



Cinética de deshidratación por liofilización de maíz para la elaboración de botanas

D. Márquez - Aquino*, F. Vergara - Balderas

Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Fundación Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda Sta. Catarina Mártir, Cholula, Puebla. CP 72820. México.

Resumen

Se determinaron las cinéticas de deshidratación por liofilización de granos de maíz salados y acidificados, para la obtención de botanas. Previamente se determinaron las concentraciones necesarias de aditivos para obtener el sabor deseado y se estableció un tiempo de cocción. Se determinó la velocidad de congelación con una y dos capas de espesor de los granos (1 y 2 cm), obteniéndose el menor tiempo de congelación para una capa. Se analizó la cinética de deshidratación de las botanas de granos de maíz usando diferentes temperaturas de calefacción (25, 35 y 45 °C) y distintos números de capa (una y dos). La humedad final del producto liofilizado fue menor al 10 %.

Palabras clave: liofilización, cinética de deshidratación, botanas de granos de maíz, curvas de congelación

Abstract

Corn kernels were treated with freeze drying with the aim to obtain a new product: corn kernels snack with an acid and salty flavor. As pretreatment, the adequate additive concentrations were used in order to obtain the desired flavor, and a cooking time was established. The freezing velocity was determined in trays with kernels with one and two layer thickness (1 and 2 cm each one), achieving the minimum freezing velocity time for one layers thickness. The dehydration kinetic of the corn kernels snacks was analyzed and the best drying time was selected in accordance to the heating plates temperature (25, 35 y 45 °C) and the layer thickness (one and two layers). The final product moisture was less than 10 %.

Keywords: freeze drying, dehydration kinetic, corn kernels snack, freezing curves

Introducción

El maíz es un cereal altamente cultivado en el mundo, debido a su capacidad inigualable de

cultivo y su elevado consumo. Los principales productores de maíz son: Estados Unidos de América, con un 40 % de la producción total; China con un 19 %; Brasil con un 6 % y México con un 3 % (SIAP, 2007). En México,

*Programa de Maestría en Ciencias de Alimentos
Tel.: +52 222 229 2126, fax: +52 222 229 2727
Dirección electrónica: daniela.marqueza@udlap.mx

puesto que el maíz presenta una amplia gama de variedades, se han generado una gran cantidad de productos finales como: tortillas, harina de maíz, masa, aceite de maíz, cereales para el desayuno, jarabes, aceites, botanas, pastas, sémola, almidones, glucosa, fructosa, bebidas sin alcohol, forraje para animales, etanol para bebidas o como insumo en la producción de biocombustible, entre otros (FAO, 1993; FAO, 2001; SIAP, 2007). Pero para los productores de maíz estos productos no son suficientes, así que buscan elaborar nuevos productos que les permitan obtener mayor aprovechamiento de la materia prima y mejores ganancias; por lo que surge la idea de crear botanas salada y ácida de granos de maíz liofilizados.

La liofilización es un proceso que origina productos de alta calidad y conserva la estructura del material; tiene dos características importantes: la ausencia de aire que junto a la baja temperatura previene el deterioro por oxidación; y el secado a una temperatura inferior a la ambiente, lo cual causa un daño mínimo en el producto final (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 1999). El proceso de liofilización está constituido por tres fases: congelación, secado primario (sublimación del hielo) y secado secundario (eliminación del agua) (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 1999; Tambunan *et al.*; 2001). La muestra antes de secarse, se congela (Chin *et al.*, 2008). La congelación del producto debe ser rápida para obtener cristales de hielo muy reducidos (amorfos) (Welti-Chanes *et al.*, 2004). El tiempo de congelación del producto depende de la temperatura inicial y final del mismo, de la cantidad de calor que es removido, de las dimensiones del producto (grosor), del calor transferido y de la temperatura del medio (Mallet, 1993). Después, el agua se elimina por sublimación (Marques y Freire, 2005). En diagramas de fases de agua (temperatura, presión), se observa que al disminuir la presión (descender por debajo del punto triple; presión de 627 Pa) y la temperatura del agua

del alimento (por debajo del punto denominado zona de eutexia, donde se consigue el máximo grado de solidificación), se logra la sublimación (Welti-Chanes *et al.*, 2004).

El proceso de liofilización requiere altas cantidades de energía que aumentan el costo y del producto obtenido, aunque se compensa debido a que se conservan las propiedades del alimento (olor, sabor y color) y se aumenta la vida de anaquel. Es un proceso que se considera como una alternativa más que ayuda a la preservación de alimentos (Ratti, 2001; Claussen *et al.*, 2007; Trelea *et al.*, 2007). La calidad de los productos liofilizados se ve afectada por las características de la materia prima (como el grado de madurez), y las condiciones de operación (como la presión de la cámara, la velocidad de calentamiento y la velocidad de congelación) (Grajales-Agudelo *et al.*, 2005). La estructura esponjosa del producto liofilizado permite una rápida rehidratación (de 4 a 6 veces más alta que el secado por aire) (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 1999; Ratti, 2001). Los tiempos de secado requeridos para el proceso de liofilización son substancialmente mayores comparados con los métodos de secado convencional por evaporación (Sadikoglu *et al.*, 2006).

En esta investigación se generaron productos de maíz con un alto valor agregado, que contribuyen a diversificar las alternativas de procesamiento de este cereal; en este caso con granos de maíz previamente sometidos a un proceso de cocción con aditivos y luego liofilizados, para obtener botanas salada y ácida. El objetivo general de esta investigación fue determinar la cinética de deshidratación por liofilización de granos de maíz salados y acidificados, para la obtención de botanas.

Materiales y métodos

1. Obtención de los granos de maíz

Se utilizó maíz criollo (*Zea mays Linnaeus.*) blanco de grano grande. La mazorca se deshojó y se seleccionó de forma subjetiva de acuerdo al tamaño (grande o mediano), ternura media y aspecto de los granos de maíz. Una vez seleccionada la mazorca se desgranó de forma manual.

2. Pretratamiento del grano de maíz para botanas

2.1 Mezcla de aditivos y proceso de cocción

La cocción se realizó de acuerdo a lo recomendado por Pérez-Pérez *et al.* (2007) (relación de 100 g de maíz en 0.171 L de solución). Se prepararon las soluciones y posteriormente se colocaron los granos para el proceso de cocción de acuerdo a lo mencionado por Márquez-Aquino (2009). Para la botana salada se preparó una solución con una concentración de 0.88 % de sal; y para la botana ácida se preparó una solución al 0.88 % de sal con 0.59 % de ácido cítrico. La mezcla hirvió durante 45 minutos en una estufa de gas. Posteriormente, se filtró la mezcla con una coladera para separar la solución de los granos. Por último, se determinó la humedad de los granos cocidos por diferencia de pesos, secando en una estufa al vacío a 135°C durante ocho horas, de acuerdo al método 7.007 de la A.O.A.C. (1984). Esta determinación se hizo por triplicado.

2.2 Congelación de los granos de maíz

Los granos de maíz se colocaron en charolas formando una y dos capas, 1.0 y 2.0 cm de espesor, respectivamente. Se instaló un termopar de cobre-constantano en el centro y la orilla de dos diferentes granos para registrar las temperaturas del producto mediante un lector Cole-Parmer (modelo 92800-00,

Scanning Thermocouple Thermometer, EE.UU.). Las charolas se introdujeron en un congelador a -45°C (Revco, EE. UU.) y la temperatura se registró cada 5 minutos para generar las curvas de congelación. La congelación se dio por terminada al observar que la temperatura del grano permanecía constante. Para la obtención de las curvas del porcentaje de agua congelada, se siguió el procedimiento detallado por Heldman y Singh (1981) y Márquez-Aquino (2009).

3. Proceso de liofilización

Se utilizó un liofilizador (modelo Lyph-Lock 6 Freeze System, LABCONCO, EE.UU.) operando con placas calefactoras a 25°C, 35°C y 45°C, a un nivel de presión de 0.1-0.2 mm Hg y a una temperatura del condensador de -55°C.

3.1 Preparación de las charolas con muestras para liofilizar

Para cada corrida se usaron tres charolas con granos previamente congelados. El peso inicial de las charolas se registró en una balanza (modelo Scout Pro SP2001, Ohaus Corporation, EE. UU.) cuya sensibilidad es de 0.1g. Las charolas con una capa de espesor contienen 0.177 ± 0.024 kg de granos y con dos capas 0.387 ± 0.032 kg. Se calentaron las placas a la temperatura de trabajo y se colocaron las charolas en la cámara del liofilizador.

3.2 Ciclo de liofilización

Una vez introducidas las charolas dentro de la cámara, se hizo vacío hasta una presión de 0.1-0.2 mm Hg. Cuando se alcanzó dicha presión se verificaron la temperatura del condensador, la presión y la temperatura dentro de la cámara y se inició el proceso de liofilización. Dos horas después, se rompió el vacío y una vez establecida la presión atmosférica, se pesaron nuevamente las charolas. En seguida, las charolas se introdujeron al liofilizador para

continuar con el proceso y se verificaron las condiciones del equipo. El proceso anterior se repitió cada dos horas. El ciclo de liofilización terminó cuando entre dos intervalos de tiempo, la variación del peso fue menor a 0.002 kg y la humedad final fue menor al 10 % (en base húmeda). Al terminar, la muestra fue envasada dentro de bolsas, que luego fueron selladas, y se almacenó en un cajón donde no existían cambios de humedad.

Resultados y discusión

1. Pretratamiento de los granos de maíz

Los valores de humedad para las botanas ácida y salada al final de la cocción fueron similares, encontrándose en un intervalo de 79.0 a 81.0% en base húmeda. Comparando con la humedad del grano fresco obtenida experimentalmente ($68.27 \pm 0.59\%$), se observa un aumento de humedad de los granos cocidos en soluciones ácida y salada. Los cambios de humedad se deben a que el grano de maíz es un material poroso que tiene una membrana semipermeable, la cual permite la transferencia de masa en la disolución. El tamaño de los poros es tan minúsculo que deja pasar las moléculas pequeñas pero no las grandes. Las moléculas de agua, sal o ácido son pequeñas, por lo que no tienen problemas para entrar. En el proceso de cocción se produjo un fenómeno de transferencia de masa de la disolución hipotónica (menor concentración- soluciones de sal y ácido) a la disolución hipertónica (mayor concentración- solución en el interior del grano de elote) (Gekas, 1992).

2. Curvas de congelación para las botanas ácida y salada

2.1 Efecto del espesor de la capa de granos sobre el tiempo de congelación

En la Fig. 1 se presentan las curvas de congelación de las botanas salada y ácida con

una capa y dos capas de espesor. Los datos obtenidos experimentalmente del termopar en el centro y en la orilla del grano de maíz son similares, por lo tanto, se toma en cuenta el termopar en el centro, ya que es importante asegurar que el grano esté completamente congelado.

En la Fig. 1a se observa que la remoción de calor sensible es más rápida en la charola con una capa de granos, ya que el tiempo requerido para alcanzar una temperatura de -0.1°C es de 5 minutos. También se observa una meseta que indica la remoción del calor latente de congelación (calor necesario para el cambio de fase), con una duración de 20 minutos. En la charola con dos capas se alcanza la misma temperatura (-0.1°C) en un tiempo de 28 minutos y la meseta se observa durante 70 minutos. Después de la meseta, la temperatura continúa disminuyendo, por lo que se sigue eliminando calor; a este proceso se le conoce como sub-enfriamiento o reducción a la temperatura de almacenamiento. En este período se remueve gran cantidad de la energía, la temperatura se reduce desde la temperatura en la cual la mayoría del agua congelable ha sido convertida a hielo, hasta la temperatura final prevista; el agua se separa como cristales de hielo puro (Mallet, 1993). La transferencia de energía en la charola con dos capas es más lenta comparada con la de una capa, ya que los granos en la parte inferior del espesor tardan más en transferir energía hacia el medio de congelación (el centro del espesor de capa se enfria más lento) y como consecuencia el tiempo requerido para la congelación es mayor.

Es importante considerar el tamaño de los cristales de hielo, el cual puede afectar subsecuentemente la velocidad de secado; los cristales más pequeños producirán un tamaño de poro más pequeño, lo cual dificultará la salida del vapor de agua. Si los poros son

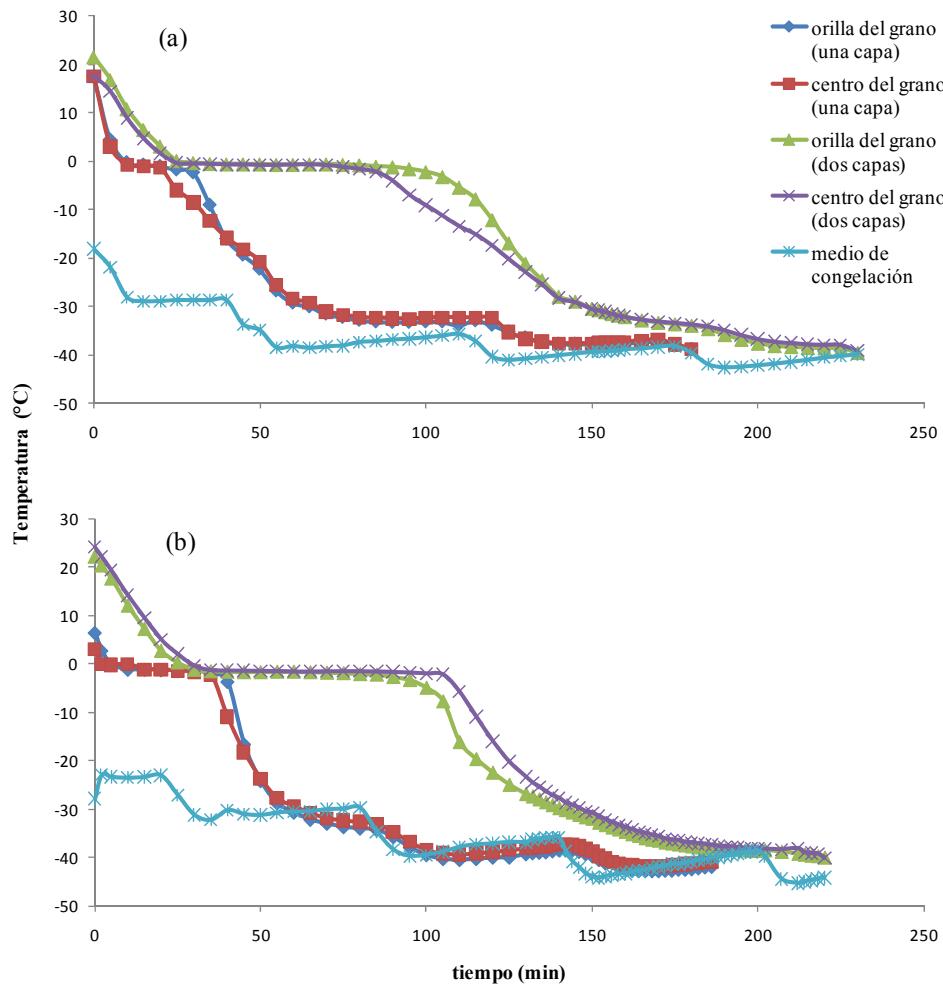


Fig. 1. Curvas de congelación de la botana ácida (a) y salada (b)

grandes, existirá mayor flujo másico y los tiempos de secado serán más cortos (Heldman y Singh, 1981; Lewis, 1990; Marques y Freire, 2005; Welti-Chanes *et al.*, 2004). El proceso de liofilización requiere la formación de poros grandes del vapor de agua del alimento (Welti-Chanes *et al.*, 2004). En general, el proceso de congelación del grano de maíz, para una o dos capas, presenta una velocidad de congelación lenta y, por lo tanto, se favorece la liofilización.

La curva de congelación de la botana ácida (Fig. 1b) presenta un comportamiento similar a la curva de congelación de la botana salada,

por lo que se confirma que con una capa de espesor la velocidad de congelación es menor.

En la Tabla I se encuentran los datos obtenidos de cada curva de congelación; se presentan los tiempos de congelación de los granos de maíz cocidos, que es el tiempo requerido para que la variación de temperatura en un periodo de dos horas sea mínima (0.1°C); y la temperatura inicial de congelación observado en las gráficas, la cual corresponde al primer cambio de pendiente en la curva de congelación. Muchos productos contienen diferentes componentes que influyen en la magnitud de la depresión del punto de

Botana ^b	Tiempo (min)		Punto inicial de congelación (°C)	
	1 capa	2 capas	1 capa	2 capas
Ácida	180	230	-1.1	-1.2
Salada	186	220	-1.4	-1.2

^a Tiempo que tarda en mantenerse constante la temperatura del grano

^b Granos de maíz cocidos en solución de NaCl (salada) o en solución de NaCl y ácido cítrico (ácida)

congelación del alimento respecto a la temperatura de congelación del agua; y es imposible evaluar los componentes que más contribuyen a dicha depresión (Heldman y Singh, 1981).

Se observa que los tiempos de congelación no presentaron diferencia considerable para los dos tipos de botanas. Por otra parte, el punto inicial de congelación para el grano estuvo entre -1.1 y -1.4 °C. Rahman (1995) reporta que la temperatura de congelación del maíz blanco es -1.7 °C. Por lo tanto, los datos obtenidos en este estudio fueron cercanos. Las diferencias de la temperatura inicial de congelación posiblemente se deban a la composición, a la variedad o a la maduración del grano y a que se coció el grano antes de la congelación, a diferencia del grano fresco que se encontró reportado.

2.2 Análisis del porcentaje de agua congelada

La humedad del producto y su punto inicial de congelación son utilizados para la obtención del peso molecular promedio de los solutos efectivos, el cual puede ser usado para calcular el porcentaje de agua congelada existente en el producto a temperaturas por debajo del punto de congelación (Heldman y Singh, 1981). En este estudio se obtuvo el porcentaje de agua congelada a diferentes temperaturas. Se observó que no existe diferencia considerable entre las dos posiciones de los termopares en el porcentaje de agua congelada y que el comportamiento de las dos botanas fue similar.

En la Tabla II se reportan los valores de la temperatura para congelar la mayor parte del agua (alrededor de un 80 %) y la temperatura final alcanzada. Como se observa, la mayor parte del agua está congelada a una temperatura menor a -9.0 °C. Por debajo de esta temperatura el porcentaje de agua congelada es mayor al 80 %. No existe gran diferencia entre las temperaturas finales alcanzadas para las botanas ácida y salada con una y dos capas de granos de maíz, por lo tanto, la temperatura final obtenida estuvo entre -38.9 y -40.7 °C. En la Fig. 2 se observan las curvas del porcentaje de agua congelada para las botanas ácida y salada, para uno y dos espesores de capa con el termopar en el centro del grano de maíz. Para la botana salada con 1 capa el porcentaje de agua congelada a una temperatura de -10.0 °C es del 82.87 % y para 2 capas es del 88.28 %; y para la botana ácida con una capa es del 89.45 % y con dos capas es del 88.28 %. Los porcentajes entre los dos tipos de botanas son muy cercanos. Existe una cierta proporción de agua (alrededor del 10 %) que permanece sin congelar y que corresponde a la fracción de agua más ligada a los compuestos del alimento (Braverman, 1986). Conocer el porcentaje de agua congelada permite establecer las condiciones necesarias para el proceso de congelación, es decir, para determinar la temperatura a la cual debe ser almacenado el alimento para que se mantenga congelada la mayor parte del agua (Heldman y Singh, 1981).

Tabla II. Temperatura para tener la mayor parte del agua congelada y temperatura final alcanzada en la congelación de botanas^a de maíz

Botanas ^a	Con la mayor parte de agua congelada (80%) (°C)		Final alcanzada (°C)	
	1 capa	2 capas	1 capa	2 capas
Ácida	-5.9	-5.4	-38.9	-39.5
Salada	-8.9	-5.7	-40.7	-40.0

^a Granos de maíz cocidos en solución de NaCl (salada) o en solución de NaCl y ácido cítrico (ácida)

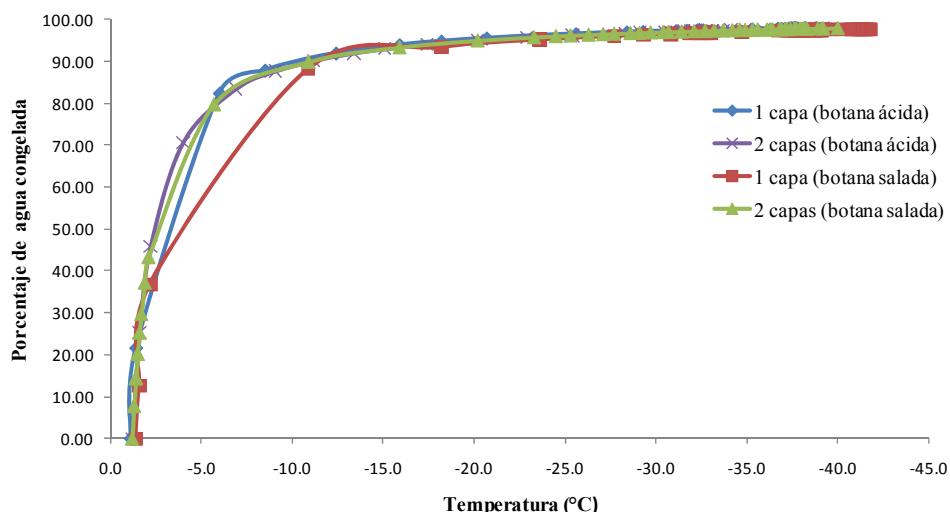


Fig. 2. Porcentaje de agua congelada durante el proceso de congelación para las botanas ácida y salada con el termopar en el centro del grano de maíz

3. Cinética de deshidratación para los dos tipos de botanas

El proceso de secado es una operación unitaria importante en la industria de alimentos y se define como la eliminación de la humedad de un producto; en la mayoría de las situaciones prácticas la etapa principal del proceso es la transferencia interna de materia (Lewis, 1990).

Una curva de secado se obtiene al representar la humedad del alimento en base seca frente al tiempo de secado (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996). En la Fig. 3 se presentan las curvas de secado de las botanas salada (a) y ácida (b). Las curvas de secado permiten conocer la humedad final

obtenida después del proceso de liofilización, la cual es de suma importancia para identificar los cambios en el grano y la estabilidad que presenta el producto final. En la Tabla III se muestran los valores de la humedad final y los tiempos de secado de las dos botanas con una y dos capas de espesor y a tres temperaturas de calefacción (25, 35, 45 °C).

Al terminar el proceso de liofilización, las botanas presentaron contenidos de humedad entre 0.0212 y 0.1611 kg H₂O/kg s.s., siendo la mayoría de estos valores inferiores a 0.1111 kg H₂O/kg s.s. (10% en base húmeda). El espesor de la capa de granos de maíz sometidos a liofilización y la temperatura de calefacción en las placas del liofilizador, son

Tabla III. Tiempo requerido para la liofilización^a y humedad al finalizar el proceso de secado

Temperatura de calefacción	Espesor de capa	Botana ácida		Botana salada	
		Tiempo (horas)	Humedad (kg H ₂ O/kg s.s.)	Tiempo (horas)	Humedad (kg H ₂ O/kg s.s.)
25 °C	1	15.83	0.0287	14.50	0.1611
	2	29.92	0.0449	29.92	0.073
35 °C	1	11.92	0.027	12.08	0.0712
	2	23.75	0.0563	23.75	0.1180
45 °C	1	10.00	0.0657	10.00	0.0315
	2	19.00	0.0954	19.00	0.0212

^a Tiempo al cual la variación del peso de la muestra fue menor a 0.002 kg

factores determinantes en el tiempo de secado necesario para el proceso de liofilización.

3.1 Efecto del espesor de capa sobre la cinética de deshidratación

El espesor de la capa es de suma importancia ya que se limita la transferencia de masa en el alimento, aunque sea el mismo peso de granos de maíz en las charolas. El tiempo del proceso de secado del producto (Tabla III) se ve influenciado notablemente por la magnitud del espesor de la capa de granos de maíz. Los tiempos requeridos para la deshidratación botana salada a 25 °C son de 15.83 horas para una capa y 29.92 horas para dos capas; la botana ácida a la misma temperatura necesita 14.50 horas para una capa y 29.92 horas para dos capas.

Se observa que cuando el espesor es de una capa, el tiempo necesario para el secado es menor, que cuando el espesor es más grande (dos capas). Esto se debe a que la transferencia de masa del interior del grano de maíz al medio es más lenta, ya que los granos en la parte inferior están obstruidos por el material que se ubica en la parte superior y se dificulta la salida de agua. El efecto del número de capas sobre el proceso de deshidratación se observa claramente en la Fig. 3, ya que se encuentra que, independientemente de la temperatura, la humedad disminuye más rápido cuando se tiene una capa de maíz, que cuando se tienen dos.

3.2 Efecto de la temperatura de calentamiento sobre la cinética de deshidratación

El mayor tiempo de secado fue a 25 °C para las botanas ácida y salada (29.92 horas). A 45 °C se presentó el menor tiempo de secado, para las dos botanas, con 2 capas de espesor. El tiempo disminuyó entre 4 y 6 horas al aumentar 10 °C la temperatura de las placas. Por tanto, el tiempo de secado fue menor cuando la temperatura aumentó.

La elevación de la temperatura acelera el proceso de liofilización, ya que se alcanza más rápido la entalpía de cambio de fase y así el agua puede salir del alimento a mayor velocidad. Al utilizar placas calefactoras, los mecanismos de transferencia de calor involucrados son convectivo y conductivo, a diferencia de cuando no se utilizan placas, que sólo es convectivo. Por lo tanto, la transferencia de calor es mayor y ocurre principalmente a través de la capa congelada; en cambio, la transferencia de masa ocurre a través de la capa seca. En las curvas de deshidratación se observa, particularmente en el caso de la deshidratación de una capa de granos, que entre más alta es la temperatura menor es el tiempo requerido para alcanzar un valor de humedad determinado. Shishegarha *et al.* (2002) mencionan que al liofilizar fresas incrementando la temperatura de las placas (hasta 40 °C), la humedad se pierde más rápido, por lo que los tiempos de proceso se

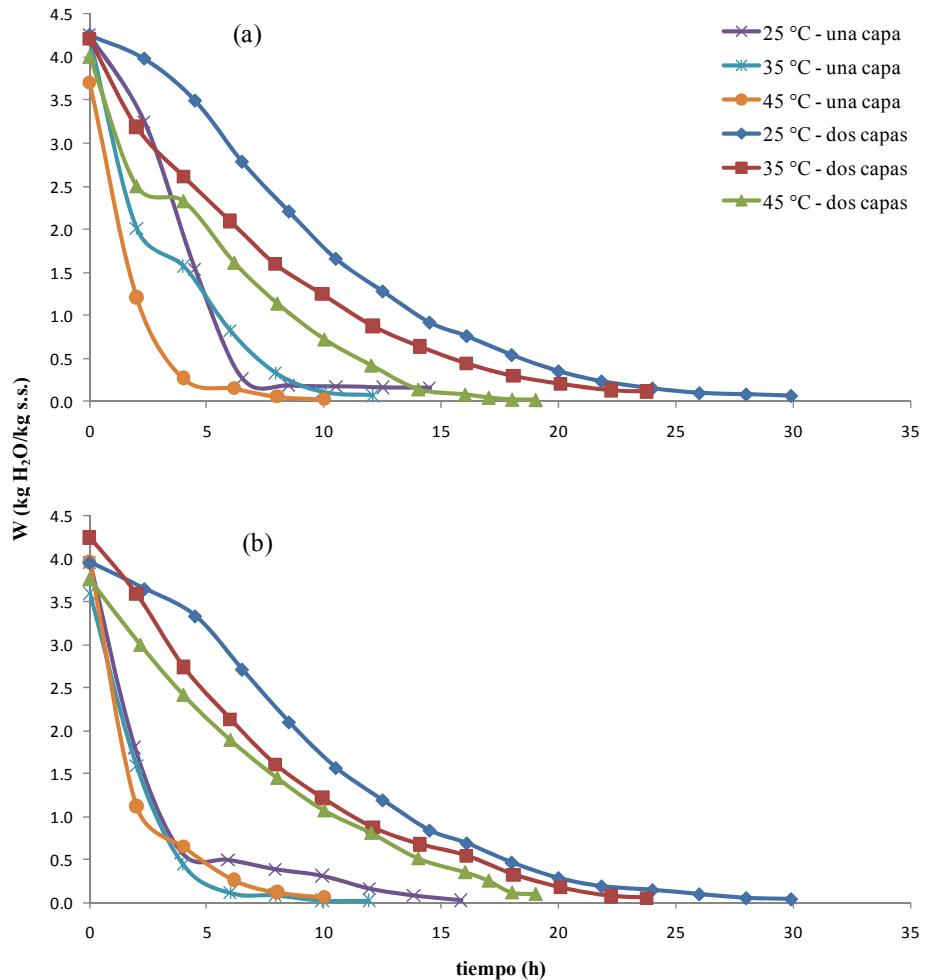


Fig. 3. Cinética de deshidratación de la botana salada (a) y ácida (b) a tres temperaturas con una y dos capas de granos de maíz

reducen. A temperaturas más altas en las placas, la reducción del contenido de humedad residual debido al calentamiento fue menos importante.

3.3 Curvas de velocidad de secado

En la Fig. 4 se presentan las curvas de velocidad de secado en función de la humedad para las botanas ácidas con una (Fig. 4a) y dos (Fig. 4b) capas de espesor de granos. Estas curvas ayudan a conocer la rapidez con la que el alimento pierde agua. En las curvas de velocidad de secado generalmente se presentan

dos períodos: de velocidad constante y de velocidad decreciente. El período de velocidad constante no se observa comúnmente en las curvas de secado de alimentos. El período de velocidad decreciente ocurre cuando la velocidad de secado empieza a disminuir, además, la actividad de agua en la superficie del producto se hace menor a la unidad (Heldaman y Singh, 1981; Barbosa-Cánoyas y Vega-Mercado, 1996). La cantidad de agua eliminada en este período puede ser baja, mientras que el tiempo requerido para llevar a cabo el proceso de secado puede ser elevado, ya que la velocidad de secado disminuye

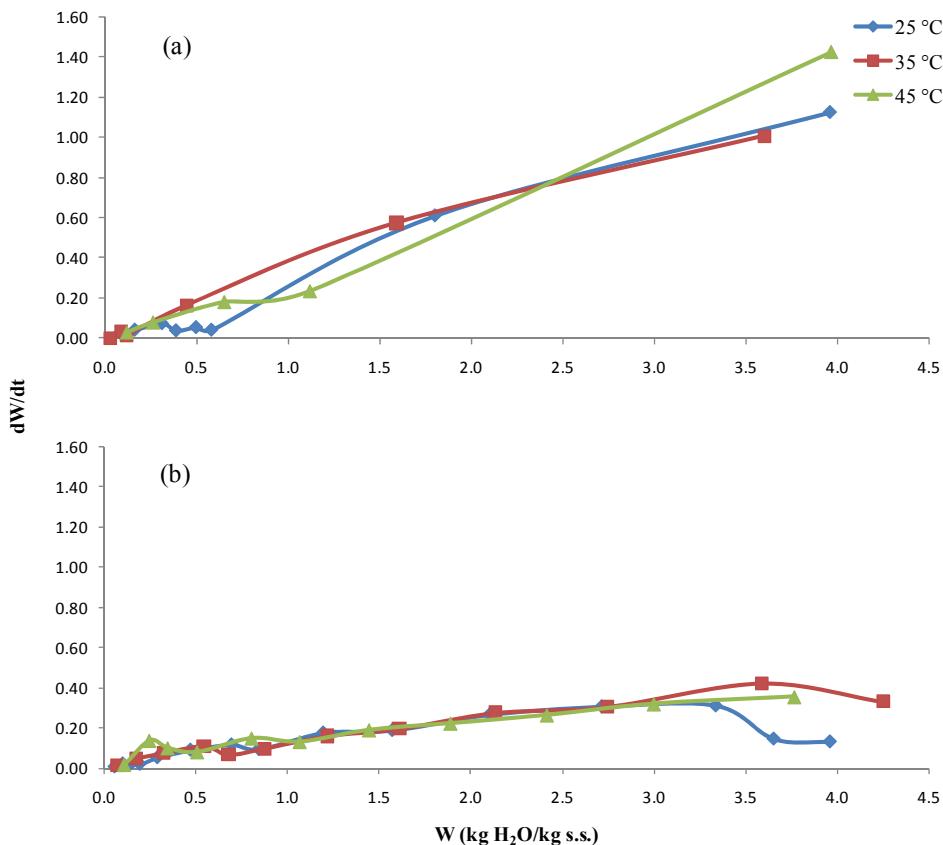


Fig. 4. Curva de velocidad de secado para la botana ácida con una (a) y dos (b) capas de espesor

(Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996; Márquez-Aquino, 2009).

En las curvas de velocidad de secado obtenidas en este estudio (Fig. 4), se observa que la velocidad inicial de secado es alta, ya que la resistencia de los flujos de masa y energía es pequeña. La transferencia de materia desde el frente de hielo se reduce a medida que el espesor de la capa seca aumenta (Babića *et al.*, 2009). Esto se debe a la reducción de la difusión desde la interfaz de sublimación hacia la superficie del producto (Marques y Freire, 2005; Babića *et al.*, 2009). Por lo tanto, la velocidad de secado es más lenta cuando el producto que se está deshidratando ya está más seco por el proceso. En la Fig. 4 también se observa la ausencia del período de velocidad constante y la

considerable reducción que causa el aumento del número de capas en la velocidad de secado, en contraste con el bajo efecto de la temperatura sobre dicha velocidad. Resultados similares fueron obtenidos en el caso de la botana salada.

Conclusión

La determinación de la cinética de deshidratación de botanas salada y ácida elaboradas con granos de maíz confirmó que el tiempo de liofilización depende el espesor de la capa de granos y de la temperatura de calefacción. El menor tiempo de liofilización requerido para obtener una humedad menor al 10 %, correspondió al proceso realizado a 45

°C y una capa de granos. Además, en las curvas de velocidad de secado sólo se observó el período de velocidad decreciente. La formulación de las botanas no influyó en la cinética de deshidratación. Los resultados obtenidos pueden servir de base para establecer las condiciones óptimas para la liofilización de este producto.

Referencias

- A.O.A.C. (Association of Official Analytical Chemists). 1984. *Official Methods of Analysis*. Décimo cuarta edición. A.O.A.C., Washington D.C., EE. UU.
- Babića, J., Cantalejob, M. J., y Arroqui, C. 2009. The effects of freeze-drying process parameters on broiler chicken breast meat. *Food Science and Technology*. 42(8):1325-1334.
- Barbosa-Cánovas, G. V. y Vega-Mercado, H. 1996. *Dehydration of Foods*. Chapman & Hall, Nueva York, EE. UU. 330 p.
- Braverman, J. B. S. 1986. *Introducción a la Bioquímica de los Alimentos*. El Manual Moderno: 1980, México. 358 p.
- Chin, S.T., Nazimah, S.A.H., Quek, S.Y., Che Man, Y.B., Abdul Rahman, R. y Mat Hashim, D. 2008. Changes of volatiles' attribute in durian pulp during freeze- and spray-drying process. *Food Science and Technology*. 41(10):1899-1905.
- Claussen, C., Ustad, T. S., Strømmen, I. y Walde, P. M. 2007. Atmospheric freeze drying: a review. *Drying Technology*. 25(6):957-967.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1993. *El maíz en la nutrición humana*. Colección FAO: Alimentación y nutrición. No. 25. Roma, Italia. <http://www.fao.org/docrep/T0395S/T0395S00.htm>, accesada 15/09/2009.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2001. *El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción*. Colección FAO: Producción y protección vegetal. No. 28. Roma, Italia. <http://www.fao.org/DOCREP/003/X7650S/x7650s08.htm>, accesada 12/10/2009
- Gekas, V. 1992. *Transport Phenomena of Foods and Biological Materials*. Ed. CRC Press, Boca Raton, EE.UU. 237 p.
- Grajales-Agudelo, L. M., Cardona-Perdomo, W. A. y Orrego-Alzate, C. E. 2005. Liofilización de carambola (*Averrhoa carambola* L.) osmodeshidratada. *Ingeniería y Competitividad*. 7(2):19-26.
- Heldman, D. R. y Singh, R. P. 1981. *Food Process Engineering*. Segunda edición. Avi Publishing Company, Inc., Westport Connecticut, EE. UU. 415 p.
- Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G. V. 1999. *Operaciones Unitarias en la Ingeniería en Alimentos*. Technomic Publication, EE. UU. 882 p.
- Lewis, M. J. 1990. *Physical Properties of Food and Food Processing Systems*. Ellis Horwood, Chichester; International Publishers in Science and Technology, EE. UU. 465 p.
- Mallet, C.P. 1993. *Frozen Food Technology*. Blackie Academic and Professional, Londres, Inglaterra. 339 p.
- Marques, L. G. y Freire, J. T. 2005. Analysis of freeze-drying of tropical fruits. *Drying Technology*. 23(9):2169-2184.
- Márquez-Aquino, D. 2009. *Desarrollo de productos de maíz (botanas) por medio de liofilización*. Universidad de las Américas, Puebla. Tesis de Licenciatura en Ingeniería de Alimentos. 107p.
- Pérez-Pérez, E. P., Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F. y Mejía-Garibay, B. 2007. *Desarrollo de Tecnologías para la Elaboración de Maíz*. Universidad de las Américas, Puebla. Informe inédito para proyecto Produce, folio: 21-2006-0317.
- Rahman, S. 1995. *Food Properties Handbook*. Ed. CRC Press, Boca Ratón, EE. UU. 430 p.
- Ratti, C. 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*. 49(4):311-319.
- Sadikoglu, H., Ozdemir, M. and Seker, M. 2006. Freeze-drying of pharmaceutical products: research and development needs. *Drying Technology*. 24(7):849-861.
- Shishehgarha, F., Makhlouf, J. y Ratti, C. 2002. Freeze-drying characteristics of strawberry. *Drying Technology*. 20(1):131–145.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2007. *Situación Actual y perspectivas del Maíz en México 1996-2012*. SAGARPA, México. 208 p.

Tambunan, A. H., Yudistira, Kisdiyani y Hernani. 2001. Freeze drying characteristics of medicinal herbs. *Drying Technology*. 19(2):325-331.

Trelea, I. C., Passot, S., Fonseca, F. y Marin, M. 2007. An interactive tool for the optimization of freeze-

drying cycles based on quality criteria. *Drying Technology*. 25(5):741-751.

Welti-Chanes J., Bermúdez D., Vergara-Balderas F. y Alzamora S.M. 2004. Principles of freeze-concentration and freeze-drying. En: Y. H. Hui, P. Cornillon, L. I. Guerrero, M. H. Lim, K. H. Murrel y W. K. Nip. *Handbook of Frozen Foods*. Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, EE. UU. 13-25p.