

Efecto de la adición de miel como recubrimiento en el secado de carambola (*Averrhoa carambola L.*) por microondas y en secador solar de bandeja.

Areli Del Ángel Pérez*, Francisco Javier López Martínez, María Elena Vargas Ugalde.

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. Carr. Cuautitlán-Teoloyucan Km. 2.5, México

Fecha de recepción: 24 de octubre de 2021 - Fecha de aceptación: 18 de marzo de 2022

Effect of the addition of honey as a coating on carambola (*Averrhoa carambola L.*) drying, by microwave and solar tray dryer.

Resumen

La carambola (*Averrhoa carambola L.*) es una fruta carnosa de color dorada en estado maduro. En este trabajo se evalúa el efecto de la adición de miel en el secado de carambola en un horno de microondas y un secador solar. Se determinaron cambios de color, temperatura y humedad del producto. Se obtuvieron curvas de secado y velocidad de secado, se calculó el coeficiente de difusión de agua para cada tratamiento. Se simuló curvas de temperatura y perfiles de temperatura utilizando COMSOL Multiphysics. Se realizó una evaluación sensorial para decidir cual tratamiento confiere mejores características organolépticas. Las velocidades de secado [=] kg agua h⁻¹ m⁻² de muestras con y sin recubrimiento de miel fueron: secador solar 0.42 y 0.32 respectivamente; horno microondas 1.42 y 1.36 respectivamente. Los coeficientes de difusión [=] m²s⁻¹ fueron: secador solar con miel 9.84 x 10⁻⁷, sin miel 9.66 x 10⁻⁷; horno microondas con miel 9.35 x 10⁻⁶, sin miel 9.41 x 10⁻⁶. Las temperaturas experimentales y los perfiles de temperatura de carambola en microondas fueron similares a los simulados en COMSOL. Las muestras sin recubrir tuvieron mayor cambio de color que las recubiertas en ambos secadores: 8% en solar y 28% en microondas. El encogimiento de muestras en microondas sin miel fue 35%, con miel 25%; en secador solar sin miel se encogieron 40%, con miel 25%. Las muestras recubiertas con miel y secadas en microondas tuvieron la mayor aceptabilidad en la evaluación sensorial.

Palabras clave: Carambola, recubrimientos en el secado, simulación, secado solar, secado por microondas.

Abstract

Carambola (*Averrhoa carambola L.*) is a fleshy fruit that is golden in color when ripe. In this work, the effect of the addition of honey on carambola drying in a microwave oven and a solar dryer is evaluated. Color changes, temperature and humidity of the product were determined. Drying curves and drying rates were obtained, the diffusion coefficient of water for each treatment was calculated. Temperature curves and temperature profiles were simulated using COMSOL Multiphysics. A sensory evaluation was carried out to decide which treatment confers the best organoleptic characteristics. The drying rates [=] kg water h⁻¹ m⁻² of samples with and without honey coating were: 0.42 and 0.32 respectively; for microwave, 1.42 and

*arelyyangel@gmail.com

1.36 respectively. Diffusion coefficients [=] m^2s^{-1} were: solar dryer with honey 9.84×10^{-7} , without honey 9.66×10^{-7} , microwave with honey 9.35×10^{-6} , without honey 9.41×10^{-6} . Experimental temperatures and temperature profiles of carambola in microwave were like those simulated in COMSOL. Uncoated samples had greater color change than coated samples in both dryers: 8% in solar and 28% in microwave. Shrinkage of samples in microwave without honey was 35%, with honey 25%; in solar dryer without honey, they shrunk 40%, with honey 25%. Samples coated with honey and dried in microwave had the highest acceptability in the sensory evaluation.

Keywords: star fruit, coatings on drying, simulation, solar drying, microwave oven drying.

Introducción

La carambola es rica en vitaminas A y C, las cuales contribuyen a reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares, tiene bajo contenido de carbohidratos, es rica en potasio y su aporte de sodio es bajo (Durán y Cano, 2015). La miel es la sustancia dulce natural producida por las abejas (*Apis mellifera*) a partir del néctar de las plantas. Se ha mostrado actividad antibacteriana tanto en la miel como en sus soluciones diluidas. Esto se debe a la acción de la enzima glucosa oxidasa, que produce peróxido de hidrógeno y ácido glucónico a partir de la glucosa en determinadas condiciones de dilución (Baglio, 2018). Se espera que la adición de miel ayude a mejorar las características de la carambola seca. El secado de alimentos permite conservarlos mediante la disminución de su actividad de agua. Existen diversos métodos para obtener alimentos deshidratados, entre ellos el secado solar y el secado en horno de microondas. El secado de sólidos porosos húmedos es un proceso transitorio complejo que implica transporte simultáneo de calor y masa, así como cambios de fase dentro del sólido y variaciones de dimensión debido a la eliminación de la humedad (contracción) y al calentamiento (expansión volumétrica) (Barbosa et al., 2016). En el secado al sol, la energía se transfiere por convección del aire circundante y por radiación directa y difusa del sol a la superficie del sólido. Una parte de esta energía se propaga al interior del producto (absorción directa) provocando aumento de la temperatura y cambio de fase del agua líquida en vapor, y el resto se utiliza

para evaporar el agua líquida en la superficie del sólido, la cual es removida por el aire por convección natural, y se pierde al ambiente por convección y radiación (Barbosa et al., 2016). En el horno de microondas, las microondas son formas de energía que se convierten en calor a través de su interacción con los materiales. No son absorbidas por el material debido a su polarización electrónica o atómica. Hay muchos mecanismos para esta conversión de energía, principalmente la conducción iónica y la rotación dipolar. Ésta rotación ocurre cuando un campo eléctrico oscilante incide sobre las moléculas de agua, las moléculas dipolares permanentemente polarizadas intentan realinearse en la dirección del campo eléctrico. Debido a la alta frecuencia del campo eléctrico, la realineación ocurre un millón de veces por segundo y causa la fricción interna de las moléculas que resulta en el calentamiento volumétrico del material. La energía de microondas se convierte en energía cinética, por lo que las moléculas de agua vibran fuertemente, provocando fricción y calentamiento interno (Hernández M., et al., 2017). El secado por microondas se realiza en tiempos muy cortos comparados con los del secado solar. El calentamiento no es totalmente uniforme, por lo que las características organolépticas de los productos pueden afectarse (Hernández R., et al., 2017). Un factor básico para determinar la velocidad de secado y la calidad del producto obtenido es la contracción o colapso, que consiste en el cambio de volumen durante el secado debido a la pérdida de humedad. Se produce debido a que

en ausencia de agua los biopolímeros no pueden soportar su propio peso (Ochoa-Reyes et al., 2013). Para optimizar el diseño del proceso de secado se puede utilizar la simulación de la transferencia de calor mediante el software comercial COMSOL Multiphysics, aunada a métodos para variar los parámetros del modelo. Las ecuaciones diferenciales describen el cambio de un sistema en lugar de su estado en el espacio y el tiempo: las ecuaciones diferenciales parciales (PDE) describen dichos cambios en más de una variable independiente. La ley para la conservación de la energía en sólidos y fluidos se puede describir como una PDE que expresa los cambios de temperatura T en el espacio. En ese caso, T es una variable dependiente. Se puede seleccionar una posición en el espacio y el tiempo y obtener un valor único para T resolviendo las PDE. Para muchas geometrías y problemas, las PDE no se pueden resolver con métodos analíticos, entonces, se puede construir una aproximación de las ecuaciones, con base en diferentes tipos de discretizaciones. La solución de las ecuaciones del modelo numérico es, a su vez, una aproximación de la solución real a las PDE. El método de elementos finitos (FEM) se usa para calcular las aproximaciones. (COMSOL, 2016). Considerando lo anterior, los objetivos de este proyecto fueron: a) estudiar el efecto de la adición de miel como recubrimiento en rodajas de carambola tanto en el proceso de secado en un secador solar y en un horno de microondas (mediante la elaboración de curvas de secado y velocidad de secado y la determinación de temperatura y humedad final alcanzadas bajo las diferentes condiciones de estudio) como en las propiedades organolépticas de los productos finales (a través de pruebas hedónicas) para determinar las mejores condiciones de proceso, b) Desarrollar la simulación de los perfiles de temperatura durante el secado, mediante el software COMSOL Multiphysics, para generar una herramienta de predicción de la transferencia de calor del proceso.

Metodología

Diseño Experimental

Se utilizó un diseño factorial 2^2 . Variables: Tipo de secador (solar y horno de microondas) y recubrimiento (con adición de miel de abeja y sin adición de miel de abeja). Se realizaron 3 repeticiones para cada condición.

Materia prima

La carambola se adquirió en la Central de Abastos de Tultitlán, Estado de México. Se utilizaron frutos de 6 cm de diámetro y longitud de 9 cm, en rodajas de 5 mm de espesor. La miel se adquirió con vendedores locales del Municipio de Chontla en el estado de Veracruz. Después del corte en rodajas, se retiraron las semillas. A la mitad de las muestras se les aplicó un recubrimiento con miel de abeja por ambos lados con una brocha delgada, antes de secar. La otra mitad se secó sin recubrimiento.

Secado por microondas

Para el secado por microondas, se utilizó un horno de microondas Daewoo, modelo KOR-1N0AW, 1000 W de potencia máxima, 10 niveles de potencia, 2450 MHz, 120 V, con dimensiones: alto: 34 cm x ancho: 56 cm x profundidad: 41 cm. Se empleó una potencia de 100 W, en ciclos de 10 minutos y se colocó un vaso con agua en el centro del plato de vidrio para aumentar la humedad y evitar que se quemaran las muestras, las cuales se colocaron alrededor del vaso. En cada ciclo se registraron la temperatura y el peso de las muestras y se reemplazó el agua para evitar la ebullición y el contacto con las muestras (Teixeira et al., 2017). El secado se llevó a cabo hasta la obtención de peso constante.

Secador solar

Se construyó un secador solar con calentamiento de aire separado, la zona de calentamiento de aire con dimensiones de 61 cm de longitud x 50 cm de ancho x 12.5 cm de altura y la zona de secado de 61 cm de longitud x 26.5 cm de ancho x 34.5 cm de

altura con dos charolas de 24 x 56 cm para colocar el alimento, con capacidad aproximada de 250 g de carambola cada una. Se utilizó madera, plástico, tela mosquitera y pintura negra. El secador contó con una entrada de aire en la parte inferior y una salida de aire húmedo en la parte superior.

Se midió la temperatura en el centro de las muestras y se reportó su peso en periodos de una hora, durante 3 días, hasta obtener un peso constante; al término de cada día se guardaron las muestras en bolsas de plástico con cierre Zip para evitar la absorción de humedad del medio, no se observaron cambios de humedad al inicio de la experimentación al día siguiente.

Parámetros del alimento durante el secado

La temperatura superficial de las muestras se determinó con un termómetro infrarrojo Sovarcate, modelo HS960D. La humedad del producto durante el proceso se calculó a través del peso de la muestra registrado en una balanza electrónica portátil Pocket Scale de 200 g de capacidad, con precisión de 0.01 g.

Curvas Experimentales de Secado y de Velocidad de Secado.

Con los datos de peso de la carambola registrados durante el secado para cada una de las condiciones estudiadas y el valor de humedad inicial, se calculó el contenido humedad en base seca en función del tiempo y se construyeron las curvas de secado. Se calcularon los valores de las pendientes (dX/dt) de las curvas de secado para construir las curvas de velocidad de secado en función de la humedad (García-Mogollón et al., 2016)

Coeficiente de Difusión.

Se calculó el coeficiente de difusión (De) considerando que el mecanismo de transferencia de masa era de naturaleza difusional, la resistencia externa a la

transferencia de masa era despreciable en comparación con la resistencia interna, mediante la aplicación de la segunda Ley de Fick para tiempos largos y placa en una sola dimensión (espesor) sin considerar el encogimiento, como se presenta en la Ecuación 1:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-De\pi^2 t}{4L^2}\right)$$

(1)

Donde MR es la razón de humedad, X es el contenido de humedad [=] kg agua kg ss⁻¹ en el tiempo t [=] s, X_e es el contenido de humedad de equilibrio [=] kg agua kg ss⁻¹, X_o es la humedad inicial [=] kg agua kg ss⁻¹, L es el semiespesor de la lámina [=] m y De es el coeficiente de difusión [=] m²s⁻¹. A partir de las curvas de secado, para cada condición bajo estudio se trazó la gráfica semilogarítmica de la razón de humedad en función del tiempo y con el valor de la pendiente se obtuvo el coeficiente De (Hernández et al., 2011). Aun cuando la longitud característica de difusión cambia de tamaño durante el secado se puede usar una solución analítica y considerar una difusividad promedio para reproducir aceptablemente la evolución de la humedad (Estévez, 2021; Giraldo-Zuniga et al., 2010).

Propiedades Termofísicas

Las propiedades termofísicas del alimento: Conductividad térmica (K_T), calor específico (C_p) y densidad (ρ), se calcularon por medio de las correlaciones empíricas propuestas por Choi y Okos en 1986, con base en la composición de la carambola en 100g de porción comestible: 90g agua, 0.5 g proteína, 0.3 g grasa, 9 g carbohidratos y 0.6 g de fibra (Macavilca, 2019), a temperatura ambiente (19.3 °C).

Propiedad dieléctrica

La propiedad dieléctrica se calculó con la ecuación general (ecuación 4) (Sipahioglu y Barringer, 2003):

$$\epsilon' = 38.75 + 0.1255T + 0.4546H - 14.54C - 0.0037HT + 0.07327CT \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = 17.72 - 0.4519T + 0.001382T^2 - 0.07448H + 22.93C -$$

$$13.44C^2 + 0.002206 * HT + 0.1505CT \quad (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon''j \quad (4)$$

Dónde: T es la temperatura del alimento, C representa a las cenizas y H a la humedad del alimento.

Simulación por el método de elementos finitos usando COMSOL Multiphysics

La simulación de la transferencia de calor durante el secado de carambola en el horno de microondas, tuvo el siguiente procedimiento (Hernández P., 2019):

1. Se creó el modelo en 3D para calentamiento por microondas.
2. Se definió el estudio temporal para transferencia de calor en sólidos.
3. Se configuraron los parámetros, ingresando las dimensiones y frecuencia (2.45×10^9 Hz) del horno de microondas.
4. Se construyeron las geometrías del horno de microondas, el magnetrón, el plato y la carambola, que estaba colocada justo sobre el plato.
5. Se introdujeron las propiedades termofísicas de la carambola: Permitividad relativa = $65-20*j$ (ecuación 2-4), permeabilidad relativa =1, conductividad eléctrica = 0 Sm^{-1} , conductividad térmica = $0.57 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, densidad $1034.13 \text{ kg m}^{-3}$, capacidad calorífica a presión constante = $3910.43 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; del plato (vidrio) y de las paredes del horno de microondas (cobre). Se corrió el programa, al término de la simulación se realizaron puntos de corte en coordenadas X,Y y Z, los cuales corresponden al lugar en donde se realizó el

estudio de la transferencia de calor. Se consideraron tres puntos colocados en el centro del plato en X (0 cm) a 8, 10 y 12 cm de distancia del magnetrón en Y.

Para la simulación de la transferencia de calor durante el secado de carambola, se construyó el modelo del secador solar, así como del alimento de la siguiente manera:

1. En COMSOL Multiphysics se seleccionó el modelo en 2D, transferencia de calor en sólidos, estudio temporal.
 2. Se construyeron las geometrías del secador solar y de la carambola.
 - 3 Se introdujeron las propiedades de los materiales: aire y carambola.
- Al término de la simulación se realizaron puntos de corte en coordenadas X,Y y Z, los cuales corresponden al lugar en donde se realizó el estudio de la transferencia de calor. Se consideraron los puntos de la estrella del extremo izquierdo, del extremo superior, y al centro de esta.

Cambio de Color Total

Se evaluaron los cambios de color en el espacio L, a, b, empleando la aplicación ColorLab, utilizando un teléfono celular ZTE modelo Blade V Smart-2050 para la captura de imágenes. La diferencia total de color CIELAB (ecuación 5) es la distancia en el diagrama CIELAB entre el color de referencia y el color medido (Konica Minolta Inc., 2007):

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (5)$$

Donde:

$$\Delta L^* = L_f - L_i$$

$$\Delta a^* = a_f - a_i$$

$$\Delta b^* = b_f - b_i$$

El subíndice f representa a las muestras después del secado y el subíndice i a las muestras frescas.

Encogimiento

Para determinar el encogimiento se consideró despreciable la reducción en el espesor; se determinó el área inicial (A_1) y final (A_2), después de secar para todas las condiciones de proceso, dibujando la silueta de las rebanadas de carambola sobre un papel milimétrico y se usó la ecuación 6 para obtener el porcentaje de encogimiento (%E) en cada caso (Ortiz-Jeréz y Ochoa-Martínez, 2018).

$$\%E = [(A_1 - A_2) / A_1] * 100 \quad (6)$$

Evaluación Sensorial

Para elegir el proceso en el que se tuviera un producto con mayor aceptación, se realizó una evaluación sensorial, considerando los aspectos de olor, color, sabor y textura, mediante pruebas hedónicas de 4 puntos; se eligió un panel no entrenado de 50 personas mayores de 18 años, a los cuales se les

entregó un formulario.

Resultados y Discusión

Curvas de secado

La pérdida de humedad durante las primeras 10 horas de secado se muestra en la Figura 1. En el secado en horno microondas, la humedad final de la muestra sin miel fue 32% menor en comparación con las muestras con miel. Estos resultados se pueden atribuir a que la miel formó una capa en la superficie de la carambola impidiendo el transporte de agua del interior de la muestra al medio, los azúcares se ven afectados por procesos de secado rápidos provocando un encapsulamiento del contenido de agua en los cristales (Castrillón et al., 2011), por lo que su pérdida de peso fue menor.

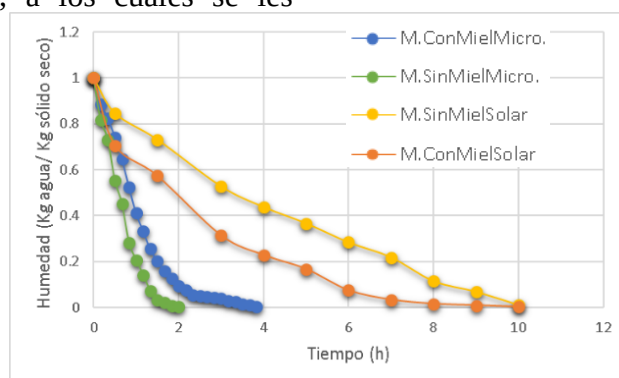


Figura 1. Curvas de secado de carambola en las primeras 10 horas.

En el secador solar, las muestras recubiertas con miel perdieron humedad más rápido que las muestras sin miel, esto se puede atribuir a una deshidratación osmótica en las muestras, ya que al colocarles miel empieza la eliminación de agua contenida, al ponerlo en contacto directo con una disolución altamente concentrada, porque el agua que sale del alimento se difunde a través de la solución osmótica (miel) mientras que la molécula de soluto se transporta inicialmente a través de la solución acuosa y luego dentro de la estructura celular vegetal con el fin de

establecer el equilibrio (Muñiz, 2019). El tiempo de secado en horno de microondas, comparado con el tiempo en un secador solar, fue mucho menor.

Curvas de velocidad de secado

La Figura 2 muestra la velocidad de secado en función de la humedad para carambola. Las muestras con y sin recubrimiento de miel secadas en el horno de microondas tuvieron valores de velocidad de secado en el período constante de 1.42 y 1.36 kg agua $h^{-1} m^{-2}$ respectivamente, el período decreciente

*arelyyangel@gmail.com

empezó a las 0.66 h para las muestras con miel y a las 0.5 h para las muestras sin miel. Las muestras en el secador solar obtuvieron menores velocidades de secado en período constante: $0.32 \text{ kg agua h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ para las

muestras sin miel y 0.42 para las muestras con miel. Se tuvo velocidad constante, entre las 0.5 - 1.5 h de secado y velocidad decreciente después de 1.5 h.

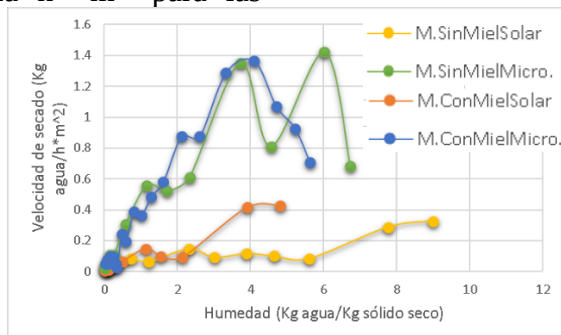


Figura 2. Curvas de velocidad de secado de carambola.

Coefficiente de Difusión (De)

Las muestras secadas al sol recubiertas con miel y sin miel tuvieron valores para $De = 9.84 \times 10^{-7}$ y $9.66 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, respectivamente. El orden de magnitud es similar al reportado por Giraldo-Zuniga et al., (2010) para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) de 5 mm de espesor, a 50°C en un secador convectivo ($1.71 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$). Para el secado solar de frutas y hortalizas entre 42 y 60°C con espesores de 5 y 7 mm Hernández L., et al. (2011), calcularon valores para De entre 0.85 a $2.32 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Las temperaturas en el secador del presente proyecto oscilaron entre 31 y 49°C . Las diferencias en las condiciones experimentales podrían explicar los distintos ordenes de magnitud obtenidos. Las muestras secadas en horno de microondas con miel y sin miel tuvieron valores mayores para De que los del secador solar: 9.35×10^{-6} y $9.41 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ respectivamente; se han reportado valores entre 10^{-4} y 10^{-9} para frutas en el secado por microondas (García-Mogollón et al., 2016). En el presente trabajo se empleó una potencia del horno baja (100W), por lo que los resultados se consideran aceptables. Las muestras con miel secadas al sol y por horno de microondas obtuvieron humedades finales de 4 y 5% respectivamente, lo cual permite la conservación de frutas secas.

Curvas de temperatura

En el secado por horno de microondas, las rodajas sin miel obtuvieron valores mayores de temperatura (43.7°C), con una humedad de $4 \text{ kg agua kg ss}^{-1}$, mientras que las muestras con miel a esta humedad alcanzaron 18% menos temperatura en su superficie; esto se atribuye a que para convertir las formas de energía del horno de microondas a calor, el campo dieléctrico oscilante incide en las moléculas de agua y estas al intentar realinearse en la dirección del campo causan una fricción interna de las moléculas provocando el calentamiento interno de la carambola, por lo que a mayor cantidad de agua mayor es la rotación dipolar (Hernández M., et al., 2017). Los valores más altos de temperatura para los diferentes tratamientos se obtuvieron en humedades de 1- 6 kg agua kg ss^{-1} . Las curvas de temperatura durante el secado solar de carambola, presentan comportamientos diferentes, en las muestras con miel se alcanzaron temperaturas máximas de 38°C , mientras que en las muestras sin miel, de 41.6°C ; estos cambios de temperatura pueden deberse a que se rotaban las charolas en cada lectura de temperatura y peso, ya que la parte superior del secador era transparente por lo que las muestras en la posición de arriba se secaban más rápido, por otra parte, la temperatura del medio no permaneció constante durante todo el tiempo de experimentación. En el horno de microondas se obtuvieron valores de

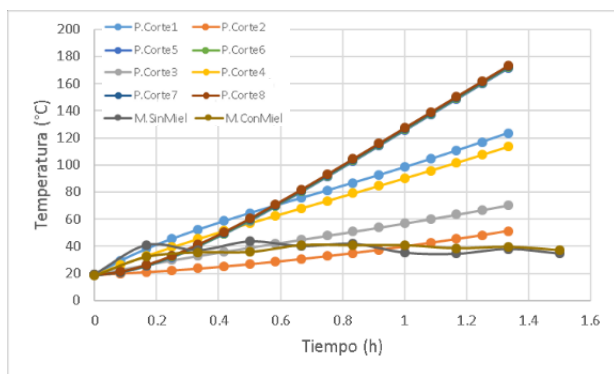
temperatura más altos, al tener un alto contenido de humedad en la carambola; el agua en el alimento se puede encontrar en forma libre y ligada; bajo la acción de un campo eléctrico, las moléculas polares de agua libre se orientan más fácilmente que las del agua ligada, provocando el calentamiento (Barbosa et al., 2016). En el secado solar se obtuvieron temperaturas menores al inicio del proceso, sin embargo, estuvieron en un intervalo de 25 - 35 °C para la mayoría de las lecturas, dependiendo de las condiciones climáticas. En la entrada de aire del secador solar se registraron valores de 31 y 42 °C como máximo, mientras que en la salida del aire fueron de 36 y 49 °C como máximo; al no ser procesos en sistemas cerrados, se tuvieron cambios entre cada lectura.

Simulación de Perfiles de Temperatura (COMSOL)

Secado por horno de microondas.

En la Figura 3 se presentan las gráficas de

temperatura obtenidas en el horno de microondas; en (a), se presentan los perfiles de temperatura experimentales y simulados; la recta en el punto de corte 8 corresponde a un punto evaluado en el centro de la carambola; el punto de corte 2 corresponde a un punto evaluado en una punta de la carambola, esto indica que el alimento va obteniendo calor desde el centro hacia la superficie de la muestra; en (b), se muestra la simulación. Las gráficas experimentales de temperatura de carambola con y sin recubrimiento de miel alcanzaron temperaturas similares a las simuladas en las orillas de la muestra, por lo que se considera que la simulación es cercana a la experimentación. La temperatura se midió solo en la superficie de la carambola y las muestras experimentales se sacaban del horno cada 10 min para su evaluación, por lo que es probable tener una disminución de temperatura en cada ciclo.



a

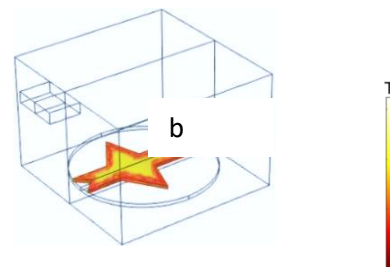


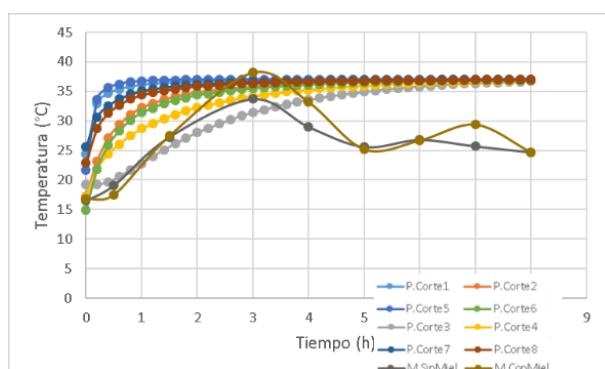
Figura 3 Transferencia de calor en horno de microondas. a) Perfiles de temperatura experimentales y simulados b) Simulación.

La Figura 4 muestra la transferencia de calor experimental y simulada durante el secado

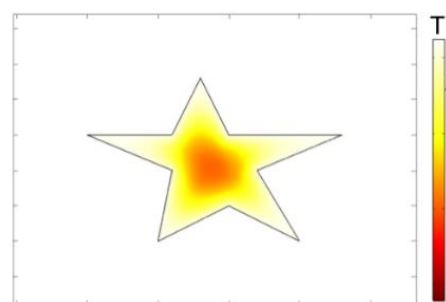
solar; en a), se presentan los perfiles de temperatura. La recta de Punto de Corte 1

corresponde a un punto evaluado en la punta de la carambola, mientras que el Punto de Corte 3 corresponde a un punto evaluado en el centro de la carambola. En b) se muestra la simulación de temperaturas; ocurre lo contrario a lo que se obtuvo en el secado por microondas ya que la transferencia de calor se da desde el aire dentro del secador hacia la carambola, por lo que en determinado intervalo de tiempo la superficie de la carambola adquiere mayor temperatura que su centro y conforme pasa el tiempo, la

temperatura del aire y del alimento se igualan. Las curvas de las muestras con y sin miel, se acercan a un Punto de Corte al centro de la carambola, la simulación es similar a la experimentación durante las primeras 3 horas; los valores de temperatura fueron cercanos, tomando en cuenta que al secar al sol la temperatura en el entorno no se mantiene constante y teniendo pérdidas de calor al momento de abrir el secador solar para medir la temperatura de las rodajas de carambola durante la experimentación.



a



b

Figura 4. Transferencia de calor en el secador solar. a) Perfiles de temperatura experimentales y simulados. b) Simulación.

Cambio de color

Las muestras secadas por microondas presentaron menor cambio de color total ΔE (sin miel, 29.3, con miel 21.04) que las secadas al sol (sin miel 32.55, con miel 35.36) en el solar, los valores ΔE son más cercanos entre sí (8%), que los de microondas.(28%). Para ambos secadores las muestras recubiertas con miel conservaron un color similar a su estado fresco, esto se le atribuye a que la actividad antibacteriana de la miel se debe a la acción de la enzima glucosa oxidasa, que produce peróxido de hidrógeno y ácido glucónico a partir de la glucosa en determinadas condiciones de dilución (Baglio, 2018). Esta reacción le permite a la glucosa-oxidasa, eliminar la glucosa de ciertos alimentos, para evitar su pardeamiento posterior (Arias-Giraldo y López-Velasco, 2019). La muestra con miel y

secada por microondas tuvo colores hacia el amarillo claro, por lo cual es la más aceptable visualmente.

Encogimiento

En la Figura 5, se observan fotografías de carambola fresca y después del secado. En el secado por horno de microondas las muestras sin miel tuvieron un encogimiento de 35%, las muestras con miel presentaron 25% de encogimiento. En el secado solar las muestras sin miel se encogieron 40%, las muestras con miel, 25%. La contracción o colapso es el cambio de volumen durante el procesado debido a la pérdida de humedad. Las muestras con miel presentaron mejores resultados, conservaron mejor su estructura comparada con su estado fresco; las muestras sin miel se compactaron más. Este fenómeno se atribuye a que la miel

formó una corteza, lo cual ocurre cuando la superficie del alimento se seca por completo, creando una costra que evita que la humedad que estaba emergiendo desde el interior continúe su curso. Se puede minimizar

reduciendo la velocidad de secado, así, la humedad perdida por la superficie del producto es sustituida por la humedad del interior. (Ochoa-Reyes et al., 2013).

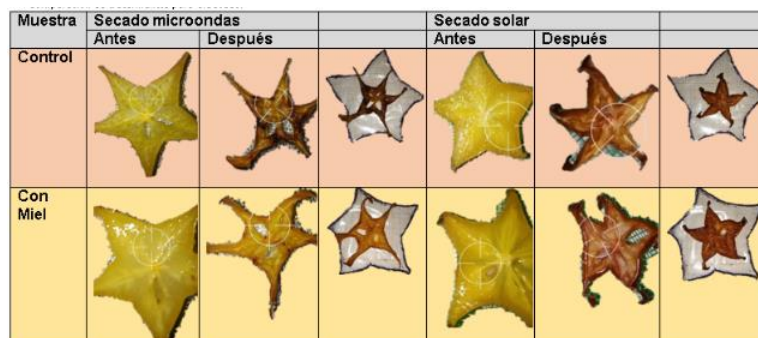


Figura 5. Comparación de tratamientos para el secado de carambola.

Evaluación sensorial

En las pruebas hedónicas, el olor fue casi imperceptible por lo que fue indiferente para cada muestra. El color de las muestras secadas al sol tanto la que no tenía miel como la recubierta con miel fueron indiferentes, mientras que la muestra sin miel secada por horno de microondas fue la que menos les gustó a los jueces, con un resultado de “no me gustó”. La muestra secada por horno de microondas recubierta con miel fue la más aceptada con un resultado de “me gustó”. El sabor de las muestras control en ambos secadores obtuvieron un resultado de “indiferente”, mientras que las muestras recubiertas con miel obtuvieron una aceptación con “me gustó”. En cuanto a textura las muestras recubiertas con miel para ambos secadores tuvieron un resultado de “indiferente”, la muestra sin miel secada al sol tuvo un resultado de “no me gustó” y la muestra sin miel secada en horno de microondas fue la de menor aceptación con “lo odio”. La muestra recubierta con miel y secada por microondas fue la más aceptada en los cuatro aspectos estudiados.

Conclusiones

El uso del recubrimiento con miel en los diferentes tratamientos no impidió alcanzar valores finales de humedad menores a 10%, por lo que no se afectó la finalidad del secado. En el secado en horno microondas, la humedad final de la muestra sin miel fue 32% menor en comparación con las muestras con miel.

Los valores de humedad final más bajos en ambos métodos de secado se obtuvieron en las muestras sin recubrimiento.

La velocidad de secado de carambola en el secador solar fue 70% menor comparada con las muestras secadas por microondas.

Puede utilizarse la segunda Ley de Fick para describir el proceso de secado solar de carambola.

La simulación de los perfiles de temperatura en ambos secadores mediante el software COMSOL Multiphysics se aproximó a los datos experimentales y reflejó el proceso de transferencia de calor.

En el secado por microondas las muestras sin miel tuvieron 28% más cambio de color que las muestras con miel.

Las muestras con miel se encogieron menos durante el secado en ambos secadores. Las muestras con recubrimiento y secadas por horno de microondas tuvieron mayor aceptabilidad en la evaluación sensorial.

Reconocimientos

Se agradece el apoyo financiero de los proyectos UNAM DGAPA PAPIME PE213020 y FESC UNAM PIAPI 2057

Referencias

- Arias-Giraldo, S. y López-Velasco, D. (2019). Reacciones químicas de los azúcares simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos*, (22),123-136.
<https://www.redalyc.org/journal/6139/613964509011/html/>
- Baglio, E. (2018). *Chemistry and Technology of Honey Production*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-65751-6>
- Barbosa de Lima A. G., Delgado J. M. P. Q., Silva E. G., de Faras Neto S. R., Santos J. P. S. y de Lima W. M. P. B. (2016). Drying process in electromagnetic fields. En: J. Delgado, y A. Barbosa de Lima (Eds). *Drying and Energy Technologies*. Advanced Structural Materials (63 pp. 89-110) Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_5
- Castrillón N., Pabón B., y Reif-Acherman S. (2011). Influencia de las condiciones del secado en el aterronamiento y la compactación del azúcar almacenado. *Ingeniería y Competitividad*, 13 (1), 9-23. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323660001>
- Choi, Y. y Okos, M. R. (1985). Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In M. Okos (Ed.) *Physical and Chemical Properties of Food* (pp. 93-10). American Society of Agricultural Engineering.
- COMSOL. (2016). *The finite element method (FEM)*. Multiphysics Cyclopedia.
<https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method?parent=physics-pdes-numerical-042-62>
- Durán Ibarra, A. M., y Cano Gómez, M., (2015). Jugo de Carambola y Granadilla (Averrhoa Carambola y Pasiflora Liglaris). En: C. Solano Sosa (Ed.) *Memorias XII Congreso Participación de la Mujer en la Ciencia*. Centro de Investigaciones en Óptica A.C.
http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion1/S1-MCS08.pdf
- Estévez Sánchez, K. H. (2021). *Análisis del transporte de masa y calor durante la deshidratación de sólidos con geometrías derivadas de sistemas coordenados ortogonales*. [Tesis doctoral, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla] Repositorio Institucional de la BUAP.
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/11777>
- García-Mogollón, C., Torregroza-Espinosa, A., y Sierra-Bautista, M. (2016). Drying Kinetics of Cassava Chips (*Manihot esculenta crantz*) in Microwave. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia* 39 (3), 98-103.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702016000300001

- Giraldo-Zuniga, A. D., Arévalo-Pinedo, A., Ferreira, A., Ferreira, P., Valdes-Serra, J. C. y Pavlar, M. C. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 30(1), 179-182.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=395940099027>
- Hernández Londoño, C., Karina Ossa Z., Ramírez Perdomo, L. y Herrera Valencia, W. (2011). Influencia del espesor y la temperatura en el secado de carambola (*Averrhoa carambola* L.) *Ingenierías & Amazonia* 4(2), 31-142.
<https://xdoc.mx/documents/averrhoa-carambola-l-universidad-de-la-amazonia-5e163a152d963>
- Hernández Moreno A., Hernández Maqueda R. y Ballesteros, I. (2017). Secado industrial con microondas. En J.A. Menéndez y A.H. Moreno (Eds.) *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas* (pp. 85-118) Universidad Técnica de Cotopaxi.
<https://digital.csic.es/handle/10261/148728>
- Hernández Pérez, G. (2019). *Efecto del calentamiento en microondas usando lógica difusa para la predicción de la transferencia de calor en distintos alimentos*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM Digital
<http://132.248.9.195/ptd2019/mayo/0789119/Index.html>
- Hernández Rodríguez, J., Quinto Diez, P., Barbosa Pool, G.R., y Aguilar Aguilar, J.O. (2017). Secado Solar de Frutas y Verduras en Quintana Roo, México. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 18 (1), 1-8
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81351597001>
- Konica Minolta Inc. (2007). Precise color communication. Color control from perception to instrumentation.
http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf
- Macavilca Yacsavilca, Z. M. (2019). *Evaluación de la actividad antioxidante y compuestos fenólicos de carambola (Averrhoa carambola L) en temperatura ambiente y refrigeración*. [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Union]. Repositorio Universidad Peruana.
<https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2075>
- Muñiz Becerá, S. (2019). *Estudio de los mecanismos de transferencia de solutos durante la deshidratación osmótica de manzana (Granny Smith* [Tesis doctoral, Instituto Politécnico Nacional]. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional CIIDIR Unidad Oaxaca.
http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/jspui/bitstream/LITER_CIIDIROAX/525/1/Mu%C3%B1iz%20Becer%C3%A1%2C%20S.%2C%202019.pdf

- Ochoa-Reyes, E., Ornelas-Paz, J.J., Ruiz-Cruz, S., Ibarra-Junquera, V., Pérez-Martínez, J.D., Guevara-Arauza, J.C., y Aguilar, C. (2013). Tecnologías de deshidratación para la preservación de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) *Biotecnia. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*. 15(2), 39 – 46.
<https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/148>
- Ortiz-Jeréz, M. J. y Ochoa-Martínez, C.I. (2018). Efecto de las condiciones del hidrosecado sobre el encogimiento de trozos de zapallo (*Cucurbita maxima*) *Ingeniería y Competitividad* 20(2), 37- 44.
https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/5809/9875
- Sipahioglu, O. y Barringer, S. A. (2003). Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash, and moisture content. *Journal of Food Science*. 68(1), 234–239.
<https://ift-onlinelibrary-wiley-com.pbidi.unam.mx:2443/doi/epdf/10.1111/j.1365-2621.2003.tb14145.x>
- Teixeira Pozzetti M., Campos, C.N.S., Prado, R.M-, Caione, G., Mingotte F.L.G., y Agostino, F.B., (2017). Secado de tejido de plantas con microondas para el análisis nutricional en *Corymbia citriodora* (Hook.) y *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. *Agrociencia*, 51(5), 555-560.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-3195201731952017000500555&lng=es&nrm=iso