236.
- Pereira, W., Silva, C. M. D. P. S., & Gomes, J. P. (2013). Drying description of cylindrical pieces of bananas in different temperatures using diffusion models. *Journal of Food Engineering*, 117, 417–424.
- Porciuncula, B. D. A., Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2013). Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 490–496. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.011>
- Rocha, R. P. Da, Melo, E. D. C., Corbín, J. B., Berbert, P. A., Donzeles, S. M. L., & Tabar, J. A. (2012). Cinética del secado de tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 16(6), 675–683. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000600013>
- Samadi, S. H., Ghobadian, B., Najafi, G., & Motevali, A. (2014). Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices). *Journal of the Saudi Society of Agricultural*

- Sciences*, 13(2), 174–182.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.09.001>
- Silva, A. S., Melo, dos S. K., Alves, N. M. C., Fernandes, K. da S. T., & Farias, P. de A. (2009). Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 11(2), 129–136.
- Smitabhindu, R., Janjai, S., & Chankong, V. (2008). Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas. *Renewable Energy*, 33, 1523–1531.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.021>
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J., & Soponronnarit, S. (2011). Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT - Food Science and Technology*, 44(6), 1502–1510.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.01.003>
- Vijayavenkataraman, S., Iniyar, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652–2670.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.007>
- Villa-Vélez, H. A., de Souza, S. J. F., Pumacaua-Ramos, A., Polachini, T., & Telis-Romero, J. (2015). Thermodynamic properties of water adsorption from orange peels. *Journal of Bioenergy and Food Science*, 2(2), 72–81.