

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CARACTERIZACIÓN DE HOJAS DE MORINGA Y OPTIMIZACIÓN DEL SECADO POR AIRE CALIENTE

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN DE LA
SEGURIDAD Y CALIDAD ALIMENTARIA

ALUMNO/A: Francisco Gil Zanón

TUTOR/A ACADEMICO: María Dolores Ortolá Ortolá

COTUTOR/A: María Luisa Castelló Gómez

DIRECTOR EXPERIMENTAL: Susana Rubio Arraez

Curso Académico: 2018-2019

VALENCIA, 5 de julio de 2019

RESUMEN

La deshidratación por aire caliente es uno de los métodos de conservación de alimentos de uso más extendido en todo el mundo, debido a su efectividad y a su relativa simpleza. En el cultivo de la moringa es muy común observar a los agricultores utilizar el método tradicional de secado al sol, un método que requiere de varios días para que el producto alcance el nivel de humedad deseada, dependiendo de las condiciones climáticas. En este trabajo, se ha evaluado el efecto de la temperatura del aire (30, 40 y 50°C) en el proceso de secado por aire caliente de hojas de moringa y su impacto en algunas propiedades nutricionales (capacidad antioxidante y proteínas) y fisicoquímicas (contenido en humedad y color) modelizando la operación. El modelo de Page presentó un mejor ajuste a los datos experimentales. 50°C parece ser una temperatura óptima de secado de estas hojas por su rapidez sin comprometer los valores nutricionales evaluados de las mismas.

Además, se evaluó la influencia de la zona de cultivo (UPV, Benagéber y Montserrat) en diversos parámetros fisicoquímicos de la moringa, encontrándose pequeñas diferencias entre ellas, fundamentalmente en las propiedades mecánicas, como consecuencia de la rápida pérdida de turgencia tras la recolección.

PALABRAS CLAVE: Moringa, secado, modelos cinéticos, proteína, capacidad antioxidante

ABSTRACT

Hot-air dehydration is one of the most widely used methods of food preservation in the world, due to its effectivity and ease of use. It is very common to see moringa farmers using the traditional solar-drying method, which requires some days of processing before the product reaches the desired moisture levels and is heavily influenced by weather conditions. In this study, the effect of air temperature (30, 40, 50°C) on the process of hot-air drying of moringa leaves has been evaluated, as well as its impact on some nutritional (antioxidant capacity, proteins) and physicochemical properties (moisture content and color), later modeling the process. Page model showed the best fitness to the experimental data. 50°C seemed to be the optimum drying temperature for the leaves due to its swiftness while not having any negative effect on the studied nutritional values of theirs.

Furthermore, the influence of the farming location (UPV, Benagéber, Montserrat) on different physicochemical parameters of moringa was evaluated, finding little differences between them, mainly in mechanical properties, as a consequence of the quick loss of its consistency after the harvesting.

KEYWORDS: Moringa, drying, kinetic models, protein, antioxidant capacity

RESUM

La deshidratació per aire calent és un dels mètodes de conservació d'aliments més estesos en tot el món, per la seua efectivitat i facilitat d'operació. En el cultiu de la moringa és molt comú observar els agricultors utilitzar el mètode tradicional d'assecat al sol, un mètode que requereix d'uns quants dies perquè el producte arribe al nivell d'humitat desitjada, depenent de les condicions climàtiques. En este treball, s'ha avaluat l'efecte de la temperatura de l'aire (30, 40 i 50°C) en el procés d'assecat per aire calent de fulls de moringa i el seu impacte en algunes propietats nutricionals (capacitat antioxidant i proteïnes) i fisicoquímiques (contingut en humitat i color) modelitzant l'operació. El model de Page va presentar un millor ajust a les dades experimentals. 50°C pareix una temperatura òptima d'assecat d'estos fulls per la seua rapidesa sense comprometre els valors nutricionals avaluats de les mateixes.

A més, es va avaluar la influència de la zona de cultiu (UPV, Benagéber i Montserrat) en diversos paràmetres fisicoquímics de la moringa, trobant-se poques diferències entre elles, fonamentalment en les propietats mecàniques, com a conseqüència de la ràpida pèrdua de turgència després de la recol·lecció.

PARAULES CLAU: Moringa, assecat, models cinètics, proteïna, capacitat antioxidant

1. INTRODUCCIÓN

Moringa oleifera Lam., referido en español como Moringa y conocido popularmente en inglés como “drumstick tree” o “horseradish tree”, es un árbol caducifolio de pequeño tamaño (7-12 metros de altura) que presenta una gruesa corteza de color gris, flores blancas y largas vainas verdes (Makkar y Becker, 1996).

Moringa oleifera es la especie más ampliamente cultivada en todo el mundo de la familia Moringaceae (Fahey, 2005), dentro de la cual existen diferentes variedades cuyas semillas presentan sabores que van desde dulce hasta muy amargo (Makkar y Becker, 1996).

Esta especie es nativa de regiones del subhimalaya, India, Pakistán, Asia Menor, África y Arabia, aunque en la actualidad se encuentra también distribuida en Filipinas, Camboya, América Central, Norte y Sur y las Islas del Caribe (Anwar *et al.*, 2007). Presenta un óptimo desarrollo fisiológico bajo climas tropicales insulares, aunque también puede crecer bien en zonas húmedas del trópico y en zonas secas y calurosas (Anwar *et al.*, 2007). Tolerancia un amplio rango de precipitación anual, estimado en 250 mm para el mínimo y en 3000 mm para el máximo, a un pH entre 5 y 9 (Palada y Changl, 2003). Las hojas pueden ser recolectadas una vez las plantas han crecido hasta los 1,5-2 m, lo que suele tardar un año (Palada y Changl, 2003). Desde el punto de vista agronómico, se considera una planta de alto rendimiento. Reyes

(2006) recomienda un corte de las hojas cada 75 días para una producción de biomasa intensiva.

Es considerado como uno de los árboles de mayor utilidad del mundo, dado que prácticamente cada una de sus partes puede ser utilizada para alimentación, medicina y/o propósitos industriales (Khalafalla *et al.*, 2010). Existen variaciones considerables en el valor nutricional de *Moringa oleifera* en función de diversos factores, como son la herencia genética, el ambiente de desarrollo o los métodos de cultivo (Moyo *et al.*, 2011). No obstante, se ha demostrado que las hojas son ricas en β -caroteno (6-18 mg/100g), proteína (6-10 g/100 g), vitamina C (100-220 mg/100 g), calcio (\approx 440 mg/100 g) y potasio (\approx 260 mg/100g) (Anwar *et al.*, 2006; Alakali *et al.*, 2015; Abbas *et al.*, 2018, Moyo *et al.* 2011; Gopalakrishnan *et al.*, 2016, Ahmed *et al.*, 2016). Además, actúan como fuente natural de aminoácidos azufrados (metionina y cisteína), lo que les aporta cierto grado de actividad antioxidante (Foidl *et al.*, 2001).

Las hojas jóvenes son comestibles en crudo en ensaladas o cocinadas de forma similar a las espinacas. Como se ha comentado anteriormente, estas hojas son una fuente excepcional de provitamina A, vitaminas B y C, así como minerales (hierro, en particular) y aminoácidos azufrados (metionina y cisteína) (Foidl *et al.*, 2001). Las vainas frescas son muy sabrosas y pueden ser hervidas e ingeridas como judías verdes. Las semillas deben ser hervidas previamente a su consumo con el fin de separar las finas cáscaras que las envuelven y que aportan un sabor amargo (Foidl *et al.*, 2001). El aceite extraído de la semilla tiene propiedades fisicoquímicas equivalentes al aceite de oliva y contiene una gran cantidad de tocoferoles (Chuang *et al.*, 2007).

La deshidratación (o secado) es el método de preservación más comúnmente utilizado para prolongar la vida útil de plantas y especias. Además, el secado aporta una mayor facilidad a la hora del manejo y transporte de dichos alimentos. Este método de estabilización también favorece que los productos puedan ser fácilmente triturados o pulverizados para, posteriormente, ser utilizados con fines en las industrias tanto nutricional como farmacéutica (Shaw *et al.*, 2007).

De forma tradicional, la moringa se ha secado al aire libre en períodos de hasta 2 semanas de duración. Este proceso trae diversos inconvenientes, entre los que se pueden destacar que es un proceso lento debido a la alta humedad relativa ambiente; el producto puede no llegar a secarse correctamente y enmohecerse o pudrirse, además de quedar expuesto al polvo, insectos y otros animales que pueden comprometer tanto la calidad como la seguridad de su consumo y, también, que queda expuesto a agentes externos como la lluvia (UNESCO, 2005). Además, el secado al sol provoca pérdidas marcadas en vitaminas A y C, debido a la exposición de la materia a secar a grandes dosis de radiación solar, particularmente a rayos ultra violeta, que catalizan la oxidación de carotenoides conduciendo a la pérdida de actividad de vitaminas (Anuja y Ramkumar, 2017).

Por todo lo comentado anteriormente, el objetivo de este trabajo fin de máster fue evaluar la influencia de la zona de cultivo sobre algunas características de las hojas, así como optimizar las condiciones de secado con aire caliente de hojas de moringa. Para ello, se considerarán tres temperaturas de proceso (30, 40 y 50°C), modelizando la operación y analizando los cambios en algunas propiedades de las hojas como humedad, contenido en proteínas, propiedades mecánicas y ópticas y capacidad antioxidante.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materia prima

Se recogieron hojas de moringa en parcelas ubicadas en la UPV (Valencia), Montserrat y Benagéber durante el periodo comprendido entre septiembre y octubre de 2018. Todos los análisis, así como el secado, se hicieron recién recolectadas las hojas.

2.2 Determinaciones analíticas en hojas frescas

En las hojas frescas se analizó humedad por el método gravimétrico AOAC (2000), Además, se midió la cantidad de proteína mediante el método Kjeldahl y la capacidad antioxidante por espectrofotometría según el método del DPPH (Brand-Williams et al., 1995). Por otra parte, se registraron las dimensiones de la hoja con un pie de rey digital, así como las propiedades ópticas (sistema CIEL*a*b*), utilizando un espectrocolorímetro (CM-3600D, Konica Minolta, Tokio, Japón) y las propiedades mecánicas mediante un test de punción (TA.XTplus Texture analyzer, Stable Micro Systems, Godalming, UK) utilizando una sonda de 0,2 mm. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, excepto en las propiedades ópticas y mecánicas que se analizaron en 20 hojas de cada procedencia.

2.3 Secado de hojas

Las hojas de moringa se secaron durante 2, 4, 6, 8 y 24 horas, utilizando un secador de bandejas (POL-EKO APARATURA, Wodzisław Śląski, Polonia), variando la temperatura del aire (30, 40 y 50°C) a una velocidad del aire de 1 m/s. A diferentes tiempos de secado se sacaron muestras para su análisis, analizándose la variación de masa, color, capacidad antioxidante y contenido en proteínas de las hojas, con los mismos métodos analíticos descritos en el punto anterior. Todos los análisis se hicieron por cuadruplicado.

La cinética de secado se ajustó a diferentes modelos seleccionados a partir de su uso en trabajos relacionados con el secado de materiales vegetales

realizados por diversos autores (Arslan y Özkan, 2012; Mirzaee *et al.*, 2010; Premi *et al.*, 2010; Kadam *et al.*, 2011). A continuación, en la Tabla 1, se indican las ecuaciones utilizadas en cada modelo.

Tabla 1. modelos de cinética de secado

Modelo	Fuerza impulsora (Y)
Newton	$\exp(-k \cdot t)$
Page	$\exp(-k \cdot t^n)$
Wang y Singh	$1 + a \cdot t + b \cdot t^2$
Logarítmico	$a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$
Exponencial	$a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$
Henderson-Pabis	$a \cdot \exp(-k \cdot t)$
Magee	$a + k \cdot \sqrt{t}$

2.4 Análisis estadístico

Todos los parámetros se sometieron a un análisis de la varianza utilizando el software Statgraphics Centurion XVI.II (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, Virginia, USA).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización fisicoquímica de hojas frescas de Moringa

En la Tabla 2 se presentan los valores de humedad, capacidad antioxidante, contenido en proteínas y dimensiones de hojas de Moringa cultivadas en diferentes parcelas de la provincia de Valencia durante la campaña del 2018. Como puede observarse, las dimensiones de las hojas no presentaron diferencias significativas en función de la parcela. Sin embargo, las hojas procedentes de las parcelas de la UPV y de Benagéber presentaron un contenido de proteínas y de capacidad antioxidante significativamente superiores a las de Montserrat. Respecto al porcentaje de humedad, aunque las hojas de Benagéber mostraron un valor significativamente inferior, sólo fue un 3% más bajo que el resto. En comparación a los valores publicados en otras fuentes, la composición es bastante similar. Así, según la Asociación Valenciana de Productores y Consumidores de Moringa (AVAMOR, 2016) y McBurney *et al.* (2004), el contenido de proteína fue de 5,9 % y 6,7 % respectivamente, mientras que el de humedad fue de 78 % y 75 %. Por otra parte, Zoro *et al.* (2015) reportan valores de actividad antioxidante (100 - % inhibición del DPPH) del orden de 80% en vegetales de hoja africanos de alto valor nutricional, en el rango de los encontrados en este trabajo.

Tabla 2. Contenido en agua (x_w), humedad en base seca (X_w), capacidad antioxidante y dimensiones de hojas de Moringa en función del lugar de la parcela de procedencia

Procedencia	x_w (g agua/g muestra)	X_w (g agua/g ms)	Proteína (g/100g)	Cap. Antiox. (% inhibición DPPH)	Dimensiones hoja (mm)	
					Largo	Ancho
UPV	$0,771 \pm 0,010^b$	$3,37 \pm 0,18^b$	$8,72 \pm 0,12^b$	$27,1 \pm 1,8^b$	18 ± 5^a	12 ± 4^a
Benagéber	$0,7391 \pm 0,0016^a$	$2,83 \pm 0,02^{ab}$	9 ± 2^{ab}	$29,3 \pm 1,6^b$	19 ± 4^a	12 ± 5^a
Montserrat	$0,757 \pm 0,010^b$	$3,12 \pm 0,16^b$	$6,9 \pm 0,2^a$	$23,31 \pm 1,01^a$	18 ± 3^a	12 ± 3^a

Letras iguales indican los grupos homogéneos obtenidos en una ANOVA con un nivel de significancia del 95%

3.2 Propiedades mecánicas y ópticas de hojas frescas de Moringa

En la Tabla 3 se muestran los resultados de fuerza máxima y de consistencia obtenidos de hojas frescas de moringa en función del lugar donde fueron cultivadas. Asimismo, en la Figura 1 se presentan, a modo de ejemplo, tres curvas del ensayo mecánico de punción. Los valores obtenidos ponen de manifiesto que las hojas cultivadas en la UPV fueron más firmes y tuvieron más consistencia que las procedentes de Benagéber o Montserrat. Esto podría deberse a la proximidad de la parcela de la UPV al IUIAD que supuso una menor pérdida de turgencia en el trayecto hasta su análisis.

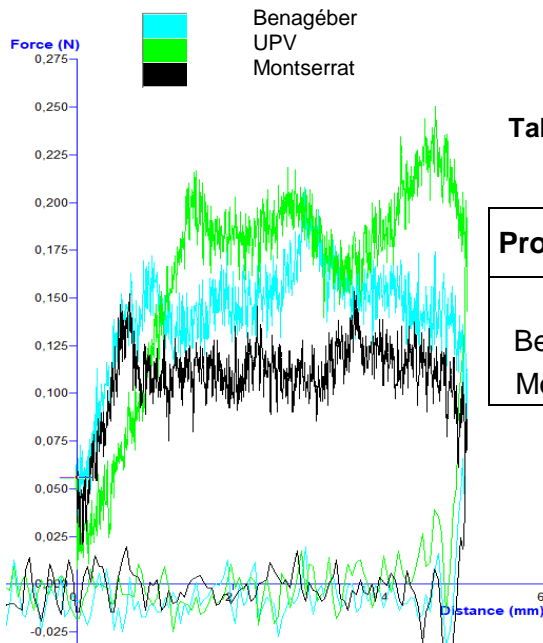


Tabla 3. Fuerza máxima y consistencia de hojas de moringa fresca según su procedencia

Procedencia	Fuerza máx. (N)	Consistencia (N·s)
UPV	$0,22 \pm 0,05^b$	$0,70 \pm 0,14^b$
Benagéber	$0,17 \pm 0,05^a$	$0,51 \pm 0,20^a$
Montserrat	$0,16 \pm 0,04^a$	$0,50 \pm 0,18^a$

Figura 1. Gráfico de fuerza máxima de hojas frescas.

En la Figura 3 se presenta la ubicación en el diagrama cromático b^* - a^* de las hojas de moringa en función de la procedencia y de la parte de la hoja considerada (haz y envés). Como se puede observar, la coordenada a^* fue significativamente menor en el envés de las hojas de la moringa cultivada en la UPV, dando lugar a un color más verde. No obstante, las diferencias de la coordenada a^* fueron menores que las registradas en la coordenada b^* , destacando los valores significativamente superiores de b^* en el envés de la hoja poniendo de manifiesto la mayor coloración amarillenta de esta zona, independientemente de la procedencia de la hoja.

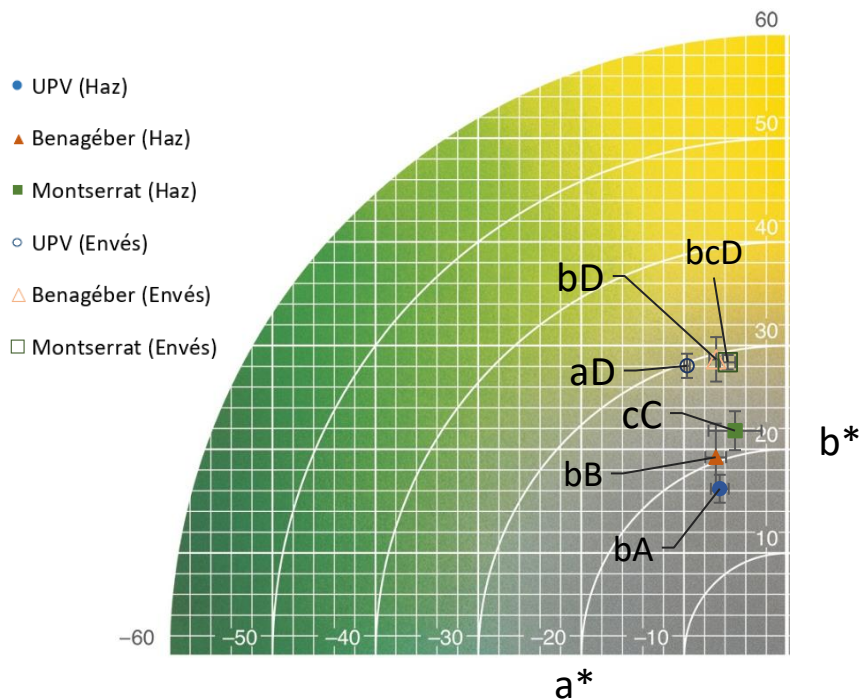


Figura 3. Ubicación en el diagrama cromático de los datos de las muestras de hoja fresca. Letras mayúsculas indican los grupos homogéneos obtenidos del ANOVA de la coordenada b^* . Letras minúsculas indican los grupos homogéneos obtenidos del ANOVA de la coordenada a^* .

En la Figura 4 se muestran los valores de la luminosidad (L^*) de las hojas de moringa de cada una de las procedencias, tanto en el haz de la hoja como en el envés. El haz de las hojas procedentes de la UPV mostró un valor de L^* ligeramente inferior al de las hojas de Benagéber y de Montserrat, que no mostraron diferencias significativas entre ellas. Por otra parte, todos los valores de L^* del envés de las hojas se mantuvieron más de 10 unidades por encima de sus respectivos valores para el haz, sin mostrar diferencias significativas por efecto de la procedencia.

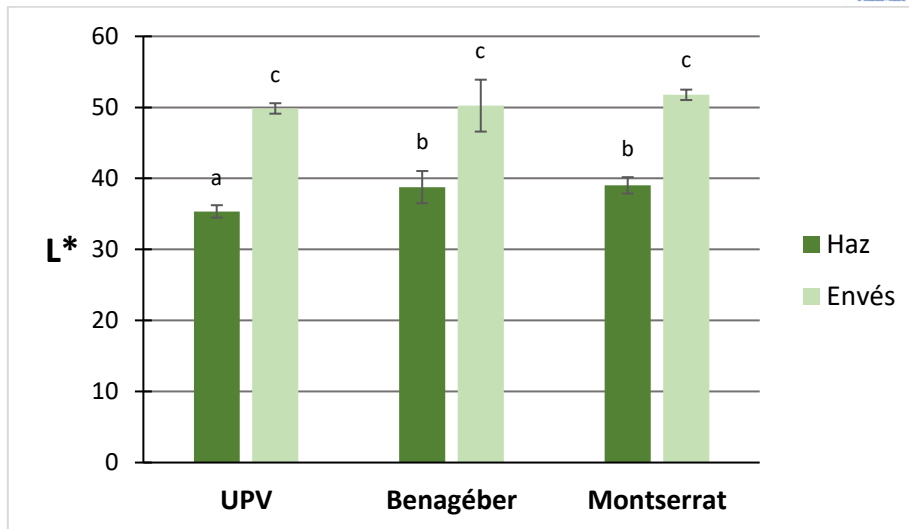


Figura 4. Diferencias en la coordenada L* en función de la procedencia.

Esta diferencia de coloración entre el haz y el envés de una hoja se debe a que la epidermis de la cara abaxial del limbo de la hoja de una planta casi siempre presenta una cutícula más fina, así como una mayor densidad de estomas y tricomas. Este hecho, unido a que la clorofila sólo se encuentra en el haz de la hoja, provoca que prácticamente la totalidad de las plantas presenten una coloración sensiblemente más blanquinosa (mayor valor de L*) en el envés de las hojas.

En la Figura 5 se muestran las diferencias de color entre las hojas de distinta procedencia, calculadas tomando como referencia las coordenadas de color de las hojas cultivadas en la UPV. Como puede observarse, estas diferencias son mayores de 3 puntos, por lo que el ojo humano detectará fácilmente que existen diferencias entre ellas. Al igual que se había comentado anteriormente, las hojas de Benagéber y Montserrat no muestran diferencias entre ellas.

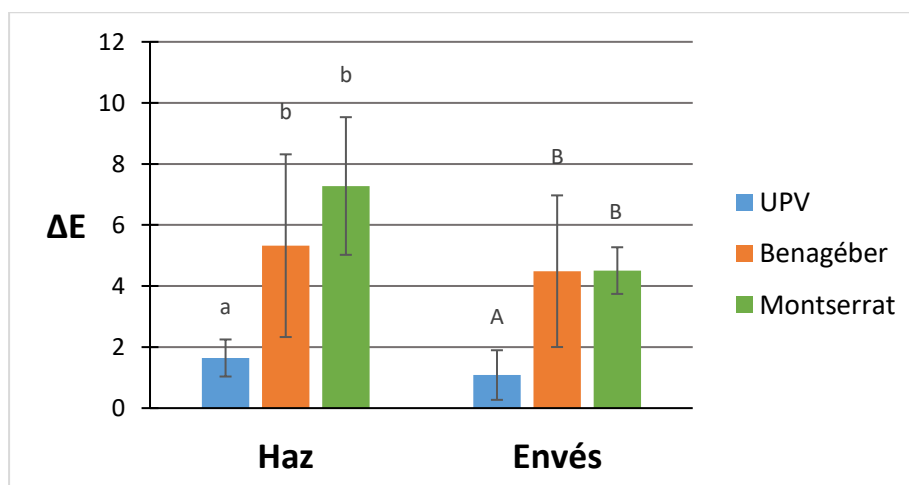


Figura 5. Diferencia de color en función de la procedencia de la hoja.

3.3 Secado en aire caliente de hojas

MODELIZACIÓN DEL SECADO

Numerosos modelos cinéticos han sido descritos para predecir el comportamiento de productos alimentarios durante el secado por aire caliente. Estos modelos se utilizan para estimar el tiempo de secado de productos de diversas características bajo diferentes condiciones de secado y para maximizar la eficiencia del proceso, así como para generalizar curvas de secado para el diseño y operación de secadores. Varios investigadores han propuesto numerosos modelos matemáticos para el secado en capa fina de diferentes productos agrícolas (Ertekin y Firat, 2015).

En la Tabla 3 se muestran los parámetros obtenidos en los ajustes de cada uno de los modelos, así como el valor de la R^2 ajustada, el error estándar estimado y el error medio absoluto.

El criterio para la determinación del modelo con mayor bondad de ajuste se redujo a la observación del coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustada) y el error medio absoluto (Akoy, 2014). Así, el modelo de Page parece ajustarse bien a los valores experimentales, con un alto valor de R^2 y un error medio absoluto reducido.

Como puede observarse en dicha tabla, los valores de R^2 ajustada resultaron bastante altos en la mayoría de los modelos estudiados, con la excepción de dos modelos. El primero de ellos fue el de Wang y Singh, que, a pesar de mostrar buenos valores de R^2 en las temperaturas de 30 y 40°C, no fue posible su ajuste para la temperatura de 50°C. El otro modelo que no reportó buenos valores de R^2 fue el de Magee. Este modelo obtuvo uno de los valores más altos de R^2 para la temperatura de 30°C. No obstante, disminuyó al aumentar la temperatura. El resto de modelos presentaron, de forma general, unos valores del coeficiente de determinación ajustado relativamente altos, comprendidos entre el 95 y 99%. De todos, el modelo logarítmico alcanzó el mayor valor de R^2 . Sin embargo, se seleccionó como modelo que representa la cinética de secado de estas hojas el modelo de Page, dado que mostró el menor valor de error medio absoluto, ofreciendo además la ventaja de ser un modelo más simple, por utilizar dos coeficientes frente a los tres del modelo logarítmico.

El modelo de Page, es una modificación empírica diseñada para eliminar las carencias del modelo de Lewis mediante la adición de una constante empírica adimensional (n) al término del tiempo. Este parámetro tiene un efecto amortiguador en la evolución del término temporal del modelo, haciendo que sea más efectivo en la predicción de la pérdida de humedad en ciertos escenarios (Ertekin y Firat, 2015). Por otra parte, el coeficiente k representa la constante de secado (s^{-1}), siendo esta función de la temperatura. Su valor se incrementa conforme lo hace la temperatura de secado (Akoy, 2014). Este modelo ha sido utilizado por varios investigadores para describir la pérdida de humedad en material vegetal durante procesos de secado de capa fina y bajo condiciones constantes. Ha sido empleado para describir de

forma precisa la cinética de secado de productos como tomate, trigo, dátiles y bayas (Ertekin y Firat, 2015) o tomillo (da Rocha *et al.*, 2012). Además, diversos autores han utilizado este modelo con ligeras modificaciones para la modelización del secado de menta y albahaca (Akpınar, 2006) o setas por Kurozawa *et al.* (2012).

Los coeficientes del modelo de Page ajustados muestran que la magnitud de la constante de secado (k), que representa el efecto de las condiciones externas de secado (Siqueira *et al.*, 2012), aumentó su valor con el incremento de la temperatura del aire. Según Babalis y Belessiotis (2004), la constante de secado (k) puede ser utilizada como una forma de caracterizar el efecto de la temperatura y está relacionada con la difusividad efectiva en el período en el que se ralentiza la velocidad de secado durante el proceso de deshidratación, poniendo en evidencia que la velocidad de secado se ve incrementada cuando también lo hace la temperatura.

Por otro lado, el coeficiente n , que refleja la resistencia interna del producto a la difusión del agua durante el proceso de deshidratación, suele disminuir su valor al aumentar la temperatura del aire de secado. Esto es debido a la mayor diferencia de presión de vapor entre la corriente de aire de secado y el interior del producto (Siqueira *et al.*, 2012). En nuestro caso, el valor de n aumentó ligeramente al pasar de 30 a 40°C, aunque sí se observa una disminución a los 50°C.

En la Figura 6 se muestra la evolución de la fuerza impulsora (Y) con el tiempo de secado en función de la temperatura del aire, obtenidos de forma experimental junto a los valores predichos por el modelo de Page.

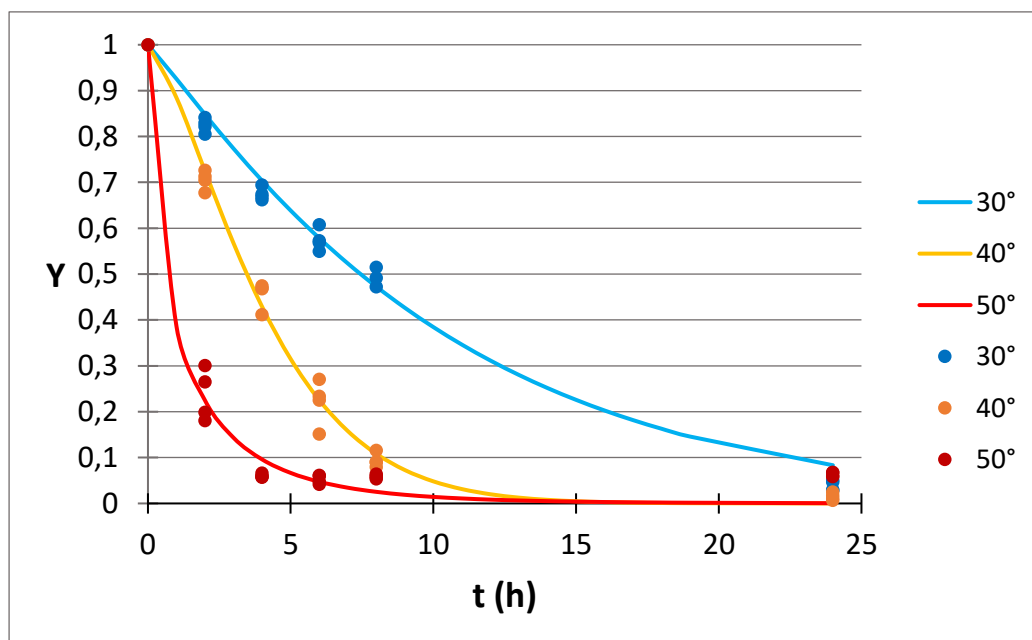


Figura 6. Evolución fuerza impulsora durante el secado de hojas de moringa en función de la temperatura del aire según los valores predichos por el modelo Page (líneas continuas) y valores experimentales (puntos)

Tabla 3. Parámetros de los modelos de secado de moringa.

Modelo	T (°C)	k	n	a	b x 10 ³	C	R ² ajustada	Error estándar estimado	Error medio absoluto
Newton	30	0,097 ± 0,003	-	-	-	-	98,6276	0,0342892	0,0253164
	40	0,22 ± 0,01	-	-	-	-	96,1693	0,0579973	0,0461749
	50	0,70 ± 0,04	-	-	-	-	95,0583	0,0469605	0,0391708
Page	30	0,079 ± 0,007	1,11 ± 0,05	-	-	-	98,9653	0,0297737	0,023305
	40	0,123 ± 0,012	1,39 ± 0,06	-	-	-	98,888	0,0312476	0,0229989
	50	0,95 ± 0,12	0,65 ± 0,11	-	-	-	95,7672	0,0434621	0,0355303
Wang & Singh	30	-	-	-0,081 ± 0,002	1,72 ± 0,08	-	99,2069	0,0260666	0,0196828
	40	-	-	-0,154 ± 0,002	4,71 ± 0,09	-	98,9554	0,0302863	0,0196966
	50	-	-	-	-	-	-	-	-
Logarítmico	30	0,073 ± 0,005	-	1,13 ± 0,03	-	-0,15 ± 0,03	99,542	0,0198077	0,0180169
	40	0,24 ± 0,02	-	1,11 ± 0,05	-	-0,02 ± 0,03	96,7394	0,0535077	0,0428838
	50	0,84 ± 0,05	-	0,95 ± 0,03	-	0,051 ± 0,008	98,341	0,0272094	0,0196241
Two-term exponential	30	19 ± 88	-	0,01 ± 0,02	-	-	98,5132	0,0356896	0,0254792
	40	24 ± 39	-	0,009 ± 0,02	-	-	95,7918	0,0607877	0,0470309
	50	1,3 ± 1,9	-	0,4 ± 0,5	-	-	95,329	0,0456562	0,0384418
Henderson & Pabis	30	0,100 ± 0,005	-	1,02 ± 0,02	-	-	98,6096	0,0345135	0,0262988
	40	0,245 ± 0,014	-	1,09 ± 0,04	-	-	96,8035	0,0529791	0,0414095
	50	0,70 ± 0,05	-	0,99 ± 0,05	-	-	94,8038	0,0481548	0,0394837
Magee	30	-0,214 ± 0,005	-	1,1 ± 0,02	-	-	98,8415	0,0315036	0,0202565
	40	-0,19 ± 0,02	-	0,84 ± 0,07	-	-	74,9573	0,148289	0,128779
	50	-0,09 ± 0,03	-	0,37 ± 0,09	-	-	29,6097	0,177236	0,119219

Como se puede observar, un mayor valor de la constante de secado (k) se traduce en un aumento de la pendiente, y por tanto en una mayor velocidad de secado.

En el caso de la moringa, frecuentemente se pueden encontrar pulverizados o pastillas en formato comercial, cuyo contenido en humedad está indicado en un intervalo entre el 6 y el 8%. Según Zheng et al. (2016), el contenido óptimo de humedad para un producto a base de hoja de moringa en polvo es del 7%. Considerando este nivel de humedad óptimo, el tiempo necesario para cada una de las temperaturas sería de 24 horas para 30°C (6,6%), 9 horas a 40°C (6,1%) o 4 horas a 50°C (7,1%).

De esta forma, se puede considerar que el secado a 50°C podría ser el más eficiente (menores tiempos de secado) a falta de hacer un estudio económico de costes.

EVOLUCIÓN DEL COLOR

A continuación, en la Figura 7, se expone la evolución de la diferencia de color (ΔE) para las hojas que fueron sometidas a secado por aire a temperaturas de 30, 40 y 50 °C, calculada tomando como referencia las coordenadas de color obtenidas para las hojas de moringa en fresco ($t = 0$).

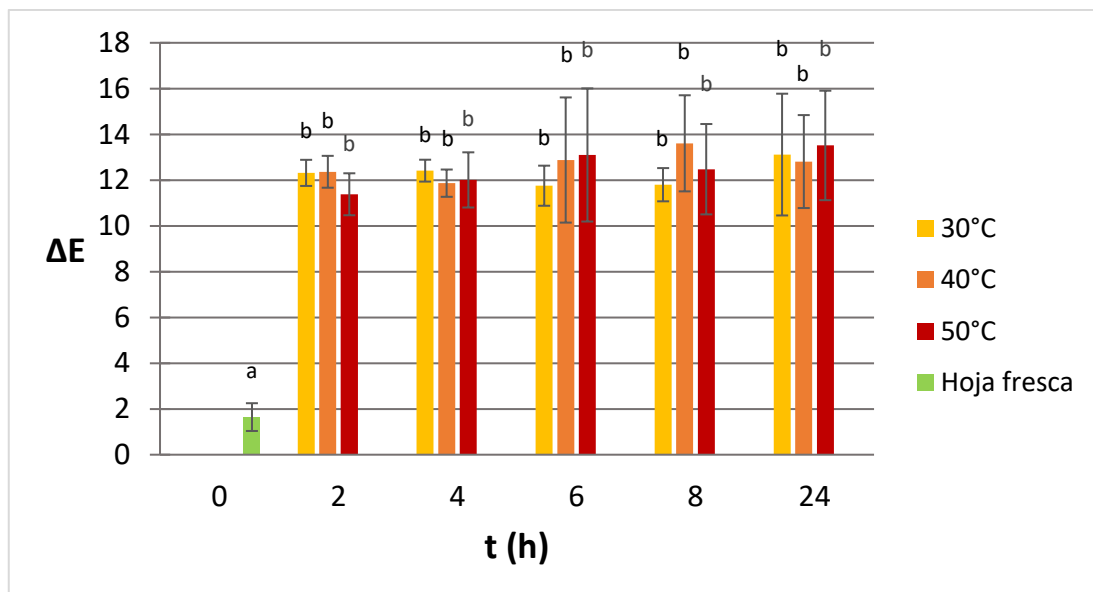


Figura 7. Diferencia de color a lo largo del proceso de secado.

Como puede observarse, en las primeras dos horas de secado se alcanzó un nivel de diferencia de color respecto a la hoja fresca de moringa similar para todas las temperaturas de secado, sin observarse cambios significativos por efecto del mayor tiempo de secado. Por tanto, la totalidad del viraje del color de las hojas por efecto de la pérdida de humedad se completa antes de pasadas 2 horas del proceso de secado para las 3 temperaturas estudiadas. Sin embargo, Ali et al. (2014) señalan un aumento en los tonos amarillentos

de la hoja (disminución de la coordenada a^* , aumento de la coordenada b^*) a medida que aumenta la temperatura de secado (40, 50 y 60 °C) de hojas de Moringa.

Las hojas frescas sometidas a deshidratación experimentan una pérdida en el tono verdoso (coordenada a^*) debido a la degradación de la clorofila, pigmento responsable de dicha coloración en hojas de plantas y árboles. Esta alteración de la clorofila se da cuando se produce la pérdida de un átomo de magnesio en sustitución de dos iones H^+ , dando lugar a la feofitina, molécula que aporta tonos entre verde oliva y marrón (Calvo, 2019).

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE

La Figura 8 muestra los resultados de los análisis de determinación de la capacidad antioxidante en función de la temperatura (40 y 50 °C) y del tiempo de secado. El primer análisis se realizó a las 6 horas de secado en los dos casos, pero al no observarse diferencias significativas por efecto de la temperatura ni del tiempo, se decidió ampliar el estudio incluyendo las primeras horas del proceso. Aun así, el porcentaje de inhibición del DPPH aumentó a las dos horas de secado hasta niveles del 80%, manteniéndose independientemente del tiempo y la temperatura de secado.

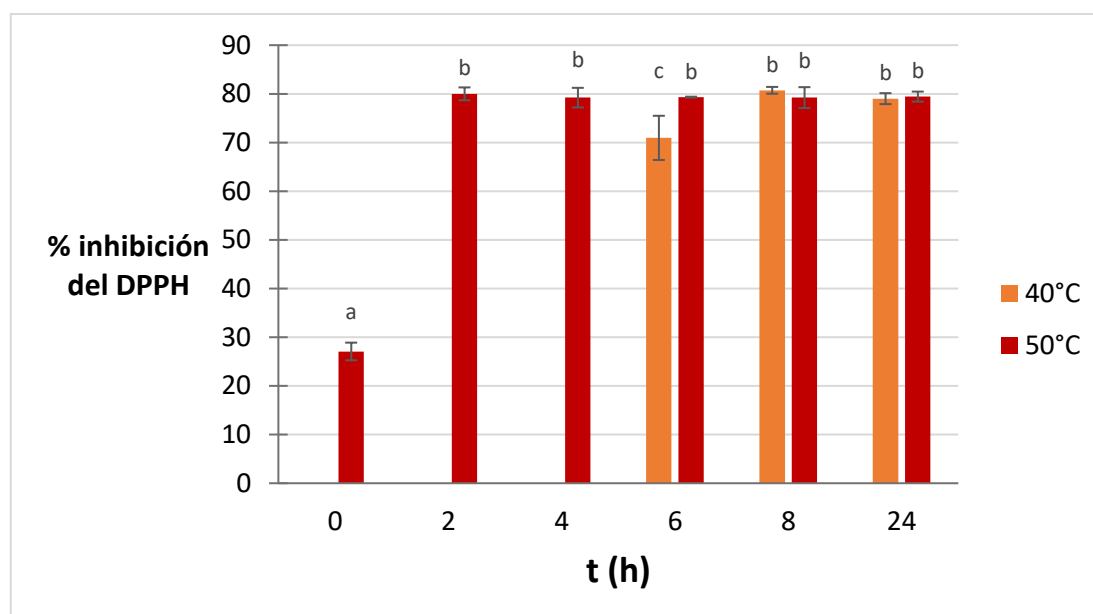


Figura 8. Evolución de la capacidad antioxidante entre los secados a 40 y 50 °C

Sreelatha y Padma (2009) indican que las hojas de moringa presentan una actividad antioxidante muy potente, encontrándose diferencias muy pequeñas entre las hojas maduras ($18,15 \pm 0,92 \mu\text{g/mL}$) y las más jóvenes ($19,12 \pm 0,75 \mu\text{g/mL}$), expresada en términos de IC_{50} (cantidad de muestra necesaria para inhibir en un 50% la concentración de DPPH). Este potencial antioxidante puede ser atribuido a la presencia de componentes polifenólicos en las hojas,

pudiendo ser beneficioso para el sistema de protección antioxidante humano contra el daño oxidativo.

Cabe destacar que las hojas secas tienen un mayor poder antioxidante que las hojas frescas (Figura 8). Este aumento estaría relacionado con la menor cantidad de agua de la hoja seca y por tanto la concentración de los componentes antioxidantes en el producto tal y como se concluye en la investigación llevada a cabo por Zoro *et al.* (2015), donde se realizó un análisis de la capacidad antioxidante en hojas de *Abelmoschus esculentus*, *Celosia argentea*, *Ipomea batatas*, *Manihot esculenta* y *Myrianthus arboreus*, donde la capacidad antioxidante media en las hojas frescas fue de 24,70%, aumentando hasta un valor medio del 89,96% tras el periodo de secado.

EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO EN PROTEÍNAS

El contenido de proteínas en las hojas frescas procedentes de la UPV fue de 8,72 g/100 g. Durante las primeras horas del secado a 50°C se alcanza un porcentaje promedio de 29% (Figura 9), manteniéndose en estos niveles hasta las 24 horas de secado. Este dato está en concordancia con los reportados por Moyo *et al.* (2011) que fue del 30% en hoja de moringa seca.

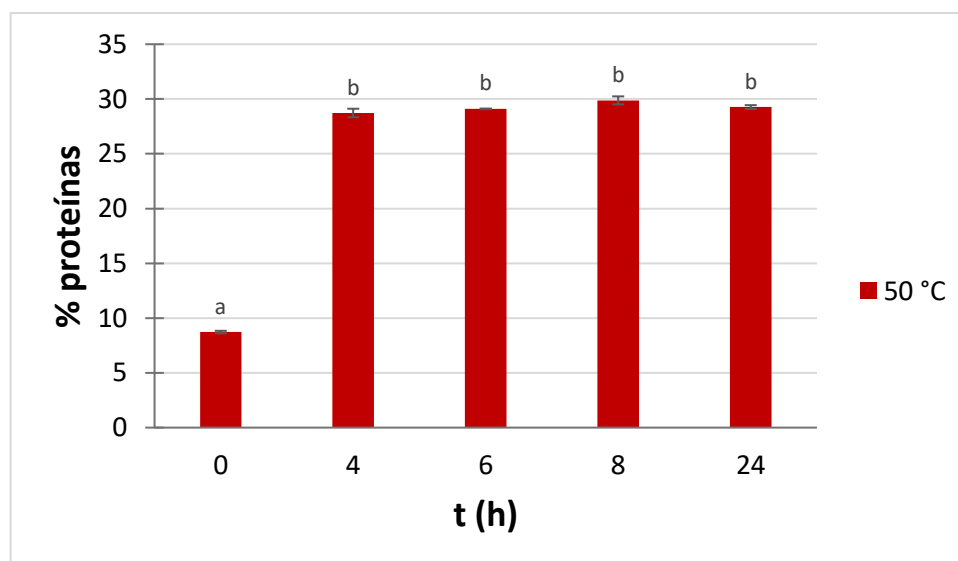


Figura 9. Concentración del porcentaje de proteínas durante el secado a 50 °C

Además, el aumento en proteínas por efecto de la concentración también fue observado por Zoro *et al.* (2015), en la que se reporta un valor medio de 22,12% de proteínas tras el secado, partiéndose de un contenido medio de 8,68% en hoja fresca.

Según Vyankatrao (2014), el contenido en proteínas fue máximo en el secado a estufa a 60 °C de hojas de menta, cilantro, curry y melón amargo. En todos los casos, el mínimo contenido se dio cuando las hojas fueron secadas al sol. No obstante, Omojola y Olusola (2009) reportaron que, para una variedad de vegetales de hoja verde (*Vernonia amygdalina*, *Amaranthus*

tricolor y *Telfairia occidentalis*) el contenido en proteína disminuía conforme se sucedían los días de secado al sol. En este sentido, el secado controlado por aire caliente podría reducir las pérdidas de proteínas registradas en otros sistemas de secado más tradicionales.

4. CONCLUSIONES

Las características de las hojas de moringa cultivadas en las tres zonas evaluadas son bastantes similares, aunque cabe destacar la rapidez con que las hojas pierden turgencia tras la recolección, por lo que se recomendaría una manipulación muy rápida postcosecha, manteniendo una humedad alta en la conservación.

El modelo de Page parece ser adecuado para describir la cinética de secado de hojas de moringa.

El rango de temperaturas del aire estudiadas influye notablemente en la velocidad de secado. Además, la temperatura no afecta a la concentración de proteínas ni a la actividad antioxidante, por lo que una temperatura de 50°C podría recomendarse para estabilizar el producto en 4 horas.

5. REFERENCIAS

- Abbas, R.K., Elsharbasy, F.S., Fadlemula, A.A., 2018. Nutritional Values of *Moringa oleifera*, Total protein, Amino Acid, Vitamins, Minerals, Carbohydrates, Total Fat and Crude Fiber, under the Semi-Arid Conditions of Sudan. *Journal of Microbial & Biochemical Technology* 10:2.
- Ahmed, K.S., Banik, R., Hossain, M.H., Jahan, I.A., 2016. Vitamin C (L-Ascorbic Acid) Content in Different Parts of *Moringa oleifera* Grown in Bangladesh. *American Chemical Science Journal* 11(1): 1-6, 2016, Article no.ACSJ.21119.
- Akoy, E.O.M., 2014. Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices. *International Food Research Journal* 21(5): 1911-1917 (2014).
- Akpinar, E.K., 2006. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering* Volume 77, Issue 4, December 2006, Pages 864-870.
- Alakali, J.S., Kucha, C.T., Rabi, I.A. 2015. Effect of drying temperature on the nutritional quality of *Moringa oleifera* leaves. *African Journal of Food Science* Vol. 9(7), pp. 395-399.
- Ali, M.A., Yusof, Y.A., Chin, N.L., Ibrahim, M.N., Basra, S.M.A., 2014. Drying kinetics and Colour Analysis of *Moringa oleifera* Leaves. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2 (2014) 394 – 400.
- Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., Gilani, A.H. 2007. *Moringa oleifera*: A Food Plant with Multiple Medicinal Uses. *Phytotherapy Research* 21: 17-25.
- Anuja, S., Ramkumar, K., 2017. Effect of various drying methods on the quality of moringa leaf powder (*Moringa oleifera* Lam.). *The Asian Journal of Horticulture* 12(2): 223-26
- AOAC (2000). Official methods of analysis of AOAC international, 17th edn. Gaithersburg, MD, USA.
- Arslan, D., Özkan, M.M., 2012. Evaluation of Drying Methods with Respect to Drying Kinetics, Mineral Content, and Color Characteristics of Savory Leaves. *Food and Bioprocess Technology* (2012) 5:983–991.
- AVAMOR, (2016). Asociación Valenciana de Productores y Consumidores de Moringa. Recurso online: <http://avamor.org/folleto_avamor.pdf>. Fecha de consulta: 7 de junio de 2019.



- Babalís, S.J., Belessiotis, V.G., 2004. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering* 65:449-458.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M., & Berset, C., 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology* 28(1), 25-30.
- Calvo, M., 2019. *Bioquímica de los Alimentos*. Recurso online: <<http://milksci.unizar.es/bioquimica/uso.html>> Fecha de consulta: 19 de junio de 2019.
- Chuang, P.H., Lee, C.W., Chou, J.Y., Murugan, M., Shieh, B.J., Chen, H.M., 2007. Anti-fungal activity of crude extracts and essential oil of *Moringa oleifera* Lam. *Bioresource Technology* 98 (2007) 232-236.
- Chumark, P., Khunawat, P., Sanvarinda, Y., Phornchirasilp, S., Morales, N.P., Phivthongngam, L., Ratanachamngong, P., Srisawat, S., Pongrapeeporn, K.S., 2008. The in vitro and ex vivo antioxidant properties, hypolipidaemic and antiatherosclerotic activities of water extract of *Moringa oleifera* Lam. leaves. *Journal of Ethnopharmacology* (2008), doi: 10.1016/j.jep.2007.12.010.
- Da Rocha, R.P., Melo, E.D.C., Bon Corbín, J., Berbert, P.A., Donzeles, S.M., & Tabar, J.A., 2012. Cinética de secado de tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, 16(6), 675-683.
- Ertekin, C., Firat, M.Z., 2015. A Comprehensive Review of Thin Layer Drying Models Used in Agricultural Products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, DOI: 10.1080/10408398.2014.910493.
- Fahey, J. 2005. *Moringa oleifera*: A Review of the Medical Evidence for Its Nutritional, Therapeutic, and Prophylactic Properties. Part 1. *Trees for Life Journal*, 1:5.
- Foidl, N., Makkar, H.P.S., Becker, K. 2001. The potential of *Moringa oleifera* for agricultural and industrial uses. Recurso online: <https://miracletrees.org/moringa-doc/the_potential_of_moringa_oleifera_for_agricultural_and_industrial_uses.pdf> Fecha de consulta: 14 de mayo de 2019.
- Gopalakrishnan, L., Doriya, K., Kumar, D.S., 2016. *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. *Food Science and Human Wellness* 5 (2016) 49-56.
- Kadam, D.M., Goyal, R.K., Singh, K.K., Gupta, M.K., 2011. Thin layer convective drying of mint leaves. *Journal of Medicinal Plants Research* Vol. 5(2), pp. 164-170, 18 January, 2011.
- Khalafalla, M.M., Abdellatef, E., Dafalla, H.M., Nassrallah, A.A., Aboul-Enein, K.M., Lightfoot, D.A., El-Deeb, F.E., El-Shemy, H.A. 2010. Active principle from *Moringa oleifera* Lam leaves effective against two leukemias and a hepatocarcinoma. *African Journal of Biotechnology* Vol. 9(49), pp. 8467-8471.
- Kurozawa, L., Moreira, P., Xidieh, F.E., Park, K.J., 2012. Drying kinetic of fresh and osmotically dehydrated mushroom (*Agaricus blazei*). *Journal of Food Process Engineering* 35(2).
- Makkar, H.P.S., Becker, K. 1996. Nutritional value and whole and ethanol antinutritional components of extracted *Moringa oleifera* leaves. *Animal Feed Science Technology* 63: 211-228.
- McBurney, R.P.H., Griffin, C., Paul, A.A., Greenberg, D.C., 2004. The nutritional composition of African wild food plants: from compilation to utilization. *Journal of Food Composition and Analysis* 17 (2004) 277-289.
- Mirzaee, E., Rafiee, S., Keyhani, A., 2010. *Evaluation and selection of thin-layer models for drying kinetics of apricot (cv. NASIRY)*. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 2010, 12(2): 111-116.
- Moyo, B., Masika, P.J., Hugo, A., Muchenje, V. 2011. Nutritional characterization of *Moringa (Moringa oleifera* Lam.) leaves. *African Journal of Biotechnology* Vol. 10(60), pp. 12925-12933.
- Omojola, A., Olusola, O.I., 2009. Effects of drying on the qualities of some selected Vegetables. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology* Vol.1, No.5, December, 2009, ISSN: 1793-8236.
- Palada, M.C., Chang, L.C., 2003. Suggested Cultural Practices for *Moringa*. *International Cooperators' Guide. AVRDC pub.* 03-545.

- Premi, M., Sharma, H.K., Sarkar, B.C., Singh, C., 2010. Kinetics of drumstick leaves (*Moringa oleifera*) during convective drying. *African Journal of Plant Science* Vol. 4 (10), pp. 391-400, October 2010.
- Reyes, S.N., 2006. *Moringa oleifera* and *Cratylia argentea*: potential fodder species for ruminants in Nicaragua. Doctoral thesis ISSN 1652-6880, ISBN 91-576-7050-1
- Shaw, M., Meda, V., Tabil Jr, L., Opoku, A., 2007. Drying and Color Characteristics of Coriander Foliage Using Convective Thin-Layer and Microwave Drying. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy* Vol. 41, No. 2, 2007.
- Siqueira, V.C., Resende, O., Chaves, T.O., 2012. Drying kinetics of *Jatropha* seeds. *Revista Ceres* vol. 59, núm. 2, marzo-abril, 2012, pp. 171-177.
- Sreelatha, S., Padma, P.R., 2009. Antioxidant activity and total phenolic content of *Moringa oleifera* leaves in two stages of maturity. *Plant Foods Hum. Nutr.* 64, 303–311.
- UNESCO, Fundación Celestina Pérez de Almada, 2005. *Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. Recurso online: <<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-GuiaSecaderosSolar.pdf>> Fecha de consulta: 15 de mayo de 2019.
- Vyankatrao, N.P., 2014. Effect of drying methods on nutritional value of some vegetables. *Bioscience Discovery* 6(1-1) Special, April – 2015.
- Zheng, Y., Zhu, F., Lin, D., Wu, J., Zhou, Y., Mark, B., 2016. Optimization of formulation and processing of *Moringa oleifera* and spirulina complex tablets. *Saudi Journal of Biological Sciences* 24(1): 122–126.
- Zoro, A.F., Zoué, L.T., Adom, N.J., Niamké, S.L., 2015. Effect of sun drying on nutritive and antioxidant properties of leafy vegetables consumed in western côte d'ivoire. *African Journal of Science and Research*, 2015, (4)5:24-31