

SECADO POR CONVECCIÓN DE RODAJAS DE CALABAZA (*CUCURBITA MOSCHATA DUCH*)

*Amanda de la Caridad Cuadra-Perera*¹, Claudia Ramírez-Alfonso¹, Jennifer Oviedo-García¹, Daniela Cabrera-Roque¹, Margarita Núñez de Villavicencio¹, Jorge A. Pino^{1,2} y José L. Rodríguez^{1,2}.*

¹Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia. Carretera al Guatao km 3 ½, CP 17100, La Habana, Cuba. E-mail: amanda.cuadra@iia.edu.cu

²Dpto. Alimentos. Instituto de Farmacia y Alimentos, Universidad de La Habana, CP 13600, Cuba.

Recibido: 02-05-2024 / Revisado: 25-05-2024 / Aceptado: 01-06-2024 / Publicado: 30-12-2024

RESUMEN

Se evaluó la cinética del secado y los indicadores de las rodajas de calabaza secadas por convección. El secado convectivo de las rodajas de calabaza a 50, 60 y 70 °C requirió 105, 90 y 55 min, respectivamente, para reducir el contenido de humedad desde 87,4 % m/m hasta 5 % m/m.; con un rendimiento del 13,88 % m/m. El modelo de Wang y Singh fue el más adecuado para modelar la cinética de secado de las rodajas de calabaza. La difusividad efectiva del agua fue de $1,298 \times 10^{-9}$, $1,460 \times 10^{-9}$ y $2,110 \times 10^{-9}$ m²/s, para 50, 60 y 70 °C, respectivamente. La energía de activación del proceso de secado fue 22,24 kJ/mol, lo que está en el rango para los productos alimenticios. La humedad, densidad bruta, densidad compactada y cohesividad de los polvos no se afectaron por la

temperatura de secado. Los parámetros colorimétricos si fueron afectados por la temperatura de secado y muestran que ocurre la reacción de Maillard con la modificación del color del producto.

Palabras clave: calabaza, secado convectivo, cinética de secado, modelación, indicadores de calidad.

ABSTRACT

Convection drying of pumpkin slices (*cucurbita moschata duch*).

The drying kinetics and indicators of convection-dried pumpkin slices were evaluated. Convective drying of pumpkin slices at 50, 60 and 70 °C required 105, 90 and 55 min, respectively, to reduce the moisture content from

87,4% m/m to 5% m/m; with a performance of 13,88% m/m. Wang and Singh's model was the most suitable for modeling the drying kinetics of pumpkin slices. The effective diffusivity of water was $1,298 \times 10^{-9}$, $1,460 \times 10^{-9}$ and $2,110 \times 10^{-9}$ m²/s, for 50, 60 and 70 °C, respectively. The activation energy of the drying process was 22,24 kJ/mol, which is in the range for food products. The moisture content, gross density, compacted density and cohesiveness of the powders were not affected by the drying temperature. The colorimetric parameters were affected by the drying temperature and show that the Maillard reaction occurs with the modification of the color of the product.

Key words: pumpkin, convective drying, drying kinetics, modeling, quality indicators.

INTRODUCCIÓN

La calabaza es el fruto en baya de la calabacera y pertenece a la familia Cucurbitácea. Esta familia comprende, aproximadamente, unas 850 especies de plantas, en sus mayorías herbáceas, trepadoras o rastreras, que producen frutos grandes y protegidos por una corteza firme. La calabaza (*Cucurbita moschata Duch*) posee un color amarillo pálido y la corteza que recubre a la hortaliza es dura y lisa, de color verde irisado con tonos anaranjados (1). El componente principal de la calabaza es el agua, lo que, unido a su bajo contenido en hidratos de carbono y a su casi inapreciable cantidad de grasa, hace que sea un alimento con un escaso aporte calórico y con buena fuente de fibra que ofrece valor de saciedad y mejora el tránsito intestinal. En relación con las vitaminas, la calabaza es rica en provitamina A y vitaminas C, E y otras del grupo B (2). Entre los minerales de la calabaza, destaca su alto contenido en potasio y su escaso aporte de sodio, por lo que su consumo en adultos resulta beneficioso en relación con la hipertensión y con otras enfermedades como la trombosis arterial o la apoplejía (3).

La deshidratación es un proceso en el que mediante la reducción de la actividad de agua de un alimento se puede prolongar su vida útil y contribuir a una mayor estabilidad, minimizando el crecimiento de microorganismos y las tasas de reacciones de deterioro (4). Este método ha sido utilizado a lo largo de los años para disminuir las pérdidas en frutas y hortalizas, conservar sus propiedades nutritivas y lograr mayor vida de anaquel (5).

La tecnología de secado ha evolucionado desde el simple uso de energía solar hasta la tecnología actual que incluye, entre otros, secado en horno, en bandeja, en túnel, por aspersión, en tambor, liofilización, en espuma, deshidratación osmótica, extrusión, fluidización y el uso de microondas, radiofrecuencia, ventana de refractancia y tecnología de obstáculos (6). La transferencia de energía puede aplicarse mediante el empleo de un mecanismo en específico o la combinación de varios. Uno de ellos es la convección es empleada mediante una corriente de aire u otro fluido caliente que impacta sobre el alimento y contribuye a su deshidratación (7). Esta corriente de aire proporciona el calor latente de vaporización para evaporar la humedad de la superficie del alimento. El vapor de agua se difunde a través de la película de aire que se forma en la superficie del alimento y posteriormente es eliminado por el aire circulante. Así se forma una región de baja presión de vapor en la superficie del alimento, estableciendo un gradiente de presión de vapor entre la capa húmeda interior y la capa exterior de aire seco. Este gradiente actúa como fuerza motriz del proceso de secado (8).

En la literatura hay reportes del secado de calabaza, pero la mayoría de ellos utilizan otras formas de transferencia de energía para el secado y otras especies de calabaza (9-22). El objetivo de este trabajo fue evaluar la cinética del secado e indicadores de calidad de las rodajas de calabaza (*Cucurbita moschata Duch*) secadas por convección a diferentes temperaturas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las calabazas frescas (*C. moschata*) se obtuvieron de una empresa agrícola comercial en La Habana. En cada corrida experimental se utilizaron tres calabazas, las que se lavaron con agua corriente, pelaron y eliminaron las semillas, y se cortaron en rodajas de 2 mm de grosor en una picadora SAMMIC S.L, modelo 20720 (Azkoitia, España).

En la caracterización de la calabaza, a las muestras frescas se le determinaron humedad en una termobalanza electrónica Sartorius AG, modelo MA35 (Göttingen, Alemania) a 105 °C. Además, una vez pasadas por un homogeneizador, se le midieron los sólidos refractométricos en un equipo ABBE (Oberkochen, Alemania) con control de temperatura y el color con un espectrofotómetro modelo UV-2600 UV-Visible (Shimadzu Corp., Kyoto, Japón). Se utilizó un compartimiento de muestra grande (con esfera integradora incorporada), medición de 380 a 780 nm, velocidad de barrido media, 8 nm de ancho de abertura y medición fotométrica en modo porcentaje de reflectancia. Las muestras fueron colocadas en celdas 2 cm de diámetro con placa de vidrio. El cálculo de las coordenadas de color en el sistema CIELAB se realizó mediante el programa UVPC Color Analysis ver. 3.12 de Shimadzu Corp. Los análisis se hicieron por triplicado.

El proceso de secado por convección se realizó en una estufa con tiro de aire forzado Heraeus (Alemania). Las rodajas de calabaza (60 g) fueron colocadas uniformemente sobre un tamiz. En el proceso de secado se emplearon tres temperaturas: 50, 60 y 70 °C, con una velocidad del aire de 1.5 m/s. La pérdida de peso fue medida, a 70 °C cada 5 min, a 60 °C cada 10 min y a 50 °C cada 15 min, con una balanza técnica Ohaus (EE. UU.) hasta alcanzar la humedad deseada por registro del peso final de las rodajas de calabaza. El secado se mantuvo hasta que las rodajas presentaron un contenido de humedad de 5 % m/m. Las corridas experimentales se efectuaron por triplicado.

La relación de humedad se calculó según la ecuación 1(23).

$$MR = \frac{X_t}{X_o} \quad (1)$$

Donde X_o y X_t representan la humedad base seca (kg agua/kg masa seca) en la etapa inicial y en el tiempo t , respectivamente.

Para describir la cinética de secado se utilizaron 10 modelos comúnmente aplicados en las investigaciones (24-26 (Tabla 1).

Tabla 1. Modelos matemáticos de capa fina utilizados para representar la cinética de secado

| Modelo | Ecuación |
|--------------------|-------------------------------------|
| Henderson y Pabis | $MR = a \cdot e^{-kt}$ |
| Lewis | $MR = e^{-kt}$ |
| Midilli | $MR = e^{-kt^n} + bt$ |
| Midilli modificado | $MR = \exp(-kt) + b * t$ |
| Page | $MR = e^{-kt^n}$ |
| Parabólico | $MR = a + bt + ct^2$ |
| Demir | $MR = a \exp[(-kt)]^n + b$ |
| Wang y Singh | $MR = 1 + at + bt^2$ |
| Logarítmico | $MR = a \exp(-kt) + c$ |
| Dos términos | $MR = a \exp(k_1t) + b \exp(-k_2t)$ |

RH: relación de humedad; t: tiempo (min); k, k_2 a, n, b y c: parámetros del modelo.

Los parámetros de los modelos fueron estimados empleando métodos de regresión lineal o no lineal, según el modelo, además, se calcularon los coeficientes de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y error estándar de la regresión (SE) mediante el programa SPSS ver. 27 (SPSS Inc., Chicago, EE. UU.).

La difusividad efectiva del agua (D_{eff}) se calculó a partir del modelo de difusión de la segunda ecuación de Fick

(ecuación 2) (27), que resulta adecuada para fenómenos difusivos durante la transferencia de masa del producto hasta alcanzar el equilibrio (28). Para este fin, se asumió que las rodajas de calabaza se asemejan a una lámina infinita, que la transferencia de masa es unidimensional y los tiempos de secado son largos (9).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} \frac{t}{4L^2}} \quad (2)$$

Donde RH: relación de humedad, D_{eff} : difusividad efectiva del agua (m^2/s), t : tiempo (s) y L : semiespesor de la muestra (m).

La ecuación anterior puede expresarse en forma logarítmica y para períodos largos de secado ($RH < 0,6$), puede calcularse la D_{eff} a partir de la pendiente del gráfico de $\ln RH$ vs. tiempo de secado (ecuación 3).

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right) t \quad (3)$$

Donde RH: relación de humedad, D_{eff} : difusividad efectiva del agua (m^2/s), t : tiempo (s) y L : semiespesor de la muestra (m).

La influencia de la temperatura de secado sobre la difusividad efectiva del agua en los alimentos, generalmente, sigue una tendencia tipo Arrhenius, que puede representarse por la relación descrita en la ecuación 4 y al graficar $\ln D_{eff}$ vs. $1/T$ se obtiene una línea recta de cuya pendiente se calcula la E_a y del intercepto se obtiene el factor de Arrhenius (D_o).

$$D_{eff} = D_o e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (4)$$

Donde D_o : factor pre exponencial de la ecuación de Arrhenius (m^2/s), E_a : energía de activación (kJ/mol), R : constante del gas ideal (kJ/mol K), y T : temperatura (K).

Las muestras deshidratadas de las tres corridas experimentales, a cada temperatura, se pasaron por un molino para polvo modelo IKA M20S3 (Staufen, Alemania) durante 1 min.

Se determinó el rendimiento del proceso según la ecuación 5:

$$Rendimiento (\%) = \frac{\text{masa de polvo}}{\text{masa de fruta}} \times 100 \quad (5)$$

Caracterización de la calabaza deshidratada en polvo: a las tres muestras en polvo se le determinaron humedad en una termobalanza electrónica Sartorius AG, modelo MA35 (Göttingen, Alemania) a 105 °C, densidad bruta y compactada (29), cohesividad (30) y color con un espectrofotómetro modelo UV-2600 UV-Visible (Shimadzu Corp., Kyoto, Japón), con iguales condiciones a la calabaza fresca, con excepción de que los polvos se reconstituyeron antes hasta igual contenido de sólidos refractométricos.

A las muestras deshidratadas también se le determinaron la diferencia total de color (ΔE), croma (C^*) y matiz (H°) de acuerdo con las ecuaciones 6, 7 y 8 (31).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (6)$$

Donde ΔL , Δa y Δb son las diferencias entre el polvo y la muestra fresca para cada parámetro.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (7)$$

$$H^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (8)$$

Los resultados de los análisis fueron sometidos a análisis de varianza, seguido de la prueba para discriminar entre las medias por el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Los análisis estadísticos se hicieron mediante Statgraphics Centurion XV ver. 15.2.05 (StatPoint, Inc., Warrenton, VA. EE. UU.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características de la calabaza fresca aparecen en la Tabla 2. De acuerdo con la búsqueda bibliográfica, varios autores realizaron estudios con la especie *C. moschata* e informaron valores de humedad de 90,05; 88,6; 90,08 y 88,98 % m/m (12, 14, 20, 22). En otras especies, como *C. pepo* y *C. máxima*, se registraron contenidos de humedad de 92,4 y 95 % m/m, respectivamente (9, 11). Estas diferencias entre los valores de humedad incluso de la misma especie pueden estar dadas al tipo de variedad, estado de madurez y condiciones agroclimáticas.

Tabla 2. Características de la calabaza fresca

| | |
|--------------------------|--------------|
| Sólidos Solubles (°Brix) | 4.5 ± 0.5 |
| Humedad (% m/m) | 87.4 ± 1.1 |
| L* | 37.08 ± 1.40 |
| a* | 7.28 ± 0.07 |
| b* | 41.37 ± 0.13 |

Las curvas experimentales de secado (Figura 1) muestran las tres temperaturas estudiadas. Se necesitaron 105, 90 y 55 min a 50, 60 y 70 °C, respectivamente, para reducir el contenido de humedad desde 87.4 % m/m hasta 5 % m/m. Curvas similares y menores tiempos fueron informados con el secado convectivo de calabaza (11, 12, 16, 30).

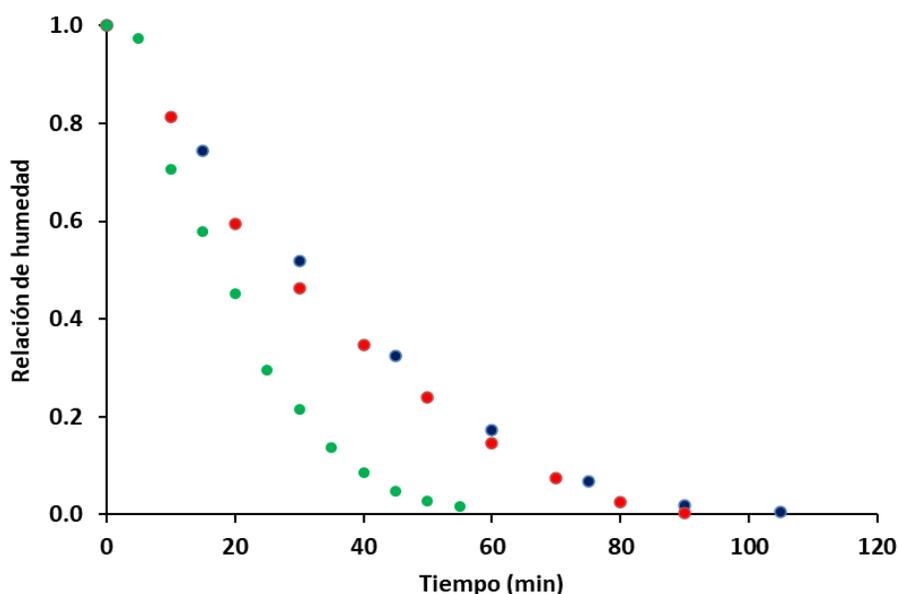


Fig. 1. Variación de la relación de humedad a 50 °C (azul), 60 °C (roja) y 70 °C (verde).

Los modelos de secado de capa fina (Henderson y Pabis, Lewis, Midilli, Midilli modificado, Page, parabólico, Demir, Wang y Singh, logarítmico y dos términos) se utilizaron para describir el comportamiento durante el secado por convección de las rodajas de calabaza *C. moschata*. Los parámetros del modelo y los resultados estadísticos (R^2 , R^2_{adj} y SE) se

presentan en la Tabla 3. El coeficiente de determinación (R^2) mide la variación proporcional en la respuesta atribuida al modelo más que al error aleatorio y se afirma que para un buen modelo ajustado, R^2 no debe ser menor al 0,8 (Stat-Ease, Inc.). Por tanto, solo cinco modelos obtenidos en este trabajo (Henderson y Pabis, Lewis, Midilli modificado, parabólico y

(Wang y Singh) se ajustaron a los datos experimentales de RH, pues presentaron valores altos de R^2 entre 0,874 y 0,999 (Tabla 3). Para todas las temperaturas, el modelo de Wang y Singh fue el que mejor se ajustó, pues presentó los valores más altos de R^2_{adj} y más bajos de SE, que fueron escogidos como criterios de bondad de ajuste (26).

La difusividad efectiva del agua (D_{eff}) de las rodajas de calabaza fue de $1,298 \times 10^{-9}$, $1,460 \times 10^{-9}$ y $2.110 \times 10^{-9} m^2/s$, para 50, 60 y 70 °C, respectivamente, en el secado por convección. Estos valores indican que a medida que aumenta la temperatura aumenta la D_{eff} , lo que significa que el agua podrá moverse más fácilmente. Se encontró que la D_{eff} del secado por convección de las rodajas fue menor que los resultados que obtuvieron otros autores (9, 13, 33), mientras que fue mayor que en el secado a vacío (10). Asimismo, los resultados del presente trabajo fueron similares a los informados por otros investigadores (34). En general, las diferencias pueden estar dadas por la forma de transferencia de energía, la especie utilizada y que, a altas temperaturas de secado, debido a la rápida velocidad de evaporación, se pueden obtener valores de D_{eff} más altos (9, 13).

La dependencia de la D_{eff} con la temperatura de secado también fue descrita por la ecuación de Arrhenius, de donde se determinó un valor de energía de activación de

22,24 kJ/mol. Este valor está en el rango de 13 a 110 kJ/mol para la energía de activación en alimentos. El valor encontrado es menor que el valor informado por otros trabajos de secado convectivo de calabaza (12, 13, 32, 34).

El rendimiento promedio del producto deshidratado, en todas las experiencias de secado, fue 13,88 % m/m con un coeficiente de variación de 2,8 %.

De acuerdo con los resultados de los análisis a los polvos obtenidos a las tres temperaturas (Tabla 4), se aprecia que las densidades bruta y compactada no tuvieron diferencias significativas entre los polvos obtenidos a cada temperatura.

La cohesividad no se diferenció entre las tres temperaturas. En términos de propiedades de manipulación, los polvos tuvieron características de flujo similares y son considerados como poco cohesivos (Tabla 4). Como los valores fueron inferiores a 1,2, los polvos tuvieron una alta fluidez (35). La explicación de esta alta fluidez en partículas de tamaño pequeño se debe a la poca superficie por unidad de masa del polvo. Este es un resultado esperado pues la reducción del tamaño de las partículas aumenta el área de contacto entre las partículas, lo que permite una mayor interacción entre las fuerzas cohesivas (36).

Tabla 3. Valores de los parámetros de los modelos y de correlación de los modelos de secado evaluados

| T (°C) | Modelo | a | n | o | c | b | k | k_2 | R^2 | R^2_{adj} | SE |
|--------|---------------|-------------------------|-------|--------|-----|--------|------------------------|-------|-------|-------------|-------|
| 50 | H y P | 1,006 | - | - | - | - | -0,054 | - | 0,953 | 0,944 | 0,423 |
| | Lewis | - | - | - | - | - | -0,041 | - | 0,957 | 0,950 | 0,621 |
| | Midilli | $1,189 \times 10^{-16}$ | - | - | - | 0,024 | 1,000 | - | 0,273 | 0,128 | 7,079 |
| | Midilli (mod) | - | - | - | - | -0,028 | 0,010 | - | 0,999 | 0,998 | 0,000 |
| | Page | - | 6,859 | - | - | - | -2,315 | - | 0,784 | 0,741 | 0,910 |
| | Parabólico | 1,030 | - | - | - | -0,020 | $9,958 \times 10^{-5}$ | - | 0,999 | 0,999 | 0,006 |
| | Demir | -20,594 | 0,355 | 22,072 | - | - | $1,722 \times 10^{-5}$ | - | 0,977 | 0,972 | 2,973 |

| T (°C) | Modelo | <i>a</i> | <i>n o c</i> | <i>b</i> | <i>k</i> | <i>k</i> ₂ | R ² | R ² _{adj} | SE |
|--------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|-----------------------|----------------|-------------------------------|-------|
| 60 | W y S | 9,18 x 10 ⁻⁵ | - | -0,019 | - | - | 0,999 | 0,999 | 0,000 |
| | Logarítmico | 1,189 x 10 ⁻¹⁶ | 0,631 | - | 1,000 | - | 0,436 | 0,323 | 1,676 |
| | Dos términos | -1,000 | - | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,373 | 0,248 | 9,080 |
| | H y P | 0,972 | - | - | -0,059 | - | 0,874 | 0,856 | 0,654 |
| | Lewis | - | - | - | -0,043 | - | 0,918 | 0,908 | 0,773 |
| | Midilli | -9,865 x 10 ⁻¹⁶ | - | 0,865 | 1,000 | - | 0,144 | 0,022 | 2,640 |
| | Midilli (mod) | - | - | -0,031 | 0,011 | - | 0,995 | 0,994 | 0,001 |
| | Page | - | 1,737 | - | -0,385 | - | 0,991 | 0,990 | 0,028 |
| | Parabólico | 0,988 | - | -0,020 | 0,000 | - | 0,998 | 0,997 | 0,015 |
| | Demir | -2,763 x 10 ⁻⁴⁰ | 1,000 | 0,338 | 1,000 | - | 0,160 | 0,040 | 0,132 |
| 70 | W y S | 0,000 | - | -0,021 | - | - | 0,998 | 0,998 | 0,000 |
| | Logarítmico | -9,865 x 10 ⁻¹⁶ | 0,625 | - | 1,000 | - | 0,380 | 0,292 | 2,839 |
| | Dos términos | 2,386 x 10 ⁻³⁵ | - | -1,583 x 10 ⁻³⁵ | 0,989 | 0,994 | 0,313 | 0,215 | 3,852 |
| | H y P | 0,658 | - | - | -0,081 | - | 0,979 | 0,977 | 0,208 |
| | Lewis | - | - | - | -0,064 | - | 0,973 | 0,971 | 0,377 |
| | Midilli | 3,115 x 10 ⁻¹⁵ | - | -0,003 | 1,000 | - | 0,012 | 0,009 | 4,650 |
| | Midilli (mod) | - | - | -0,051 | 0,019 | - | 0,981 | 0,979 | 0,003 |
| | Page | - | 3,479 | - | -1,644 | - | 0,807 | 0,786 | 0,631 |
| | Parabólico | 1,150 | - | -0,044 | 0,000 | - | 0,996 | 0,995 | 0,023 |
| | Demir | 1,000 | -0,998 | -0,994 | 1,000 | - | 0,612 | 0,569 | 5,990 |
| W y S | 0,000 | - | -0,034 | - | - | 0,977 | 0,975 | 0,002 | |
| Logarítmico | 3,115 x 10 ⁻¹⁵ | -0,748 | - | 1,000 | - | 0,180 | 0,089 | 3,457 | |
| Dos términos | -1,276 x 10 ⁻²² | - | 1,904 x 10 ⁻²² | 1,003 | 0,996 | 0,120 | 0,023 | 4,678 | |

T: Temperatura. H y P: Henderson y Pabis, W y S: Wang y Singh, Midilli (mod): Midilli modificado. *a*, *b*, *c*, *k*, *n* y *k*₂ son parámetros de los modelos. R²: coeficiente de determinación, R²_{adj}: coeficiente de determinación ajustado,

SE: error estándar de la regresión. -: parámetro no existente en el modelo

Tabla 4. Características de la calabaza deshidratada a tres temperaturas

| Característica | 50 °C | 60 °C | 70 °C |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Humedad (% m/m) | 4,99 (0.06) ^a | 5,00 (0.06) ^a | 5,00 (0.04) ^a |
| Densidad bruta (g/mL) | 0,3350 (0.002) ^a | 0,3350 (0.001) ^a | 0,3357 (0.001) ^a |
| Densidad compactada (g/mL) | 0,3466 (0.002) ^a | 0,3456 (0.000) ^a | 0,3462 (0.001) ^a |
| RH | 1,03 (0.00) ^a | 1,03 (0.003) ^a | 1,03 (0.002) ^a |
| L* | 71,09 (0.5) ^a | 67,59 (1.4) ^b | 67,29 (1.8) ^b |
| a* | 7.65 (0.35) ^b | 8,04 (0.43) ^b | 11,43 (0.91) ^a |
| b* | 39,32 (0.49) ^a | 38,98 (0.93) ^a | 31,70 (0.76) ^b |
| ΔE | 29,79 (0.37) ^b | 30,61 (0.74) ^b | 31,99 (0.89) ^b |
| Croma | 40,06 (0.50) ^a | 39,80 (0.68) ^a | 33,70 (0.84) ^b |
| Matiz | 78,90 (0.23) ^a | 78,35 (0.10) ^a | 70,15 (0.46) ^b |

Desviación estándar entre paréntesis, RH: relación de Hausner, L*: luminosidad, a*: rojez, b*: amarillez, ΔE : diferencia total de color. Letras distintas dentro de una misma fila indican diferencia significativa para $p \leq 0.05$.

Los parámetros colorimétricos de los polvos fueron influenciados por la temperatura de secado (Tabla 4). El parámetro L* disminuyó significativamente con el incremento de la temperatura, es decir, se oscurecieron las muestras y disminuyó la luminosidad. El parámetro a* fue mayor en el polvo de 70 °C, lo que indica una mayor tendencia al rojo, y significativamente diferente a las otras dos temperaturas. El parámetro b* fue mayor en el polvo a 50 °C y a 60 °C, lo que revela una mayor tendencia al amarillo, y significativamente diferentes a la temperatura de 70 °C donde este parámetro comienza a disminuir. Estas tendencias significan que a medida que aumenta la temperatura el polvo se va pardeando. Durante el secado se produce la reacción de Maillard con la formación de pigmentos oscuros o pardos, que modifican el color del producto. Esta reacción es inducida por la temperatura, donde las más altas tienden a producir pigmentos más oscuros (37).

El parámetro ΔE fue mayor en el polvo de 70 °C con respecto a las otras dos temperaturas, pero en todos los casos se considera claramente visible e inaceptable, teniendo en cuenta los valores obtenidos en la muestra de calabaza fresca.

Los parámetros C* y H° fueron similarmente influenciados por la temperatura de secado, presentando los valores más bajos en la muestra sometida a la mayor temperatura. Como resultado, esta muestra mostró una menor saturación y un matiz más rojizo.

CONCLUSIONES

El secado convectivo de las rodajas de calabaza a 50, 60 y 70 °C requirió 105, 90 y 55 min, respectivamente, para reducir el contenido de humedad desde 87.4 % m/m hasta 5 % m/m.; con un rendimiento del 13,88 % m/m.

El modelo más adecuado para representar la cinética de la relación de humedad de las rodajas de calabaza fue el de Wang y Singh.

La difusividad efectiva del agua fue de $1,298 \times 10^{-9}$, $1,460 \times 10^{-9}$ y $2,110 \times 10^{-9}$ m²/s, para 50, 60 y 70 °C, respectivamente, en el secado por convección.

La energía de activación del proceso de secado fue 22,24 kJ/mol, lo que está en el rango para los productos alimenticios.

La humedad, densidad bruta, densidad compactada y cohesividad de los polvos no se afectaron por la temperatura de secado. Los parámetros colorimétricos si fueron afectados por la temperatura de secado y muestran que ocurre la reacción de Maillard con la modificación del color del producto.

REFERENCIAS

1. Fornaris-Rullán GJ. Conjunto Tecnológico para la Producción de Calabaza. Características de la Planta. Estación Experimental Agrícola P-155. Universidad de Puerto Rico; 2012.
2. Ramos MC, Hernández BM. Proceso de elaboración de harina de zapallo (*Cucurbita maxima*) (Tesis de pregrado). Ecuador: Universidad Técnica Estatal de Quevedo; 2011.
3. Hernández A. Cinética del secado e indicadores de calidad de la calabaza deshidratada por radiación infrarroja (Tesis de pregrado). La Habana: Instituto de Farmacia y Alimentos, Universidad de La Habana; 2022.
4. Levate L, Costa W, da Silva C, Henriques S, Quintao LJ. Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. J. Food Process Eng 2020; 43 (9):1–10.
5. Castilla P. Evaluación tecno-económica y sensorial del deshidratado convectivo de calabacita (*Cucurbita pepo*) por charola y lecho fluidizado (Tesis de pregrado). México: Universidad Autónoma de Querétaro; 2022.
6. Vega-Mercado H, Góngora-Nieto MM, Barbosa-Cánovas GV. Advances in dehydration of foods. J. Food Process Eng 2001; 49:271–89.
7. Espinosa JL. Aplicación de un proceso de secado asistido infrarrojo para la deshidratación del fruto de murtilla (*Ugni molinae Turcz.*) (Tesis de pregrado). Chile: Universidad de Chile; 2011.
8. Hossain Z, Mansour N, Sultana N. Design of a laboratory experiment for the performance analysis of a retrofitted tray dryer unit. Educ. Chem. Eng 2017; 18 (1): 35–44.
9. Doymaz I. The kinetics of convective air-drying of pumpkin slice. J. Eng. 2007; 79 (1): 243–48.
10. Arévalo-Pinedo A, Murr FEX. Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. J. Food Eng 2007; 80 (1):152–56.
11. Nawirska A, Figiel A, Kucharska A, Sokół-Łetowska A, Biesiada A. Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. J. Food Eng 2009; 94 (1): 14–20.
12. Limpiboon K. Effects of temperature and slice thickness on drying kinetics of pumpkin slices. Walailak J Sci Technol 2011; 8 (2): 159–66.
13. Guiné RP, Pinho S, Barroca M. Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). Food Bioprod Process 2011; 89 (4):422–28.

14. Onwude DI, Hashim N, Janius RB, Nawi N, Abdan K. Computer simulation of convective hot air-drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*). The 8th Asia-Pacific Drying Conference (ADC 2015), Kuala Lumpur, Malasya; 2015.
15. Meneses J. Optimización de los parámetros de osmodeshidratación y secado por convección para la retención de carotenos del zapallo loche (*Cucurbita moschata Duch*) (Tesis de maestría). Perú: Universidad señor de Sipán; 2016.
16. Caliskan G, Dirim SN. Drying characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices in convective and freeze dryer. *Heat Mass Transf* 2017; 53 (6): 2129–41.
17. Klava D, Kampuse S, Tomson L, Kince T, Ozola L. Effect of drying technologies on bioactive compounds maintenance in pumpkin by-products. *Agron Res* 2018; 16 (4):1728–41.
18. Canchanya MK. Evaluación de la actividad prebiótica in vitro y propiedades funcionales de la harina de pulpa de calabaza (*Curcubita ficifolia*) (Tesis de pregrado) Perú: Universidad Nacional del Centro de Perú; 2019. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20500.12894/5399>.
19. Mojica C, Acosta D, Vidal E, Sobrevilla N. Isotermas de secado en condiciones de laboratorio para pulpa de calabaza (*Cucurbita pepo*). *TECTZAPIC. Revista Académico-Científica* 2020; 6 (2):128–34.
20. Panato K, Olivera C. Drying kinetics and physicochemical and technological properties of pumpkin purée flour dried by convective and foam-mat drying. *J Food Process Preserv* 2021; 46 (2):1–14.
21. López N, Morales N, Lobatón H. Cinética de secado por convección del epicarpio de calabaza de *Cucurbita maxima* y sus usos en el desarrollo de pan sin gluten. *Rev. Mutis* 2022; 12 (2). <https://doi.org/10.21789/22561498.1810>
22. Ramírez-Alfonso C, Hernández-González A, Pino JA, Rodríguez JL, Nuñez de Villavicencio M. Cinética del secado e indicadores de calidad de la calabaza (*Cucurbita moschata Duch*) deshidratada por radiación infrarroja. *Rev. CENIC Cienc. Quím* 2023; 54 (1):183–92.
23. Song XD, Mujumdar AS, Law CL, Fang XM, Peng WJ, Deng LZ, Wang J, Xiao HW. Effect of drying air temperature on drying kinetics, color, carotenoid content, antioxidant capacity and oxidation of fat for lotus pollen. *Dry. Technol* 2019; 38 (9):1151–64.
24. Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single-layer drying. *Dry. Technol* 2002; 20:1503–13.
25. Demir V, Gunhan T, Yagcioglu A. Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosyst. Eng.* 2007; 98 (1):47–53.
26. Erbay Z, Icier F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Crit. Rev. Food Sci Nutr* 2010; 50 (5):441–64.
27. Levate L, Costa W, da Silva C, Henriques S, Quintao L. Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. *J Food Process Eng* 2020; 43 (9):1–10.
28. Vega-Gálvez A, Miranda M, Puente-Díaz L, López L, Uribe E, Rodríguez K, Di Scala K. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresour Technol* 2010; 101 (19):7265–70.

29. Farías-Cervantes VS, Delgado-Lincoln E, Solís-Soto A, Medrano-Roldan H, Andrade-González I. Effect of spray drying temperature and a gave fructans concentration as carrier agent on the quality properties of blackberry powder. *Int J Food Eng* 2016; 12:451–59.
30. Jinapong N, Suphantharika M, Jamnong P. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *J Food Eng* 2008; 84:194–205.
31. Mathias-Rettig K, Ah-Hen K. El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro Sur* 2014; 42 (2):57–66.
32. Pérez NE, Schmalko ME. Convective drying of pumpkin: influence of pretreatment and drying temperature. *J Food Process Eng* 2009; 32 (1):88–103.
33. Akpınar EK, Midilli A, Bicer Y. Experimental investigation of drying behavior and conditions of pumpkin slices via acyclone-type dryer. *J Sci Food Agric* 2003; 83 (14):1480–86.
34. Tunde-Akintunde TY, Ogunlakin GO. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy requirements during the drying of pre-treated and untreated pumpkin. *Energy Convers Manag* 2011; 52:1107–13.
35. Hausner H. Friction conditions in a mass of metal powder. *Int J Powder Metall* 1967; 3:7-13.
36. Fitzpatrick JJ, Iqbal T, Delaney C, Twomey T, Keogh MK. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powder with different fat contents. *J. Food Eng* 2004; 64 (4):435-44.
37. Lund MN, Ray CA. Control of Maillard reactions in foods: Strategies and chemical mechanisms. *J Agric Food Chem* 2017; 65:4537–52.