

CINÉTICA DE UN NUEVO PROCESO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA EN DOS ETAPAS ASISTIDA POR ULTRASONIDO DE MANZANA EN MIEL

Mariana Belén Laborde^{1,3}, María Belén Bax^{2,3}, Ana María Pagano³

¹CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Argentina.

²CIN (Consejo Interuniversitario Nacional), Argentina.

³TECSE, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN), Email: anamariapagano@gmail.com

Resumen— En el presente trabajo se utiliza la metodología de superficies de respuesta para evaluar el efecto de los factores tiempo de proceso y concentración de la solución sobre el contenido de sólidos solubles y de agua durante un nuevo proceso de deshidratación osmótica en dos etapas asistido por ultrasonido, de cubos de manzana *Granny Smith* en jarabe de miel de abeja a temperatura ambiente. El proceso consiste en un pretratamiento de inmersión de las porciones de manzana en agua destilada durante diferentes tiempos (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 minutos) cuya finalidad es remover los sólidos solubles de la fruta para facilitar la incorporación de miel subsiguiente. En esta segunda etapa, las muestras del mejor pretratamiento se deshidratan osmóticamente en soluciones de distintas concentraciones de miel (40, 55, 70 °Brix) durante diferentes tiempos (60, 120, 180 minutos). **Para las condiciones óptimas del tratamiento dual (pretratamiento de 22.5 minutos seguido de ósmosis en solución de 69.4 °Brix durante 173 minutos)** se estudia el comportamiento temporal de las variables a fin de ajustarlo mediante modelos matemáticos para describir la cinética de la variación de humedad y sólidos solubles. El proceso puede ser modelado adecuadamente por los modelos estudiados.

Palabras clave— *manzana, miel, deshidratación combinada, ultrasonido, cinética, modelos.*

1. Introducción

Hoy en día, la tendencia actual para estabilizar alimentos de alto contenido acuoso como son las frutas es emplear condiciones de deshidratación menos severas, con el objetivo de disminuir la actividad acuosa conservando en la medida de lo posible la calidad del alimento fresco. Para lograrlo aparecen tecnologías emergentes con enorme potencial, tales como la combinación de técnicas de deshidratación en dos o más etapas sucesivas e independientes y otras tecnologías complementarias tales como ultrasonido [1–8].

El uso de ultrasonido como pretratamiento para favorecer la transferencia de masa en secado y deshidratación osmótica ha sido probado por diferentes autores para frutas como banana [1], frutilla [3], manzana [4], kiwi [7], ananá [9], melón [10].

La deshidratación osmótica (DO) es un proceso que implica la remoción de agua de un alimento conjuntamente con la incorporación de un sólido soluble desde una solución concentrada en la que se sumerge. Para cada material la velocidad de transferencia de masa en la DO depende de numerosos factores (tipo y concentración del jarabe, tamaño de la muestra, relación producto:solución osmótica, temperatura, tiempo de inmersión, agitación) [11,12]. Para describir la cinética de este proceso se han aplicado diferentes modelos matemáticos con el objeto de predecir el comportamiento de los productos alimenticios. Entre ellos, los más usados son la ecuación empírica propuesta por Peleg y el modelo difusivo basado en la ley de Fick, el cual asume que la concentración de la solución permanece constante y que la resistencia externa es despreciable frente a la resistencia interna [11,13].

El objetivo del presente trabajo es estudiar experimentalmente un nuevo proceso de deshidratación osmótica asistido por ultrasonido en dos etapas, aplicado a cubos de manzana *Granny Smith* bajo diferentes condiciones empleando soluciones de miel de abejas como agente osmótico, a fin de determinar y modelar la cinética de la transferencia de masa utilizando modelos empíricos y fenomenológicos.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

Se emplearon manzanas (*Malus doméstica*) variedad *Granny Smith* adquiridas en el mercado local de Olavarría, seleccionadas por frescura, color, tamaño, estado de madurez y ausencia de daños, almacenadas en refrigeración (2-5°C) hasta el momento de su procesado.

Para la preparación de las soluciones osmóticas se empleó miel de abejas de producción orgánica (marca Arroyo Fresco, Bariloche, Argentina) adquirida en el mercado local de Olavarría (Provincia de Buenos Aires, Argentina).

2.2 Preparación de las muestras

Las manzanas *Granny Smith* se lavaron con agua potable a temperatura ambiente, se pelaron y descorazonaron manualmente, y se cortaron en cubos de 0.5 cm de lado con un cortador doméstico de acero inoxidable.

Las muestras frescas se caracterizaron en cuanto a peso promedio de fruto entero (balanza digital Pioneer™, precisión ± 0.001 g), peso de promedio de muestra (balanza analítica Pioneer™, precisión ± 0.001 g), contenido de humedad en base húmeda (b.h.) [14], contenido de sólidos solubles (refractómetro Abbe, Japón, precisión ± 0.05 °Brix), longitud característica (lado del cubo) (calibre manual, precisión ± 0.01 mm), pH (pHmetro, precisión ± 0.01) y acidez [14].

Las muestras en cubos se sometieron a un proceso dual (D3S) en dos etapas asistido por ultrasonido: pretratamiento de remoción de los azúcares naturales de la fruta (Etapa I) y subsiguiente incorporación de miel de abejas (Etapa II).

Los cubos pretratados y osmodeshidratados se secaron por aire caliente para lograr finalmente un producto estable con humedad inferior al 20% b.h. (base húmeda) [15].

2.3 Diseño experimental

Se trabajó sobre un diseño experimental factorial considerando los siguientes factores, con tres repeticiones:

Para la Etapa I:

- tiempo de inmersión (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 minutos)
- aplicación de ultrasonido de frecuencia 40 kHz (US, noUS)

Para la Etapa II:

- concentración de solución osmótica de miel de abejas (40, 55, 70 °Brix)
- tiempo de inmersión (60, 120, 180 minutos)
- aplicación de ultrasonido de frecuencia 40 kHz (US, noUS)

Procedimiento experimental:

Los cubos de manzana *Granny Smith* se sometieron a un *pretratamiento* de remoción de los azúcares propios de la fruta (Etapa I) mediante ósmosis en agua destilada empleando una relación fruta: solvente de 1:4 [1], a temperatura ambiente, con y sin aplicación de ultrasonido (frecuencia 40 kHz) durante diferentes tiempos (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 minutos), por triplicado. A cada intervalo los cubos se extrajeron de la solución acuosa, se escurrieron sobre papel absorbente y se evaluaron peso (W) y en contenido de sólidos solubles (SS) y de humedad (M). A partir esta información se determinaron las variables características de control ganancia de sólidos solubles (SG) y pérdida de agua (WL). Estas variables se utilizaron para optimizar el pretratamiento, fijando como función objetivo alcanzar la máxima reducción de sólidos solubles de las muestras para contar con la mayor fuerza impulsora por diferencia de concentración en la etapa subsiguiente de incorporación de miel.

Las muestras provenientes del pretratamiento óptimo se sometieron a un proceso de impregnación en miel de abejas (en reemplazo de los azúcares propios de la fruta eliminados previamente). Esta Etapa II consistió en la deshidratación osmótica de los cubos pretratados empleando soluciones de miel con diferentes concentraciones (40, 55, 70 °Brix), para una relación fruta:solución de 1:2, a temperatura ambiente, con y sin aplicación de ultrasonido (frecuencia 40 kHz), empleando diferentes tiempos (60, 120, 180 minutos), por triplicado. A cada tiempo las muestras fueron extraídas de la solución hipertónica, escurridas sobre papel absorbente, y evaluadas en peso (W), contenido de sólidos solubles (SS) y contenido de humedad (M).

Finalmente, los cubos de manzana pretratados y osmodeshidratados bajo las condiciones óptimas de las Etapas I y II se secaron en estufa de aire forzado a una temperatura de 70 °C para reducir el contenido de humedad del snack natural de manzana por debajo de 20% b.h.

Variables de control:

El seguimiento del proceso se llevó a cabo a través de la determinación en peso (W, g), contenido de humedad (M, % b.h.) y de sólidos solubles (SS, °Brix) de las muestras a los

tiempos especificados, por triplicado. A partir de estas variables, mediante las Ec. (1) y (2) [5] se determinaron las variables adimensionales de control ganancia de sólidos solubles (SG, %) y pérdida de agua (WL, %) para cada condición experimental.

$$SG = 100 \left[\left(1 - \left(\frac{W_o - W}{W_o} \right) \right) \frac{TS}{100} - \frac{TS_o}{100} \right] \quad (1)$$

$$WL = 100 \left[\left(1 - \frac{TS_o}{100} \right) - \left(1 - \frac{TS}{100} \right) \left(1 - \left(\frac{W_o - W}{W_o} \right) \right) \right] \quad (2)$$

donde TS_o: sólidos totales iniciales (%); TS: sólidos totales a cada tiempo (%); W_o: peso inicial de la muestra (g); W: peso de la muestra a cada tiempo (g).

Análisis estadístico:

Los resultados se analizaron estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA) a fin de evaluar el efecto ($\alpha=0.05$) de los factores del pretratamiento y de la deshidratación osmótica sobre las variables de control (SG, WL).

En cada etapa, mediante metodología de superficie de respuesta (RSM), se determinaron los polinomios predictivos de SG con el objetivo de encontrar las mejores condiciones para lograr la mayor pérdida (Etapa I) ó ganancia (Etapa II) de sólidos solubles de las manzanas a través de un análisis de optimización, analizándose conjuntamente el comportamiento de la variable pérdida de agua (WL).

3. Resultados y Discusión

3.1 Análisis de datos experimentales

En la caracterización inicial de las muestras frescas de manzana *Granny Smith* se obtuvo: peso promedio de fruto entero de 192.506 ± 3.03 g, peso promedio de porción de 1.57 ± 3.6 g, contenido de humedad de 83.81 ± 0.11 % b.h., contenido de sólidos solubles de 10.81 ± 5.1 °Brix, longitud característica de 4.95 ± 0.04 mm, pH de 3.66 ± 0.58 y acidez de 1.14 ± 0.58 % expresada en ácido málico. Otros autores [15–18] reportaron valores en el mismo orden en cuanto al pH y al contenido de sólidos solubles, pero menores al valor de acidez determinado en este trabajo.

Durante el pretratamiento (Etapa I), tal como se observa en las Figs. 1 y 2, el contenido de sólidos solubles (SS) se redujo mientras el contenido de humedad (M) aumentó en relación a la fruta fresca ($t=0$), tanto cuando se aplicó ultrasonido (US) como cuando no se utilizó (noUS).

3.2 Modelado y optimización mediante RSM

Respecto a la variable de control ganancia de sólidos solubles (SG), durante la Etapa I pudo determinarse mediante un análisis de la varianza que el tiempo de inmersión (t) y el uso de ultrasonido influyeron significativamente ($p < 0.05$) sobre SG, pero no la interacción de estos factores.

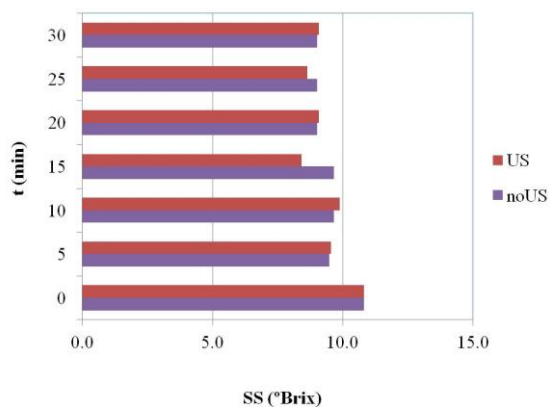


Figura 1. Contenido de sólidos solubles de los cubos de manzana durante el pretratamiento con (US) y sin (noUS) aplicación de ultrasonido.
Fuente: elaboración propia.

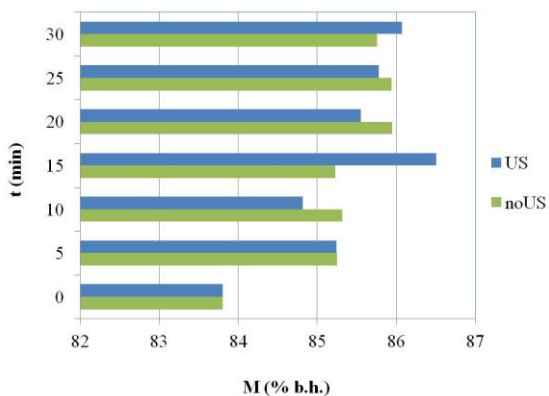


Figura 2. Contenido de humedad de los cubos de manzana durante el pretratamiento con (US) y sin (noUS) aplicación de ultrasonido.
Fuente: elaboración propia.

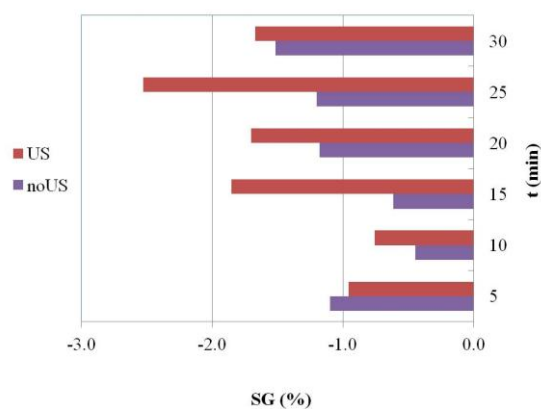


Figura 3. Ganancia de sólidos solubles de los cubos de manzana durante el pretratamiento con (US) y sin (noUS) aplicación de ultrasonido.
Fuente: elaboración propia.

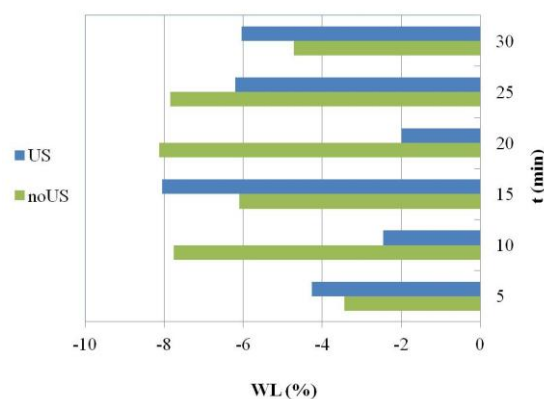


Figura 4. Pérdida de agua de los cubos de manzana durante el pretratamiento con (US) y sin (noUS) aplicación de ultrasonido.

Fuente: elaboración propia.

En todos los casos se obtuvieron reducciones de los sólidos solubles de las manzanas ($SG < 0$), resultando mayoritariamente más significativas (ó eventualmente equivalente para $t=5$ min) cuando se empleó ultrasonido (Fig. 3). Este resultado también fue informado por otros autores [3,9]. No se observó efecto significativo de los factores del pretratamiento sobre la pérdida de agua de las muestras (Fig. 4).

Atento a ello, se seleccionó el bloque de datos del **pretratamiento asistido** por ultrasonido (US) como **más conveniente**, dado que condujo a mayores reducciones en los sólidos solubles naturales de las manzanas, habilitando consecuentemente a disponer una mayor fuerza impulsora (por diferencia de concentración) en la subsiguiente etapa de impregnación con miel por deshidratación osmótica. Este bloque de datos se modeló mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM) a fin de obtener el polinomio temporal predictivo de $SG=f(t)$ que se presenta en la Ec. (3).

$$SG = -0.0842 - 0.139t + 0.0031t^2 \quad (3)$$

A partir de esta funcionalidad mediante un análisis canónico y minimización de la cresta (*ridge analysis*) se determinó que el tiempo óptimo para lograr la máxima reducción de sólidos solubles de los cubos en la Etapa I, resultó de **22.5 minutos**, alcanzándose un valor de $SG = -1.66\%$.

En la Etapa II se obtuvieron las ganancias de sólidos solubles (SG) presentadas en la Fig. 5, observándose en todos los casos una tendencia a lograr mayor (o eventualmente equivalente) ganancia de sólidos solubles para el tratamiento asistido por ultrasonido a alta concentración (C) y prolongado tiempo de inmersión (t). El análisis de varianza demostró influencia significativa del tiempo de ósmosis, de la aplicación de ultrasonido y de la concentración del jarabe sobre la variable de control SG, pero no de sus interacciones. WL fue siempre mayor cuando se empleó ultrasonido favoreciendo la eliminación de agua de la fruta (Fig. 6).

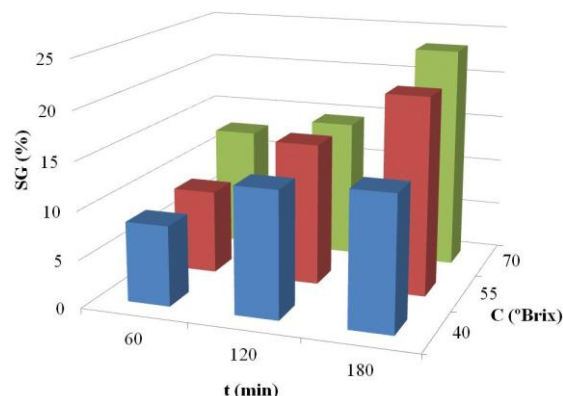


Figura 5. Ganancia de sólidos solubles de los cubos de manzana durante la deshidratación osmótica en miel asistida por ultrasonido a distintas concentraciones.
Fuente: elaboración propia.

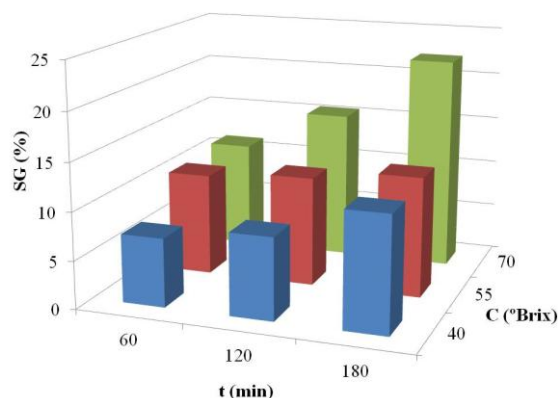


Figura 6. Ganancia de sólidos solubles de los cubos de manzana durante la deshidratación osmótica en miel sin aplicación de ultrasonido a distintas concentraciones.
Fuente: elaboración propia.

A través del análisis de la varianza se determinó influencia significativa de los factores tiempo, uso de ultrasonido y concentración de la solución osmótica sobre WL, pero no de sus interacciones, al igual que en el caso de SG.

Atento a este comportamiento, y con el objetivo de determinar las mejores condiciones para la deshidratación osmótica que conduzcan a lograr la mayor incorporación de miel a la fruta con una adecuada eliminación de agua, se realizó un análisis mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM). Se obtuvieron los polinomios predictivos de SG y WL para cada bloque (US y noUS), como funciones de la concentración y del tiempo de inmersión.

A través del análisis de optimización multi-objetivo, basado en criterios de deseabilidad para maximizar la ganancia de sólidos solubles con una adecuada pérdida de agua, se determinaron las siguientes condiciones óptimas para la Etapa II: **t=173 min y C=69.4 °Brix con aplicación de ultrasonido (US)** alcanzándose **SG=22% y WL=45.1%**.

Finalmente las muestras osmo-deshidratadas obtenidas bajo las condiciones óptimas de las Etapas I y II se secaron a 70°C durante 16.5 h para reducir el contenido de humedad del producto de manzana y miel de calidad diferencial obtenido hasta 20% b.h.

Los polinomios descritos en las Ecs. (4) y (5), que representan la variación de las variables de control SG ($R^2=0.91$) y WL ($R^2=0.95$) en función de los parámetros concentración (C) y tiempo de ósmosis (t) para el proceso asistido por ultrasonido (US), están representados gráficamente como superficies en las Figs. 7 y 8.

$$SG = -3.83 + 8.65 \times 10^{-2}t + 0.159C - 3.36 \times 10^{-4}t^2 - 1.44 \times 10^{-3}C^2 + 1.41 \times 10^{-3}tC \quad (4)$$

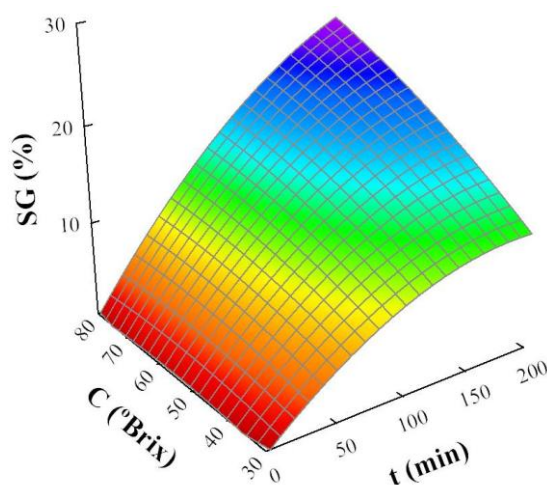


Figura 7. Superficie de respuesta de la ganancia de sólidos solubles de los cubos de manzana durante la deshidratación osmótica en miel asistida por ultrasonido.

Fuente: elaboración propia.

$$WL = 10.22 + 0.289t - 0.601C - 1.34 \times 10^{-3}t^2 + 7.24 \times 10^{-3}C^2 + 2.75 \times 10^{-3}tC \quad (5)$$

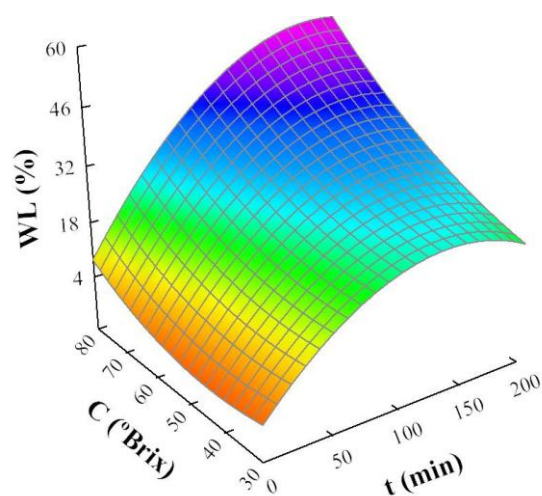


Figura 8. Superficie de respuesta de la pérdida de agua de los cubos de manzana durante la deshidratación osmótica en miel asistida por ultrasonido.

Fuente: elaboración propia.

3.3 Modelado de la cinética de transferencia de masa

Las Ecs. (4) y (5) fueron utilizadas para obtener las curvas temporales $SG=f(t)$ y $WL=f(t)$ parametrizadas en C que se muestran en las Figs. 9 y 10. Estas curvas obtenidas a partir de los datos experimentales fueron ajustadas mediante análisis de regresión no lineal por los modelos empíricos de Azuara [19–22] y de Peleg modificado [21,23,24], y por el modelo fenomenológico basado en la segunda ley de Fick [19].

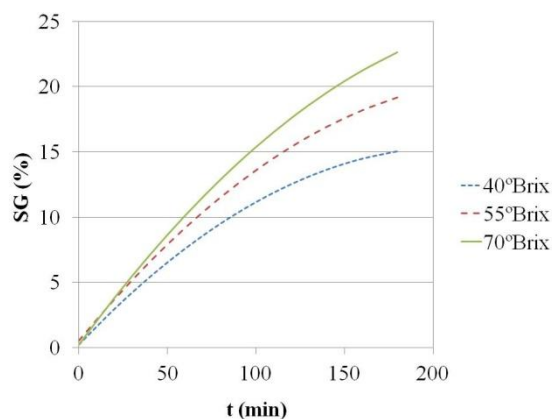


Figura 9. Curvas de la cinética de la ganancia de sólidos solubles de los cubos de manzana durante la deshidratación osmótica en miel asistida por ultrasonido a distintas concentraciones.

Fuente: elaboración propia.

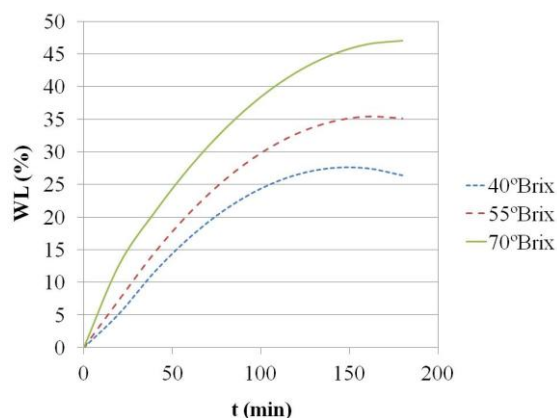


Figura 10. Curvas de la cinética de la pérdida de agua de los cubos de manzana durante la deshidratación osmótica en miel asistida por ultrasonido a distintas concentraciones.

Fuente: elaboración propia.

Modelo empírico de Azuara

El modelo empírico de Azuara [19] permite predecir la cinética de deshidratación osmótica y además determinar el punto de equilibrio final. Las Ecs. (6) y (7) representan el modelo de Azuara para la variación de la ganancia de sólidos solubles durante la deshidratación osmótica, mientras que las Ecs. (8) y (9) hacen lo propio para la pérdida de agua.

$$SG_t = \frac{\beta_1 SG_\infty t}{1 + \beta_1 t} \quad (6)$$

$$\frac{t}{SG_t} = \frac{1}{\beta_1 SG_\infty} + \frac{1}{SG_\infty} t \quad (7)$$

donde SG_t es la ganancia de sólidos solubles a un tiempo t , SG_∞ es la ganancia de sólidos solubles a tiempo infinito (en el equilibrio) y β_1 es la constante relacionada con la tasa de difusión de sólidos solubles en el producto.

$$WL_t = \frac{\beta_2 WL_\infty t}{1 + \beta_2 t} \quad (8)$$

$$\frac{t}{WL_t} = \frac{1}{\beta_2 WL_\infty} + \frac{1}{WL_\infty} t \quad (9)$$

donde WL_t es la pérdida de agua a un tiempo t , WL_∞ es la pérdida de agua a tiempo infinito (en el equilibrio) y β_2 es la constante relacionada con la tasa de difusión de agua en el producto.

La ganancia de sólidos solubles en el equilibrio (SG_∞) y la constante β_1 en las Ecs. (6) y (7) se estimaron a partir de la pendiente y la ordenada al origen de la gráfica (t/WL_t) en función de t ; de modo análogo se procedió a fin de determinar la pérdida de agua en el equilibrio (WL_∞) y la constante β_2 . La Tabla 1 muestra estos parámetros cinéticos del modelo de Azuara con sus estadísticos de ajuste.

Tabla 1. Parámetros cinéticos del modelo de Azuara para la cinética de ganancia de sólidos solubles (SG) y pérdida de agua (WL) durante la deshidratación osmótica en miel de cubos de manzanas pretratadas.

C (°Brix)	Parámetros Azuara para la cinética de deshidratación osmótica					
	Ganancia de sólidos solubles (SG)			Pérdida de agua /WL)		
	SG_∞ (%)	β_1	R^2	WL_∞ (%)	β_2	R^2
40	32.05	5.16×10^{-3}	0.990	66.23	5.19×10^{-3}	0.800
55	42.37	4.57×10^{-3}	0.996	67.57	7.06×10^{-3}	0.931
70	61.73	3.28×10^{-3}	0.997	75.19	1.00×10^{-2}	0.993

Fuente: elaboración propia.

Arias et al. [20] determinaron valores de SG_∞ entre 151-232% y de β_1 entre 0.02 y 0.01 cuando deshidrataron láminas de mango en soluciones de 45 y 60°Brix a 20°C sin aplicación de ultrasonido, mientras WL_∞ resultó entre 23-39% y β_2 entre 0.04 y 0.01, aumentando los valores de equilibrio de SG y WL con la concentración mientras disminuyen los coeficientes cinéticos de β_1 y β_2 , tal como sucede con los parámetros que se muestran en la Tabla 1 de este trabajo.

Modelo empírico de Peleg

El modelo empírico de Peleg [23] modificado luego por Park et al. [24] describe las curvas de adsorción que se aproximan asintóticamente al equilibrio [21]. Las Ecs. (10) y (11) representan la cinética de variación del contenido de sólidos solubles (SS) y de humedad (M) durante la deshidratación osmótica.

$$SS_t = SS_o \pm \frac{t}{k_{SS1} + k_{SS2}t} \quad (10)$$

donde SS_t es el contenido de sólidos solubles a un tiempo t , SS_o es el contenido de sólidos solubles inicial, k_{SS1} y k_{SS2} son las constantes del modelo cinético del contenido de sólidos solubles.

$$M_t = M_o \pm \frac{t}{k_{M1} + k_{M2}t} \quad (11)$$

donde M_t es el contenido de humedad a un tiempo t , M_o es el contenido de humedad inicial, k_{M1} y k_{M2} son las constantes del modelo para cinético del contenido de humedad.

A partir del ajuste de regresión no lineal por mínimos cuadrados de los datos del contenido de sólidos solubles y de humedad realizado se obtuvieron los parámetros del modelo de Peleg que se muestran en la Tabla 2 para diferentes concentraciones.

Tabla 2. Parámetros cinéticos del modelo de Peleg para la cinética del contenido de sólidos solubles (SS) y de humedad (M) durante la deshidratación osmótica en miel de cubos de manzanas pretratadas.

C (°Brix)	Parámetros de Peleg para la cinética de deshidratación osmótica					
	Contenido de sólidos solubles (SS)			Contenido de humedad (M)		
	k_{SS1}	k_{SS2}	R^2	k_{M1}	k_{M2}	R^2
40	3.437	2.66×10^{-2}	0.949	3.323	2.90×10^{-2}	0.947
55	2.936	1.91×10^{-2}	0.979	3.143	1.88×10^{-2}	0.978
70	1.837	1.75×10^{-2}	0.987	1.996	1.80×10^{-2}	0.985

Fuente: elaboración propia.

En el mismo orden, Park et al. [24] informaron valores de k_{SS1} de 4.08 a 4.90 y de k_{M1} de 3.74 a 0.76 para cubos de pera deshidratados osmóticamente en soluciones de sacarosa con las mismas concentraciones del presente trabajo, a una temperatura de 40°C sin aplicación de ultrasonido, siendo sus constantes k_{SS2} de 12.6×10^{-2} a 7.4×10^{-2} y k_{M2} de 6.2×10^{-2} a 6.7×10^{-2} . Arias et al. [20], estudiando la deshidratación osmótica de láminas de mango en soluciones de sacarosa (rango 45-60°Brix) a 20°C, reportaron constantes para SS entre 4.2 y 5.3 para k_{SS1} y entre 4.5×10^{-2} y 3.4×10^{-2} para k_{SS2} , mientras que los parámetros para M resultaron entre 1.9 y 2.9 para k_{M1} y entre 4.9×10^{-2} y 2.6×10^{-2} para k_{M2} .

Comparativamente puede observarse que los modelos empíricos de Azuara y de Peleg resultan adecuados para describir la cinética de cambio de las principales variables de la deshidratación osmótica de los cubos de manzana en miel, ya que presentan coeficientes

de correlación superiores a 0.8 en todos los casos. No obstante, se destaca la ventaja comparativa del modelo de Azuara ya que permite estimar los valores de equilibrio de las variables de control.

Modelo fenomenológico difusivo basado en la ley de Fick

Con vistas a ensayar una interpretación fenomenológica de la deshidratación osmótica con basamento teórico en la segunda ley de Fick, se estudió el ajuste del modelo difusivo propuesto por Crank [25], cuya expresión simplificada para placas delgadas en contacto con una cantidad infinita de solución se muestra en las Ecs. (12) y (13) para los sólidos solubles y la humedad, respectivamente.

$$\frac{SG_t}{SG_\infty} = 2 \left(\frac{D_s t}{\pi l^2} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$\frac{WL_t}{WL_\infty} = 2 \left(\frac{D_w t}{\pi l^2} \right)^{1/2} \quad (13)$$

donde D_s es el coeficiente aparente de difusión de sólidos solubles, D_w es el coeficiente aparente de difusión de humedad, y l es el semi espesor de la placa.

Para otras geometrías tales como esferas, la solución analítica simplificada de la segunda ley de Fick adopta la expresión de las Ecs. (14) y (15) [22] para los sólidos solubles y la humedad, respectivamente.

$$\frac{SG_\infty - SG_t}{SG_\infty - SG_0} = \frac{6}{\pi} \exp\left(\frac{-D_s \pi^2 t}{a^2}\right) \quad (14)$$

$$\frac{WL_\infty - WL_t}{WL_\infty - WL_0} = \frac{6}{\pi} \exp\left(\frac{-D_w \pi^2 t}{a^2}\right) \quad (15)$$

donde a es el radio de la muestra, el cual fue calculado como radio equivalente a una esfera con el mismo volumen que el cubo de manzana.

Como resultado del ajuste de regresión no lineal por mínimos cuadrados de las Ecs. (12) a (15) se obtuvieron los coeficientes de difusividad efectiva que se presentan en la Tabla 3 para distintas concentraciones.

Park et al. [24], deshidratando cubos de pera en soluciones de sacarosa (40-70°Brix) a 40°C sin aplicación de ultrasonido, informaron difusividades de sólidos solubles D_s de 1.65×10^{-9} a 0.9×10^{-9} (m^2/s) y difusividades de humedad D_M de 0.9×10^{-9} a 1.9×10^{-9} (m^2/s), valores en el orden de este trabajo y con la misma tendencia decreciente y creciente con la concentración para D_s y D_M , respectivamente.

Tabla 3. Parámetros cinéticos del modelo fenomenológico simplificado basado en Fick para la cinética de contenido de sólidos solubles y de humedad durante la deshidratación osmótica en miel de cubos de manzanas pretratadas.

C (°Brix)	Difusividad efectiva para la cinética de deshidratación osmótica							
	D_s (m ² /s)				D_w (m ² /s)			
	Ec. (12)	R ²	Ec. (14)	R ²	Ec. (13)	R ²	Ec. (15)	R ²
40	5.71×10^{-9}	0.96	3.81×10^{-9}	0.97	5.41×10^{-9}	0.94	4.39×10^{-9}	0.99
55	5.06×10^{-9}	0.96	3.51×10^{-9}	0.98	8.29×10^{-9}	0.96	5.66×10^{-9}	0.99
70	3.14×10^{-9}	0.94	2.64×10^{-9}	0.99	1.19×10^{-8}	0.99	6.83×10^{-9}	0.98

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones y recomendaciones

Las condiciones óptimas del tratamiento de deshidratación dual asistido por ultrasonido de cubos de manzanas *Granny Smith* para remover la mayor cantidad de sólidos solubles de la fruta e incorporar la mayor cantidad de miel al producto, obtenidas mediante optimización de las superficies de respuesta de la ganancia de sólidos solubles, resultan ser un pretratamiento de 22.5 minutos seguido de ósmosis en solución de 69.4°Brix durante 173 minutos. El proceso óptimo puede ser adecuadamente descrito por los modelos empíricos de Azuara y Peleg, y por el modelo difusional de Fick. La ganancia de sólidos solubles y pérdida de agua en el equilibrio están comprendidas respectivamente entre 32.05 y 61.73%, y entre 66.23 y 75.19%. Los coeficientes globales de difusividad de sólidos solubles y de agua están en los rangos 3.14×10^{-9} a 5.71×10^{-9} m²/s y 5.41×10^{-9} a 1.19×10^{-8} m²/s, respectivamente.

5. Referencias

- [1] FERNANDES, F.A.N.; RODRIGUES, S. (2007). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, California, v.82, p.261–267.
- [2] JALALI, V.R.R.; NARAIN, N.; DA SILVA, G.F. (2008). Effect of osmotic predehydration on drying characteristics of banana fruits. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, v.28, n.2, p.269-273.
- [3] GARCÍA-NOGUERA, J.; WELLER, C.L.; OLIVEIRA, F.I.P.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F.A.N. (2010). Dual-stage sugar substitution in strawberries with a Stevia-based sweetener. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, Berlin, v.11, n.1, p.225–230.
- [4] OLIVEIRA, F.I.P.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F.A.N. (2012). Production of low calorie Malay apples by dual stage sugar substitution with Stevia-based sweetener. *Food and Bioprocess Processing*, New York, v.90, n.4, p.713–718.
- [5] RODRÍGUEZ, M.M.; ARBALLO, J.R.; CAMPAÑONE, L.A.; COCCONI, M.B.; PAGANO, A.M.; MASCHERONI, R.H. (2013). Osmotic dehydration of nectarines: influence of the operating conditions and determination of the effective diffusion coefficients. *Food and Bioprocess Technology*, Berlin, v.6, p.2708–2720.
- [6] VELOSO, M.; NÚÑEZ, M.; PÉREZ DE VILLARREAL, A.; PAGANO, A.M. (2013). Deshidratación osmótica combinada de ciruela europea (*Prunus domestica* L.) utilizando como agentes miel de abejas y sacarosa: Optimización múltiple del proceso. *Proceedings XIV Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos CYTAL 2013*, ISBN 978-987-22165-5-9, Rosario, Argentina, p.1-6.
- [7] NOWACKA, M.; TYLEWICZ, U.; LAGHI, L.; DALLA ROSA, M.; WITROWA-RAJCHERT, D. (2014). Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry*, Norwich, v.144, p.18–25.

- [8] LABORDE, M.B.; BARRETO, G.P.; PAGANO, A.M. (2015). Pasas de uva de bajas calorías obtenidas por deshidratación combinada: optimización del proceso y evaluación de la eficiencia antioxidante. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, La Serena, v.6, n.1, p.17-30.
- [9] FERNANDES, F.A.N.; LINHARES Jr., F.E.; RODRIGUES, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry*, New York, v.15, p.1049–1054.
- [10] RODRIGUES, S.; FERNANDES, F.A.N. (2007). Use of ultrasound as pretreatment for dehydration of melons. *Drying Technology*, London, v.25, p.1791-1795.
- [11] PONTING, J. D. et al. (1966). Osmotic dehydration of fruits. *Food Technology*, Chicago, v.20, p.125-128.
- [12] MALDONADO, S.; SANTAPAOLA, J.E.; SINGH, J.; TORREZ, M.; GARAY, A. (2008). Cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Food Science and Technology*, Campinas, v.28, n.1, p.251-256.
- [13] HAWKES J.; FLINK, J. M. (1978). Osmotic concentration on fruit slice prior to freeze dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation*, Hoboken, v.2, p.265-284.
- [14] AOAC. (1990). *Official Methods of Analysis*. Arlington, US.
- [15] ALVA, H.; BAZÁN CRUZ, E.; JORGE CABRERA SÁNCHEZ, J.; HUACCHA, K.; ROJAS, S. (2013). Optimización de humedad y textura en snacks de manzana, evaluando espesor y temperatura de secado. *Agroindustrial Science*, Trujillo, v.3, n.2, p.91-100.
- [16] WU, J.; GAO, H.; ZHAO, L.; LIAO, X.; CHEN, F.; WANG, Z.; HU, X. (2007). Chemical compositional characterization of some apple cultivars. *Food Chemistry*, New York, v.103, n.1, p.88–93.
- [17] FERNANDEZ AEDO, P.A. (2007). *Estudio de la impregnación a vacío de miel y su efecto en atributos de calidad de hojuelas de manzana (var. Granny Smith) deshidratadas*. Santiago: Tesis (Ing. Alim.), Universidad de Chile. 76p.
- [18] PACHECO ESTAY, L.A. (2009). *Determinación de nutrientes en manzanas de las variedades Fuji Royal, Granny Smith y Fuji en frutos libres y afectados por bitter pit*. Santiago: Tesis de Ingeniería en Alimentos, Universidad de Chile. 63p.
- [19] AZUARA, E.; BERISTAIN, C.I.; GARCÍA, H.S. (1992). Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *Journal of Food Science and Technology*, Luxemburgo, v.29, n.4, p.239-242.
- [20] ARIAS, L.; PEREA, Y.; ZAPATA, J.E. (2017). Cinética de la transferencia de masa en la deshidratación osmótica de mango (*Mangifera indica* L.) var. *Tommy Atkins* en función de la temperatura. *Información Tecnológica*, La Serena, v.28, n.3, p.47-58.
- [21] ZAPATA, J.E.; RESTREPO-SUÁREZ, A.M.; ARIAS, L. (2016). Cinética de la deshidratación osmótica del aguacate (*Persea americana*), y optimización del color por medio de superficies de respuesta. *Información Tecnológica*, La Serena, v.27, n.4, p.17-32.
- [22] HAMED, F.; MOHEBBI, M.; SHAHIDI, F.; AZARPAZHOOH, E. (2018). Ultrasound-assisted osmotic treatment of model food impregnated with pomegranate peel phenolic compounds: Mass transfer, texture, and phenolic evaluations. *Food and Bioprocess Technology*, Berlin, v.11, n.5, p.1061-1074.
- [23] PELEG, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, Hoboken, v.53, n.4, p.1216-1219.
- [24] PARK, K.; BIN, A.; BROD, F.; PARK, T. (2002). Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Engineering*, Ámsterdam, vol.52, n.3, p.293-298.
- [25] CRANK, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford: Clarendon Press.