

MODELADO MATEMÁTICO DEL SECADO DE HOJAS DE ORÉGANO (*Plectranthus amboinicus*) UTILIZANDO TECNOLOGÍAS DIRECTAS E INDIRECTAS

Beatriz Castillo Téllez^{1*}, Gerardo A. Mejía Pérez¹, Margarita Castillo Téllez² Juan C. Gutiérrez Villegas¹ y Raúl Quiroz Martínez¹

¹Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara, Colotlán, Jalisco 46200 México.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, 24085 Campeche.

Fecha de recepción: xx de xx de xxxx - Fecha de aceptación: xx de xx de xxxx

Resumen

En el presente trabajo se estudian las características de muestras de hojas de orégano con contenido de humedad inicial de 80 y final de 9%. Las cinéticas de secado fueron realizadas en un secador tipo gabinete con y sin convección forzada, secado a cielo abierto y tecnologías de secado solar indirecto. Los modelos de Weibull, Logarítmico y Page fueron los de mejor ajuste a los resultados experimentales de las tecnologías indirectas, con R^2 de 0.9969, 0.9968, y 0.9945, X^2 de 0.0363, 0.0363 y 0.0599 respectivamente. Los resultados indican que el secado solar indirecto provee un mejor control de las condiciones de operación y mayor protección contra los efectos de temperatura, produciendo una mejor calidad en el producto seco. El tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad de equilibrio en todos los experimentos varió entre 375 y 600 min.

Palabras clave: Secado solar de orégano, tecnologías de secado directo e indirecto, modelos de secado

MATHEMATICAL MODELING OF OREGAN LEAF DRYING (*Plectranthus amboinicus*) USING DIRECT AND INDIRECT TECHNOLOGIES

Abstract

In this paper we study the characteristics of samples of oregano leaves with initial moisture content of 80 and end of 9%. The drying kinetics were made in a cabinet-type dryer with and without forced

*beatriz.castillo@academicos.udg.mx

convection, open-air drying and indirect solar drying technologies. The models of Weibull, logarithmic and Page were those of better adjustment to the experimental results of the indirect technologies, with R^2 of 0.9969, 0.9968, and 0.9945, X^2 of 0.0363, 0.0363 and 0.0599 respectively, the results indicate that the indirect solar drying provides better control of the operating conditions and greater protection against the effects of temperature, producing a better quality in the dry product. The time required to achieve equilibrium moisture content in all experiments varied between 375 and 600 min.

Keywords: Solar drying of oregano, direct and indirect drying technologies, drying models.

1 Introducción

El orégano es una hierba cultivada con fines culinarios desde tiempos remotos, pero en la actualidad se utiliza en perfumes, medicamentos, bebidas alcohólicas, como conservador en alimentos, cosméticos, aceites automotrices y de aeronáutica y recientemente se ha encontrado que ayuda contra enfermedades como la hiperglucemia, hipertensión, obesidad, (Mueller *et al.*, 2008). Ha encontrado como hábitat sitios secos y pedregosos donde sería imposible cosechar otros cultivos e incluso en lugares como el Norte de Jalisco, (donde se cosecha entre 800 y 1000 ton al año), Zacatecas, Coahuila y Chihuahua, el orégano contiene hasta un 30% más de aceite, incrementando su valor comercial, (Vázquez Martínez, 2010).

El orégano en general se utiliza seco. La deshidratación del producto es una solución que impide el crecimiento de microorganismos, alarga su vida útil y previene ciertos cambios bioquímicos (Hossain *et al.*, 2010). Comúnmente en México, tanto para alimentos como para medicamentos o extracción de aceites este proceso se realiza a cielo abierto, es decir, se arranca de raíz el arbusto y se deja en el sitio el tiempo necesario para su secado, para posteriormente sacudirlo y llevarlo a empresas que lo empaquetan y lo comercializan en el país o en el extranjero. Este proceso es por demás, aunque económico, poco eficiente e higiénico, ya que el producto queda expuesto a polvos, roedores, lluvia, o cualquier otra condición ambiental. etc.

El secador solar es un dispositivo que pueden ofrecer procesos de secado más rápidos con un secado más uniforme, higiénico y efectivo que los métodos convencionales, logrando obtener productos secos con mejor color y textura (Castillo Téllez *et al.*, 2018) . Una amplia variedad de tecnologías de secado solar han sido reportadas por muchos investigadores en el campo, que incluyen secadores solares directos, indirectos e híbridos (Fudholi *et al.*, 2014).

En este trabajo, se realizaron experimentos para analizar el comportamiento del secado de orégano, *Plectranthus amboinicus* (Lour), utilizando tecnologías de secado solar directo e indirecto. Además, se desarrolló y optimizó un modelo matemático para permitir el ajuste de los diferentes parámetros cinéticos y determinar las condiciones operativas óptimas para los mejores resultados de Los experimentos se realizaron en Centro Universitario del Norte, de la Universidad de Guadalajara. en Colotlán, Jalisco, con coordenadas 22°12'N 103°18'O, a una altura de 1,720 metros sobre el nivel del mar con clima semicálido y temperaturas anuales promedio de 19°C, con una radiación solar global promedio anual de 5.9 kWh/m² día. El período de prueba fue del 1 de julio al 30 de septiembre de 2017.

2 Materiales y métodos

Materia prima

Se seleccionó el orégano *Plectranthus amboinicus* (Lour.), cultivado en el municipio de Macuspana, Tabasco. Las ramas se cortaron

y las hojas se separaron para obtener un grupo homogéneo basado en su madurez, color y frescura. Las hojas se lavaron y pesaron, y se midió su anchura, longitud y grosor. No hubo diferencias significativas en cuanto al tamaño y el peso de las diferentes plantas seleccionadas

para la prueba. Se utilizó una muestra de 20 g de hoja de orégano para cada prueba.

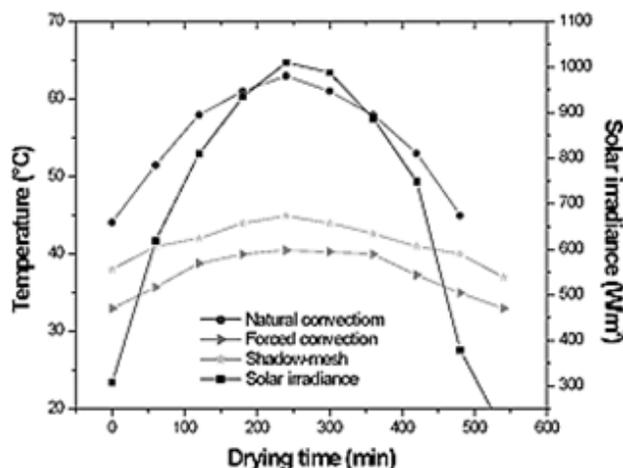


Figura 1 Variación en la irradiancia solar y la temperatura dentro de la cámara de secado bajo tres modos DSD

Métodos experimentales

Secado Solar Directo (DSD)

Se utilizó un secador solar directo tipo gabinete con material plástico transparente y una superficie de tratamiento de 0.5 m². La cámara de secado contiene una superficie que absorbe la radiación solar, en la que se coloca el producto a secar. Las partes laterales, inferiores y posteriores están perforadas para permitir la circulación y extracción de aire caliente y húmedo. El DSD se puede operar con circulación de aire natural o convección forzada utilizando un ventilador con una velocidad de aire máxima de 2 m/s.

Se midieron la temperatura interior, la cantidad de pérdida de peso en las muestras, la irradiancia solar, la humedad relativa y la temperatura del aire. La **Error! Reference source not found.**a) muestra los secadores solares directos que se utilizaron en este estudio.

Las pruebas se realizaron simultáneamente utilizando dos DSD. En uno de ellos se cubrió con una malla con filtración solar del 60%. En

ambos casos, los secadores solares, se probaron en condiciones ambientales similares.

Secado a cielo abierto

En este proceso, las hojas de orégano se colocan sobre una pieza de plástico adecuada como se muestra en la **Error! Reference source not found.**b) sin sobreponerlas y se dejan hasta el atardecer. Si las hojas no están completamente secas, se recolectan y almacenan en el interior. Este proceso se repite día tras día hasta que se completa el proceso de secado.

Secado solar indirecto (ISD)

El secador solar indirecto (ISD) consta de a) cámara de secado, b) chimenea y c) colector de aire. La cámara de secado es un túnel rectangular horizontal con una longitud de 0.47 m y una sección transversal de 0.16 m². Está construido de madera con aislamiento térmico y se divide en tres niveles con tres bandejas para contener el producto a secar **Figura 3.**



Figura 2a) Secador solar directo con convección forzada y b) Secado a cielo abierto



Figura 3 Secador solar indirecto. a) Cámara de secado, b) Chimenea y c) Colector de aire

Modelado de las cinéticas de secado.

Para analizar el comportamiento de secado de diferentes productos agrícolas, se han propuesto previamente modelos matemáticos para describir su cinética de secado por convección. El proceso de secado en la mayoría de estos modelos se considera bajo condiciones isotérmicas; por lo tanto, se consideró un mecanismo de transferencia de masa

difusional. Los modelos más ampliamente utilizados se enumeran en la **Tabla 1**. Se puede observar que la relación de humedad (MR) se considera como una función del tiempo de secado, que se puede calcular como:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Donde M es el contenido de humedad (el cociente entre el peso del contenido en agua en

la muestra fresca y el peso de la muestra después de la sequedad), M_e es la humedad de equilibrio (bajo temperatura controlada

específica y humedad del aire durante un largo periodo de tiempo), y M_0 es la humedad inicial.

Tabla 1 Modelos matemáticos aplicados al proceso de secado solar

Modelo	Ecuación	Referencia
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Tunde 2011)
Page	$MR = \exp(-ktn)$	(Page 1949)
Page modificado	$MR = \exp(-(kt)n)$	(Diamante et al., 1993)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Henderson and Pabis 1961)
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Togrul and Pehlivan 2002)
Dos términos	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(Kouaa et al., 2009)
Dos términos Exponencial	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)$	(Sharaf-Eldeen et al., 1980)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang and Singh, 1978)
Weibull	$MR = \exp[-(t/b)^\alpha]$	(Midilli, Kucuk and Yapar, 2002)

Análisis estadístico

El coeficiente de determinación (R^2) se utilizó en este estudio como uno de los criterios primarios para seleccionar el modelo más preciso en comparación con los datos experimentales (Midilli, Kucuk and Yapar, 2002). R^2 se evaluó calculando los diferentes parámetros involucrados en los modelos de ajuste seleccionados utilizando la versión de software DataFix 9.1. Además, la ji-cuadrado reducida (χ^2) y el error raíz-medio-cuadrado (RMSE) fueron utilizados como criterios aptos para los datos. El RMSE proporcionó la desviación entre los valores experimentales y predichos, con menos desviación indicada por valores más cercanos a cero. El modelo con el coeficiente de determinación más alto y el RMSE más bajo fue seleccionado como el mejor modelo para describir la cinética de sequía de las hojas del orégano. Se puede lograr un mejor ajuste si el valor de (χ^2) se reduce según la literatura (Sarracino M. *et al.*, 2018). El análisis estadístico se realizó mediante las siguientes ecuaciones:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_1 - MR_{pre,i}) \sum_{i=1}^n (MR_1 - MR_{exp,i})}{\left[\sum_{i=1}^n (MR_1 - MR_{pre,i})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (MR_1 - MR_{exp,i})^2 \right]} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

y

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (4)$$

Donde $MR_{exp,i}$ denota la relación de humedad experimental, $MR_{pre,i}$ es la relación de humedad predicha por el modelo matemático, N es el número de observaciones, y n es el número de constantes.

Resultados y discusión

Durante el período de prueba, se realizaron aproximadamente 20 experimentos; Sin embargo, en la mayoría de los casos, se observó un cierto nivel de reproducibilidad, especialmente en relación con los valores medios de irradiación solar en los días de prueba. Por lo tanto, varios días de prueba representativos fueron seleccionados del 3 al 7 de agosto, 2017.

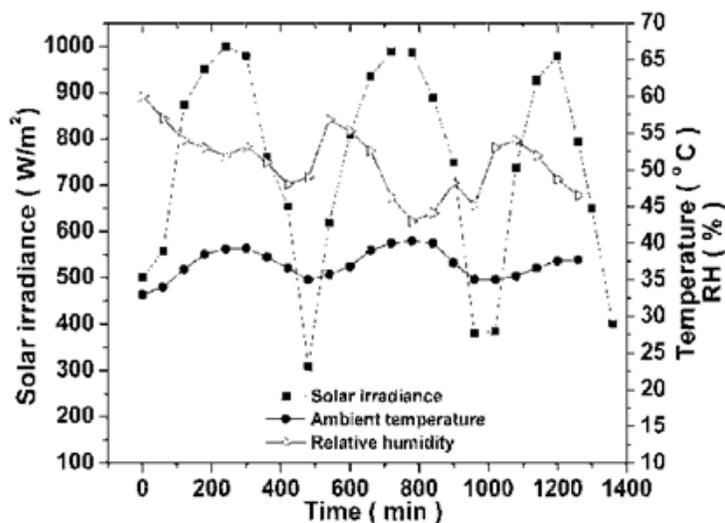


Figura 4 Irradiancia solar, temperatura ambiente y humedad relativa durante el periodo de pruebas

Tabla 2 Humedad inicial y final y actividad del agua obtenida por diferentes métodos de secado (promedio).

Tipo de secado	Humedad (%)		Actividad del agua (aw)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Convección natural	80.30	8.93	0.856	0.178
Convección forzada	81.25	9.01	0.875	0.198
Cielo abierto	80.43	8.73	0.845	0.163
Secador solar indirecto	81.87	9.32	0.883	0.179

Cinética de secado solar

Los valores iniciales y finales de humedad y actividad de agua de las hojas frescas y secas se enumeran en la **Error! Reference source not found.** para cada modo de convección, incluyendo el sol abierto y el secador solar indirecto.

Como se puede observar, en todos los casos se detectó poca variación en la humedad inicial. Se informaron niveles de humedad final ligeramente inferiores a los obtenidos por productos comerciales. También se puede

observar que el aumento similar en los niveles de humedad se obtuvo en cada prueba independientemente de la operación de secado y/o el método. Se observó una tendencia similar con respecto a las diferencias en la actividad hídrica. Los resultados de la actividad final del agua obtenida por todas las tecnologías de secado probadas indican que las condiciones ambientales no imponen efectos nocivos sobre las muestras deshidratadas. La figura 4 muestra el cambio en los parámetros meteorológicos durante el período de prueba con tres días soleados.

Como se puede ver, una irradiación global solar máxima de 1000 W/m^2 se alcanzó, con los valores máximos medios que oscilaban entre 950 y 980 W/m^2 . La temperatura ambiente mínima promedio fue de $33 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la temperatura ambiente máxima promedio fue de $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Por otro lado, el RH mínimo osciló entre 52 y 55% , mientras que el RH máximo osciló entre 32.65 y 50% . Secado Solar Directo (Gabinete).

La **Figura 4 Irradiancia solar, temperatura ambiente y humedad relativa durante el periodo de pruebas** muestra el cambio en la irradiación solar recibida de aproximadamente 1000 W/m^2 . También se midieron las variaciones de temperatura dentro de las cámaras de secado. Con el secado por convección natural, la temperatura interna osciló generalmente entre 40 y $50 \text{ }^\circ\text{C}$, con un valor máximo de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. En el caso del secado por convección forzada, la temperatura interna generalmente osciló entre 30 y $35 \text{ }^\circ\text{C}$, con un valor máximo de $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Cuando la cámara de secado se cubrió con malla sombreada, las temperaturas medias oscilaron entre 35 y $40 \text{ }^\circ\text{C}$, con un valor máximo de $43 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se observaron diferencias significativas de temperatura entre el caso con convección natural y los otros dos casos ensayados en este secadero solar. Cabe destacar que la cobertura de la cámara de secado con malla sombreada disminuyó la temperatura interna, manteniendo al mismo tiempo una constante transferencia de calor.

Modelado matemático del proceso de secado

En este estudio se analizaron nueve modelos predictivos, como se indica en el cuadro 3. Las constantes correspondientes y los parámetros de ajuste r^2 y χ^2 se obtuvieron valores para cada modelo.

Las tablas 3, 4 y 5 presentan los coeficientes y parámetros de ajuste de los resultados experimentales obtenidos utilizando los modelos matemáticos para analizar el DSD, el sol abierto y la cinética de secado ISD, respectivamente, con el fin de obtener los mejores ajustes.

El mejor ajuste para el DSD con la convección natural se logró mediante Weibull, Page y modelos de Page modificados, con R^2 de $0,9982$, $0,9981$ y $0,9981$; y un X^2 de $0,0155$, $6,3689$ y $0,0406$ respectivamente. Mientras tanto, los mejores resultados con la convección forzada fueron obtenidos por los Dos-término, Weibull, y los modelos de la Page, con R^2 de $0,9895$, $0,9922$ y $0,9839$; Y X^2 de $0,0690$, $0,0406$, y $0,1022$, respectivamente. El mejor ajuste para DSD con malla de sombra fue obtenido por Weibull, logarítmico y Henderson, y modelos Pabis, con R^2 de $0,9937$, $0,9997$ y $0,9924$; y un X^2 , de $0,1163$, $0,0345$, y $0,0747$, respectivamente.

El mejor ajuste para el sol abierto fue alcanzado por Weibull, la Page modificada, y los modelos de la Page, con R^2 de $0,9981$, $0,9976$ y $0,9976$; Y X^2 de $0,0747$, $1,8242$, y $1,8242$, respectivamente. Mientras tanto, el mejor ajuste para el ISD fue obtenido por los modelos Weibull, logarítmicos, y de la Page, con R^2 de $0,9969$, $0,9968$ y $0,9945$; Y X^2 de $0,0363$, $0,0363$ y $0,0599$. Las figuras 6a y 6b muestran el ajuste de los datos experimentales de secado solar de hojas de orégano utilizando las tecnologías de secado solar directa e indirecta probadas con diferentes modelos matemáticos.

Tabla 3 Coeficientes y parámetros de ajuste para DSD (convección natural y forzada y sombra-malla)

Modelo	Coefficientes y parámetros de ajuste	Valor
	Convección natural	
Weibull	<i>a</i>	0.0036
	<i>b</i>	-0.9986
	<i>k</i>	0.5193
	<i>n</i>	1.2143
	r^2	0.9982
	<i>RMSE</i>	0.0114
Page modificado	X^2	0.0155
	<i>k</i>	0.5777
	<i>n</i>	1.2022
	r^2	0.9981
	<i>RMSE</i>	0.0118
	X^2	6.3689
Page	<i>k</i>	0.5170
	<i>n</i>	1.2022
	r^2	0.9981
	<i>RMSE</i>	0.3864
	X^2	6.3689
	Convección forzada	
Dos términos	<i>a</i>	0.2674
	<i>b</i>	0.7314
	<i>c</i>	1.0980
	<i>d</i>	0.0846
	r^2	0.9895
	<i>RMSE</i>	0.0231
Weibull	X^2	0.0690
	<i>a</i>	-1.3824
	<i>b</i>	-2.3855
	<i>k</i>	0.1183
	<i>n</i>	0.4532
	r^2	0.9922
Page	<i>RMSE</i>	0.0199
	X^2	0.0406
	<i>k</i>	0.2477
	<i>n</i>	0.6854
	r^2	0.9839
	<i>RMSE</i>	0.0286
	X^2	0.1022
	Sombra-malla	
Weibull	<i>a</i>	-0.0295
	<i>b</i>	-1.0114
	<i>K</i>	0.2039
	<i>n</i>	0.9396
	r^2	0.9937
	<i>RMSE</i>	0.0215
Logarítmico	X^2	-0.1163
	<i>a</i>	0.9856
	<i>c</i>	-0.0180
	<i>k</i>	0.1845
	r^2	0.9997
	<i>RMSE</i>	0.0220
Henderson and Pabis	X^2	-0.0345
	<i>a</i>	0.9770
	<i>k</i>	0.1959
	r^2	0.9924
	<i>RMSE</i>	0.0235
	X^2	0.0747

Tabla 4 Coeficientes y parámetros de ajuste para el secado al sol abierto

Modelo	Coeficientes y parámetros de ajuste	Valor
Weibull	a	0.0076
	b	-0.9942
	k	0.2310
	n	1.2287
	r^2	0,9981
	$RMSE$	0.0111
	χ^2	0.0747
Page Modificado	k	0.2982
	n	1.2022
	r^2	0,9976
	$RMSE$	0.0125
	χ^2	1.8242
Page	k	0.2339
	n	1.2006
	r^2	0,9976
	$RMSE$	0.0125
	χ^2	1.8242

Tabla 5 Coeficientes y parámetros del ajuste para el ISD

Modelo	Coeficientes y parámetros de ajuste	Valor
Weibull	a	-0.0737
	b	-1.0801
	k	0.0932
	n	0.9612
	r^2	0,9969
	$RMSE$	0.0150
	χ^2	0.0363
logarítmico	a	1.0554
	c	-0.0585
	k	0.0863
	r^2	0,9968
	$RMSE$	0.0153
Page	χ^2	0.0392
	k	0.0800
	n	1.0851
	r^2	0,9945
	$RMSE$	0.0170
	χ^2	0.0599

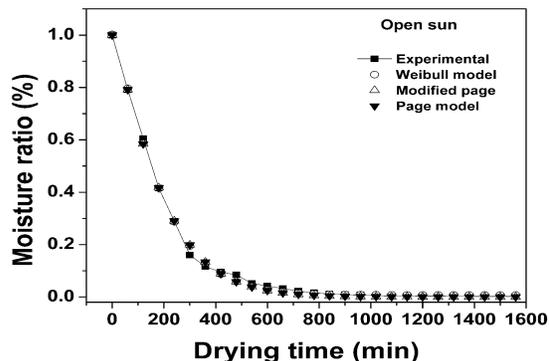
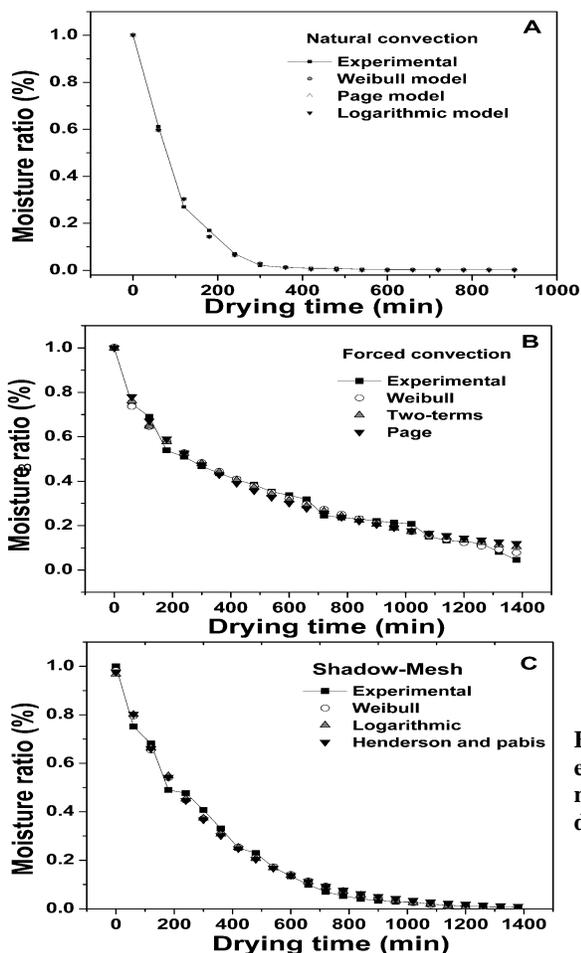


Figura 6b Ajuste de la relación de humedad experimental versus el tiempo de secado obtenido para el sol abierto secado con Modelos de Weibull, Page modificada y Page

Figura 6a Ajuste de la relación de humedad experimental versus el tiempo de secado obtenido para el DSD bajo A) convección natural, B) convección forzada, C) malla sombreada, con diferentes modelos

Conclusiones

En este estudio, la cinética de secado de las hojas de orégano se analizó utilizando las tecnologías DSD y ISD. Los resultados revelaron una calidad superior de los productos secos obtenidos usando ISD, con tiempos de secado entre 1100 y 1200 minutos para alcanzar un contenido de humedad de la materia seca de 0.013 kilogramos agua/kg de materia seca y una tasa de secado de 0.001 kilogramos agua removida/kilogramo min, con un promedio tiempo de secado entre el que se obtiene utilizando DSD bajo modos de cobertura de convección natural y malla sombreada. Además, las condiciones de funcionamiento fueron mejor controladas y se

mantuvo una mayor protección contra los efectos de la temperatura debido a la exposición indirecta a la radiación solar. Un colector solar plano naturalmente funcionado fabricado con los materiales económicos (madera negra y vidrio 3 milímetros de grueso) fue acoplado con el ISD para alcanzar calidad de producto secado aceptable con costo mínimo. Por lo tanto, el ISD se puede considerar como método de secado simple y económico. Aunque el uso de convección natural redujo el tiempo de secado con temperaturas de operación más altas, se detectó pigmentación marrón, que afecta negativamente la calidad del producto seco. La cubierta de malla negra que se integró mejoró la calidad de las hojas secas, redujo el efecto de

la descoloración, y disminuyó los tiempos de sequía comparados a los obtenidos por la convección forzada. Se probaron nueve modelos matemáticos para determinar los parámetros de los modelos apropiados para predecir el comportamiento de secado de las plantas de orégano. Los modelos Weibull, Page y logarítmicos fueron los más aptos para los datos experimentales obtenidos utilizando ISD, con R^2 de 0.9969, 0.9968, y 0.9945, y X^2 de 0.0363, 0.0363 y 0.0599, respectivamente; así,

el contenido de humedad en cualquier momento durante el proceso de secado podría ser estimado confiablemente usando estos modelos. Los hallazgos confirman la viabilidad técnica de utilizar tecnologías de secado solar para hojas de orégano. Se pueden lograr ahorros energéticos significativos evitando el uso de energía convencional durante el proceso de secado, minimizando así los impactos ambientales.

Referencias

- Castillo Téllez, M. *et al.* (2018) ‘Solar drying of Stevia (Rebaudiana Bertoni) leaves using direct and indirect technologies’, *Solar Energy*. Elsevier, 159(November 2017), pp. 898–907. doi: 10.1016/j.solener.2017.11.031.
- Fudholi, A. *et al.* (2014) ‘Performance analysis of solar drying system for red chili’, *Solar Energy*. Elsevier Ltd, 99, pp. 47–54. doi: 10.1016/j.solener.2013.10.019.
- Hossain, M. B. *et al.* (2010) ‘Effect of drying method on the antioxidant capacity of six Lamiaceae herbs’, *Food Chemistry*. Elsevier Ltd, 123(1), pp. 85–91. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.04.003.
- Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. (2002) ‘A new model for single-layer drying’, *Drying Technology*, 20(7), pp. 1503–1513. doi: 10.1081/DRT-120005864.
- Mueller, M. *et al.* (2008) ‘Oregano: a source for peroxisome proliferator-activated receptor gamma antagonists.’, *Journal of agricultural and food chemistry*, 56, pp. 11621–11630. doi: 10.1021/jf802298w.
- Sarracino M., O. *et al.* (2018) ‘Experimental study of dried Oregano leaves (*Plectranthus amboinicus*, Lour) using direct and indirect solar technologies’, *Drying Technology Experimental*, 33(3), pp. 321–332. doi: 10.1080/1478643YYXXXXXXXXXX.
- Vázquez Martínez, A. (2010) *Orégano: oro verde de México – Info Rural*. Available at: <https://www.inforural.com.mx/oregano-oro-verde-de-mexico/> (Accessed: 6 July 2018).
- Wang, C. Y. and Singh, R. P. (1978) ‘A single layer drying equation for rough rice’, *American Society of Agricultural Engineers*, (78), p. 3001. doi: 10.1081/E-EEE2-120046011.