Revista Científica
ISSN: 0798-2259
revistafcv@gmail.com
Universidad del Zulia
Venezuela

APLICACIÓN DEL MODELO DE WEIBULL NORMALIZADO EN LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE LÁMINAS DE SARDINA

Application of Normalized Weibull Model in the Osmotic Dehydration of Sardine Sheets

Otoniel Corzo [1*] y Nelson Bracho [2]

[1]Departamento de Tecnología de Alimentos y [2]Departamento de Estadística. Universidad de Oriente. Núcleo de Nueva Esparta. Guatamare. Venezuela. E-mail: otocorzo@cantv.net

RESUMEN

Conocer la cinética de deshidratación osmótica de un alimento y los factores que la afectan son aspectos importantes para diseñar un adecuado proceso. En este trabajo se investigó la aplicación del modelo de Weibull normalizado para describir la deshidratación osmótica de láminas finitas de sardina y determinar el coeficiente de difusión efectivo del agua. La deshidratación osmótica se realizó durante 4 horas utilizando salmueras de diferentes concentraciones (0,15-0,27 g NaCl/g) y temperaturas (30-38°C). Durante el proceso se midió el contenido de agua en las láminas y estos valores se ajustaron al modelo de Weibull normalizado. Los altos valores del coeficiente de regresión (R^2 > 0,99), la alta significancia (α < 0,001) para el coeficiente de difusión (*D*) y el parámetro β, y los bajos valores del ji-cuadrado reducido, indicaron la aceptabilidad del modelo para describir el proceso y determinar el coeficiente de difusión efectivo D_e del agua. Los valores de *D* variaron entre 1,01 x 10^{-11} m^2/s y 4, 30 x 10^{-11} m^2/s.

Palabras clave: Deshidratación osmótica, modelo de Weibull, coeficiente de difusión, simulación, ley de Fick, sardina.

ABSTRACT

Knowledge of kinetics of osmotic dehydration of a food and factors that cause effects are aspects import for the appropriate design of process. In this work the application of normalized Weibull model was investigated for describing the osmotic dehydration (OD) of sardine finite sheets and determining the effective diffusion coefficient for water. The OD was carried out during 4 hours using brine at different concentrations (0.15-0.27 g NaCl/g) and temperatures (30-38°C). During process the water content of shhets was measured and these values were fitted to normalized Weibull model. The high values of regression coefficients (R^2 > 0.99), high significance (α < 0.001) of diffusion coefficient (*D*), parameter β, and low values of chi-square indicated the acceptability of Weibull model for describing the process and determining the effective diffusion coefficient D_e for water. The values of *D* ranged from 1.01 x 10^{-11} m^2/s to 4.30 x 10^{-11} m^2/s.

Key words: Osmotic dehydration, Weibull model, diffusion coefficient, simulation, Fick's law, sardine.

INTRODUCCIÓN

La deshidratación osmótica es un proceso que consiste en la inmersión del alimento sólido, ya sea entero o en piezas, en soluciones acuosas de alta concentración en azúcares y/o sales para provocar al menos dos flujos principales, simultáneos y en contracorriente: el flujo de agua desde el alimento hacia la solución y la transferencia simultánea de soluto desde la solución hacia el alimento. Estos flujos se deben a los gradientes de concentración del agua y soluto existentes a un lado y otro de las membranas que forman el tejido del alimento [33]. Durante el proceso, los contenidos de agua y de soluto en el alimento cambian hasta lograr un contenido en equilibrio con la solución osmótica.

La cinética de la pérdida de agua se ha modelado considerando la ley de difusión de Fick [1, 2, 6-8, 22, 25, 30, 31], relaciones empíricas como el modelo de Peleg [10, 31], y modelos probabilísticos como el de Weibull [20, 25, 26, 31]. El modelo de Fick proporciona una visión de la importancia mecanística del fenómeno observado, pero sacrifica la precisión de lo representado debido a que no se consideran las incertidumbres [28] y además requiere de un cierto esfuerzo matemático para su aplicación. Los modelos empíricos y probabilísticos se basan en la representación matemática de lo observa-

Recibido: 09 / 10 / 2007. Aceptado: 27 / 10 / 2008.

do, cubren algunas de las imprecisiones del modelo de Fick y son de aplicación más sencilla. La idea básica del modelo de Weibull es considerar el proceso como una caja negra, variando las condiciones de los factores que entran en ella, midiendo las cantidades que salen de ella y derivando las correlaciones adecuadas.

El modelo de Weibull se ha utilizado para describir, entre otras, la cinéticas de: eliminación por alta presión de *Bacillus subtilis* [23], rehidratación de cereales para el desayuno [25, 26], pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de alimentos [13], resistencia térmica del *Bacillus cereus* [15], y germinación de esporas del Bacillus cereus [9]. Se han realizado algunos intentos para utilizar el parámetro de escala del modelo de Weibull como un indicador del mecanismo (difusión, relajación) de entrada de agua durante la rehidratación [13, 27, 31], lo cual ha dado origen al modelo de Weibull normalizado [28]. Este modelo fue propuesto para relacionar el parámetro de escala del modelo de Weibull con el coeficiente de difusión del agua durante la rehidratación de frutas deshidratadas y facilitar su determinación. No hay información sobre el uso del modelo de Weibull normalizado en la deshidratación osmótica de productos vegetales y cárnicos, por lo tanto es importante estudiar su aplicabilidad en este proceso para diferentes productos alimenticios.

El objetivo de este trabajo fue aplicar el modelo de Weibull normalizado para predecir el contenido de agua y determinar el coeficiente de difusión del agua en láminas finitas de sardina, durante la deshidratación osmótica a diferentes temperaturas y concentraciones de la solución osmótica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de las muestras

Se utilizaron sardinas (*Sardinella aurita*) frescas capturadas en la zona de Pampatar, Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela, de 15-20 cm de largo y 30-35 g/sardina de peso. Las sardinas se filetearon manualmente y luego los filetes se cortaron en láminas de 20,1 ± 0,4 mm de largo, 15,0 ± 0,6mm de ancho y 6,4 ± 0,9 mm de espesor. Se determinaron los contenidos de agua y sal en la sardina fresca, por cuadruplicado.

Deshidratación osmótica

Se formaron al azar, cuatro grupos experimentales, formados por cuatro láminas cada uno. Cada grupo experimental se colocó en una celda de cuatro compartimientos con el objeto de evitar la interferencia entre las láminas. Los cuatro grupos se introdujeron simultáneamente en una solución osmótica de concentración y temperaturas dadas para someterlos a deshidratación osmótica con agitación magnética constante. Luego, cada grupo se extrajo a intervalos de 1 hora por grupo. Las láminas deshidratadas se escurrieron durante 5 min, secaron superficialmente con papel absorbente y se les determinó el contenido de agua y sal. Este procedimiento se efectuó a las condiciones correspondientes según un diseño experimental factorial completo 5x5x4 por las temperaturas, concentraciones y tiempos de 30; 32; 34; 36 y 38°C; 0,15; 0,18; 0,21; 0,24 y 0,27 g NaCl/g y 1; 2; 3 y 4 h, respectivamente.

Métodos de análisis

Contenido de agua: El contenido de agua se determinó colocando las láminas en estufa a vacío marca Precision, modelo 19 (Pacific Combustion Engineering, EUA, 1995) a 0,1 mm Hg y 60°C hasta tener peso constante [3].

Contenido de sal: El contenido de sal (g NaCl/g) se determinó por el método Mohr [3].

Solución osmótica

La salmuera (solución osmótica) se preparó, según la concentración seleccionada, utilizando sal como soluto, y se mantuvo una proporción entre el líquido y la masa de las láminas de sardina de 20:1 para evitar cambios en la concentración de la solución durante el proceso de deshidratación. La solución osmótica se depositó en un recipiente rectangular forrado en anime para su aislamiento térmico, dotado de un cabezal de calentamiento marca Julabo, modelo MB, de precisión ± 0,02°C, y agitación magnética, con la finalidad de que la temperatura y la concentración se mantuvieran constantes y homogéneas en toda la masa de la solución osmótica. Durante el proceso de deshidratación osmótica se monitoreó la concentración de sal utilizando el método de Mohr [3] y se controló la evaporación colocando una tapa metálica para cubrir las dos terceras parte de la superficie abierta del baño termostatazo marca Julabo, modelo SW-20C (Julabo Labortechnik GmbH, Alemania, 2000).

Modelo de Weibull

El modelo de Weibull describe el comportamiento de sistemas o eventos que tienen algún grado de variabilidad [13, 14], tal como la cinética de la deshidratación osmótica. La función de densidad de la distribución de probabilidad de Weibull se puede escribir como [21]:

$$f(t)=\begin{cases}\dfrac{\beta}{\alpha}\left(\dfrac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad \exp\left(-\dfrac{t}{\alpha}\right)^{\beta}, t>0\\ 0, t\leq 0\end{cases} \tag{1}$$

siendo α el parámetro de escala, β el parámetro de forma, y t el tiempo de muestreo.

Si se considera que: 1) n_i corresponde a la fracción de un componente dado C, que cambia desde un valor inicial (C_0) hasta un valor de equilibrio (C_e), en un tiempo t = α, y 2) el tiempo requerido para alcanzar un cierto valor de n_i está representado por la variable continua y aleatoria T, con una función de densidad de la probabilidad *f(t)*, donde *f(t)* es la función de distribución de Weibull, luego *n(t)* se puede definir como la probabilidad de tener una cierta fracción de C en, al menos, un tiempo especificado *t*, bajo condiciones experimentales específicas [14]. Por lo tanto:

$$n(t) = P(T > t) = \int^{\infty} f(u)du = 1 - F(t) = \exp\left[-\left[\frac{t}{\alpha}\right]^{\beta}\right] \quad (2)$$

siendo *F(t)* la distribución acumulativa correspondiente.

La fracción del contenido de agua durante la deshidratación osmótica se puede expresar como:

$$n(t) = \frac{Z - Z_e}{Z_0 - Z_e} = \exp\left[-\left[\frac{t}{\alpha}\right]^{\beta}\right] \quad (3)$$

siendo Z, Z_e y Z_0 *los* contenidos *de agua en la fase líquida al final* de un tiempo t, en equilibrio e inicial, respectivamente, α el parámetro de escala del modelo, β el parámetro de forma del modelo, y *t* el tiempo de deshidratación o muestreo.

Los contenidos de agua en la fase líquida de la sardina se pueden calcular según Fito y Chiralt [16]:

$$Z = \frac{X_a}{X_a + X_s} \quad (4)$$

siendo X_a y X_s los contenidos de agua y sal en la sardina.

El modelo de Weibull fue normalizado [27, 28] para relacionar el parámetro de escala con el coeficiente de difusión de agua (D) en la rehidratación de frutas cortadas en láminas infinitas:

$$\frac{X_w - X_{we}}{X_{w0} - X_{we}} = \exp\left[-\left[\frac{t}{\alpha_n}\right]^{\beta}\right] = \exp\left[-\left[\frac{t\,D}{L^2}\right]^{\beta}\right] \quad (5)$$

siendo X_w, X_{we} y X_{wo} los contenido de agua al cabo de un tiempo t, en el equilibrio e inicialmente, α_n es el parámetro de escala normalizado, *D el coeficiente de difusión del agua, t* el tiempo de deshidratación, y *L* la mitas del espesor de la lámina.

Para el caso de la deshidratación osmótica de las láminas finitas de sardina se puede escribir como:

$$\frac{Z - Z_w}{Z_0 - Z_e} = Y = \exp\left[-\left[\frac{t}{\alpha_n}\right]^{\beta}\right] = \exp\left[-\left[t\,D\left[\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}\right]\right]^{\beta}\right] \quad (6)$$

siendo *a* la mitad del largo, *b* la mitad del ancho y *c* la mitad del espesor de la lámina de sardina, cuando la difusión ocurre en todos los lados de la lámina.

El coeficiente de difusión efectivo del agua (D_e) está relacionado con el coeficiente de difusión calculado por el modelo normalizado de Weibull, según la expresión [28]:

$$D_e = \frac{D}{R_g} \quad (7)$$

siendo R_g el coeficiente de forma geométrica.

Con el fin de encontrar el valor de R_g en la deshidratación osmótica de la sardina se consideró la difusión en un paralelepípedo recto-rectángulo (lámina finita) de largo 2*a*, ancho 2*b* y espesor 2*c*, para simular las condiciones existentes en el proceso teórico y como base para la comparación. La solución a la ley de Fick para la difusión en una lámina finita corresponde a [12, 24]:

$$Y = \frac{Z - Z_e}{Z_0 - Z_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{n=\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp - (2n+1)^2\pi^2 D_e t\left[\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}\right] \quad (8)$$

Para simular condiciones realistas, se introdujeron los errores al azar tomados de una población con distribución normal, con media igual a cero, y diferentes valores de la desviación estándar [4, 28]:

$$Y_{ruido} = Y_{teórico}\,[1 + (DE)\,(Z_n)] \quad (9)$$

siendo *DE* la desviación estándar (%) y Z_n es una variable aleatoria con distribución normal estándar, $Z_n \sim N(0,1)$.

Para la simulación se tomaron valores: 1) de 2,5% para la desviación estándar que es la comúnmente esperada en el proceso de deshidratación osmótica, 2) entre 10^{-10} y 10^{-12} m^2/s para el coeficiente de difusión efectiva característicos en alimentos deshidratados [17-19, 34], y 3) entre 18 y 22 mm para el largo, entre 14 y 16 mm para el ancho y entre 5,6 y 7,2 mm para el espesor de la lámina, que son los rangos para las dimensiones de las láminas de sardina utilizadas en la deshidratación osmótica.

Análisis estadístico

Los parámetros de los modelos se estimaron utilizando la regresión no lineal. Para evaluar la bondad del ajuste de los datos experimentales al modelo de Weibull normalizado, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) y el ji-cuadrado reducido (χ^2) expresado [2]:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[Y_i - Y_{pi}\right]^2}{N - n} \quad (10)$$

siendo Y_i y Y_{pi} los valores experimentales y predichos por el modelo, *N* el número de datos experimentales y *n* el número de constantes del modelo.

Los efectos de la concentración y temperatura de la solución osmótica sobre los parámetros del modelo de Weibull normalizado se determinaron mediante un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias según LSD con un 95% de confianza. Todos los análisis se efectuaron utilizando el paquete estadístico SPSS 10,0 [32].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación

Los resultados de la regresión no lineal utilizada para la simulación (Ec. 9) se presentan en la TABLA I. El coeficiente de determinación (R^2 > 0.99) y el error estándar asintótico (EEA) de los parámetros derivados D y β, indican el buen ajuste del modelo de Weibull normalizado a los datos simulados.

Como el coeficiente de difusión de los diferentes alimentos varía dentro del rango 10^{-10} a 10^{-12} m^2/s, se usaron estos valores para estudiar su efecto en los parámetros derivados del modelo de Weibull normalizado. La TABLA I muestra que el coeficiente de difusión tiene muy poco efecto sobre la relación (R_g) entre el coeficiente de difusión calculado y el coeficiente de difusión teórico o efectivo utilizado para la simulación. Resultados similares se encontraron en la rehidratación de alimentos particulados [28] considerando la difusión en una sola dirección (lámina infinita). Se hace evidente, por lo tanto, la necesidad de analizar si el valor de R_g varía cuando el fenómeno de la difusión ocurre por todos los lados del alimento, lámina finita, tal como es el caso del presente estudio.

Para estudiar los efectos de las dimensiones largo, ancho y espesor de las láminas de sardina sobre el valor de R_g, se simuló el proceso variando una de las dimensiones características, manteniendo constantes las otras dos y el coeficiente de difusión teórico. Los resultados de la simulación se muestran en las TABLAS II-IV. Se puede ver que los valores de R_g prácticamente no

TABLA I

EFECTOS DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN TEÓRICO (D_t), EN LA SIMULACIÓN, SOBRE EL COEFICIENTE DE FORMA GEOMÉTRICA (R_g). (CONDICIONES: LARGO = 18,0 MM; ANCHO = 14,0 MM; ESPESOR = 7,2 MM)/ EFFECTS OF THEORETICAL DIFFUSION COEFFICIENT (D_t), ON SIMULATION, ON GEOMETRICAL SHAPE COEFFICIENT (R_g). (CONDITIONS: LENGHT = 18.0 MM; WIDTH = 22.0 MM; THICKNESS = 7.2 MM).

D_t (m^2/s)	D (m^2/s)	EEA	β	EEA	R^2	R_g
$1,0x10^{-10}$	$1,29x10^{-9}$	0,01	0,83	0,01	0,999	12,9
$1,0x10^{-11}$	$1,32x10^{-10}$	0,01	0,80	0,01	0.997	13,2
$1,0x10^{-12}$	$1,32x10^{-11}$	0,01	0,76	0,01	0,994	13,2

D = coeficiente de difusión calculado. EEA = error estándar asintótico. β = parámetro de forma. R^2 = coeficiente de determinación.

varían al cambiar estos factores, manteniendo constante el coeficiente de difusión teórico, por lo tanto, el valor de R_g se puede utilizar para cualquier forma geométrica del alimento.

Con base en lo anteriormente señalado se puede decir que el modelo de Weibull normalizado se puede aplicar para determinar el coeficiente de difusión efectivo del agua en láminas de sardina cortadas entre 18 y 22 mm de ancho, entre 14 y 16 mm de largo y entre 5,6 y 7,2 mm de espesor, cuando se deshidratan osmóticamente en salmueras de concentraciones entre 0,15 y 0, 27 g NaCl/g a temperaturas entre 30 y 38°C.

Aplicabilidad del modelo

Los resultados de la regresión no lineal usada para ajustar los valores experimentales al modelo de Weibull normalizado (Ec. 6) se muestran en la TABLA V. Los valores de R^2 (> 0,98), de la significancia (α < 0,001) de los parámetros deriva-

TABLA II

EFECTOS DE LA LONGITUD DE LA LÁMINA, EN LA SIMULACIÓN, SOBRE EL COEFICIENTE DE FORMA GEOMÉTRICA (R_g) (CONDICIONES: ANCHO = 16,0 MM; ESPESOR = 7,2 MM)/ EFFECTS OF LENGTH OF SHEET, ON SIMULATION, ON GEOMETRICAL SHAPE COEFFICIENT (R_g). (CONDITIONS: WIDTH = 16.0 MM; THICKNESS = 7.2 MM).

Longitud(m)	D (m^2/s)	EEA	β	EEA	R^2	R_g
		$D_e = 1,0x10^{-10}$				
0,018	$1,29x10^{-9}$	0,01	0,83	0,01	0,997	12,9
0,020	$1,32x10^{-9}$	0,01	0,79	0,01	0,997	13,2
0,022	$1,32x10^{-9}$	0,01	0,78	0,01	0,996	13,2
		$D_e = 1,0x10^{-11}$				
0,018	1,30 x10-10	0,01	0,80	0,01	0,996	13,0
0,020	1,32 x10-10	0,01	0,79	0,01	0,995	13,2
0,022	1,32 x10-10	0,01	0,79	0,01	9,997	13,2
		$D_e = 1,0x10^{-12}$				
0,018	1,29 x10-11	0,01	0,72	0,01	0,993	12,9
0,020	1,29 x10-11	0,01	0,73	0,01	0,994	12,9
0,022	1,29 x10-11	0,01	0,73	0,01	0,993	12,9

D = coeficiente de difusión calculado. EEA = error estándar asintótico. β = parámetro de forma. R^2 = coeficiente de determinación.

TABLA III

EFECTOS DEL ANCHO DE LA LÁMINA, EN LA SIMULACIÓN, SOBRE EL COEFICIENTE DE FORMA GEOMÉTRICA (R_g) (CONDICIONES: LARGO = 20,0 MM; ESPESOR = 5,6 MM) / EFFECTS OF WIDTH OF SHEET, ON SIMULATION, ON GEOMETRICAL SHAPE COEFFICIENT (R_g). (CONDITIONS: LENGHT = 20.0 MM; THICKNESS = 5.6 MM).

Ancho(m)	D (m^2/s)	EEA	β	EEA	R^2	R_g
		D_e = 1,0x10^{-10}				
0,014	1,27x10^{-9}	0,01	0,84	0,01	0,999	12,7
0,015	1,27x10^{-9}	0,01	0,84	0,01	0,998	12,7
0,016	1,28x10^{-9}	0,01	0,85	0,01	0,999	12,8
		D_e = 1,0x10^{-11}				
0,014	1,30 x10^{-10}	0,01	0,80	0,01	0,996	13,0
0,015	1,33 x10^{-10}	0,01	0,79	0,01	0,997	13,3
0,016	1,31 x10^{-10}	0,01	0,80	0,01	0,997	13,1
		D_e = 1,0x10^{-12}				
0,014	1,31x10^{-11}	0,01	0,77	0,01	0,994	13,1
0,015	1,31x10^{-11}	0,01	0,76	0,01	0,994	13,1
0,016	1,32x10^{-11}	0,01	0,76	0,01	0,994	13,2

D = coeficiente de difusión calculado. EEA = error estándar asintótico. β = parámetro de forma. R^2 = coeficiente de determinación.

TABLA IV

EFECTOS DEL ESPESOR DE LA LÁMINA, EN LA SIMULACIÓN, SOBRE EL COEFICIENTE DE FORMA GEOMÉTRICA (R_g) (LARGO = 22,0 MM; ANCHO = 15,0 MM)/ EFFECTS OF THICKNESS OF SHEET, ON SIMULATION, ON GEOMETRICAL SHAPE COEFFICIENT (R_g). (CONDITIONS: LENGTH = 22.0 MM; WIDTH = 15.0 MM).

Espesor (m)	D (m^2/s)	EEA	β	EEA	R^2	R_g
		D_e = 1,0x10^{-10}				
0,0056	1,35x10^{-9}	0,01	0,85	0,01	0,999	13,5
0,0064	1,36x10^{-9}	0,01	0,79	0,01	0,999	13,6
0,0072	1,32x10^{-9}	0,01	0,85	0,01	0,996	13,2
		D_e = 1,0x10^{-11}				
0,0056	1,33x10^{-10}	0,01	0,79	0,01	0,995	13,3
0,0064	1,31x10^{-10}	0,01	0,80	0,01	0,996	13,1
0,0072	1,32x10^{-10}	0,01	0,79	0,01	0,995	13,2
		D_e = 1,0x10^{-12}				
0,0056	1,31 x10^{-11}	0,01	0,76	0,01	0,994	13,1
0,0064	1,30 x10^{-11}	0,01	0,73	0,01	0,993	13,0
0,0072	1,29 x10^{-11}	0,01	0,72	0,01	0,994	12,9

D = coeficiente de difusión calculado. EEA = error estándar asintótico. β = parámetro de forma. R^2 = coeficiente de determinación.

dos D y β, y de χ^2 (< 1,0 x 10^{-6}) indicaron un buen ajuste de los datos experimentales, confirmando la aplicabilidad del modelo de Weibull normalizado en la descripción de la deshidratación osmótica. La idea básica de la caracterización empírica del proceso es considerarlo como una transformación, en la cual se varían las condiciones de entrada, se miden las características de salida y se derivan las correlaciones adecuadas. En este sentido el modelo de Weibull normalizado es capaz de superar algunas imprecisiones en los modelos determinísticos debido a la existencia de incertidumbres.

Los valores del coeficiente de difusión calculado por la Ec. 6 fueron del orden de 10^{-10} (TABLA V) por lo tanto el valor de R_g fue tomado igual a 13,2 de acuerdo con los resultados de la simulación (TABLAS II-IV). Utilizando la Ec. 7 se calculó el coeficiente de difusión efectivo del agua el cual varió entre 1,01 x 10^{-11} m^2/s y 4, 30 x 10^{-11} m^2/s (TABLA V). Estos valores son similares a los obtenidos aplicando la ley de Fick para láminas de sardina deshidratadas osmóticamente [11], y están dentro del rango esperado (10^{-10} a 10^{-12} m^2/s) para alimentos deshidratados [5, 17-19, 34]. Los valores dependen de los ti-

TABLA V

AJUSTE DE LOS DATOS EXPERIMENTALES AL MODELO DE WEIBULL NORMALIZADO/

FITTING EXPERIMENTAL DATA TO NORMALIZED WEIBULL MODEL

Concentración (g NaCl/g)	Temperatura (°C)	D x 10^{10} (m^2/s)	β	D_e x 10^{11} (m^2/s)	R^2	χ^2 x 10^6
0,15	30	1,35 ± 0,19*	0,66 ± 0,02*	1,01 ± 0,14	0,997	2,43
	32	1,99 ± 0,16*	0,62 ± 0,01*	1,50 ± 0,12	0,999	4,82
	34	2,27 ± 0,05*	0,61 ± 0,01*	1,71 ± 0,05	0,999	3,46
	36	2,17 ± 0,14*	0,53 ± 0,01*	1,63 ± 0,10	0,996	4,37
	38	2,72 ± 0,15*	0,56 ± 0,01*	2,04 ± 0,11	0,997	3,24
0,18	30	1,53 ± 0,04*	0,65 ± 0,01*	1,15 ± 0,04	0,998	1,11
	32	2,66 ± 0,14*	0,53 ± 0,01*	2,00 ± 0,10	0,997	5,15
	34	2,69 ± 0,05*	0,49 ± 0,01*	2,02 ± 0,03	0,996	4,66
	36	2,46 ± 0,25*	0,61 ± 0,02*	1,85 ± 0,19	0,999	5,56
	38	3,43 ± 0,18*	0,48 ± 0,01*	2,57 ± 0,14	0,998	5,37
0,21	30	3,02 ± 0,14*	0,50 ± 0,01*	2,27 ± 0,11	0,998	2,07
	32	2,66 ± 0,03*	0,52 ± 0,01*	1,99 ± 0,05	0,999	3,36
	34	2,91 ± 0,04*	0,54 ± 0,01*	2,18 ± 0,04	0,999	5,82
	36	4,78 ± 0,31*	0,44 ± 0,01*	3,59 ± 0,24	0,999	5,92
	38	3,36 ± 0,05*	0,49 ± 0,01*	2,52 ± 0,06	0,999	5,61
0,24	30	2,85 ± 0,16*	0,47 ± 0,01*	2,14 ± 0,12	0,997	6,32
	32	3,33 ± 0,06*	0,53 ± 0,01*	2,50 ± 0,04	0,998	2,26
	34	4,62 ± 0,07*	0,48 ± 0,01*	3,47 ± 0,05	0,998	3,88
	36	3,71 ± 0,16*	0,44 ± 0,01*	2,79 ± 0,12	0,997	2,30
	38	2,88 ± 0,09*	0,48 ± 0,01*	2,16 ± 0,06	0,988	3,70
0,27	30	3,45 ± 0,34*	0,45 ± 0,01*	2,59 ± 0,37	0,996	5,51
	32	3,79 ± 0,17*	0,45 ± 0,01*	2,85 ± 0,13	0,997	1,72
	34	4,19 ± 0,32*	0,46 ± 0,01*	3,15 ± 0,26	0,966	6,31
	36	5,22 ± 0,33*	0,40 ± 0,01*	3,92 ± 0,25	0,995	3,94
	38	5,72 ± 0,35*	0,41 ± 0,01*	4,30 ± 0,32	0,989	3,22

* significativo a α = 0,001. D = coeficiente de difusión calculado. D_e =coeficiente de difusión efectivo. β = parámetro de forma. R^2 = coeficiente de determinación. χ^2 = ji-cuadrado.

pos y condiciones de los procedimientos experimentales utilizados para su determinación, de los métodos de tratamiento de los datos y de la complejidad de los alimentos [34]. El análisis de varianza mostró que el valor del coeficiente difusión efectivo (D_e) dependía significativamente (P<0,05) de la concentración y temperatura de la solución osmótica, y que en general, D_e aumentaba al incrementarse la concentración y la temperatura. A mayor concentración de la solución osmótica, se incrementa la fuerza impulsora que difunde el agua a través de la membrana de la sardina debido al mayor gradiente de presión osmótica entre el alimento y el medio osmótico (salmuera) [11, 16]. A mayor temperatura, se disminuye la viscosidad de la solución osmótica facilitando así la movilidad de las moléculas de agua desde el alimento a la salmuera [11].

Los valores del parámetro de forma (β) calculados por la ecuación 6, variaron entre 0,44 y 0,66 (TABLA V). Este parámetro está relacionado con la velocidad de transferencia de masa al principio del proceso, por lo tanto si el valor de β es bajo, más rápida es la velocidad y viceversa [26]. Los valores encontrados indican que en la deshidratación osmótica de la sardina la transferencia de masa al principio del proceso es mayor a altas concentraciones y temperaturas de la salmuera. El fenómeno del transporte de agua es complejo y depende de los diferentes mecanismos tales como la capilaridad, difusión y relajación de la matriz sólida, como de la porosidad del alimento [29]. Los valores del parámetro de forma para la deshidratación osmótica de la sardina servirán de comparación para futuros estudios en otras especies marinas.

CONCLUSIONES

El modelo de Weibull normalizado describe la cinética de variación del contenido de agua durante la deshidratación osmótica de láminas finitas de sardina, en salmueras de concentración entre 0,15 y 0,27 g NaCl/g y temperatura entre 30 y 38°C. Este modelo es sencillo en su aplicación y elimina las incertidumbres presentes en los modelos mecanísticos. El coeficiente de forma geométrica para el caso de la deshidratación osmótica es una constante igual a 13,2 e independiente del valor de las dimensiones de la lámina. Igualmente este modelo permite determinar el coeficiente de difusión efectivo del agua durante el proceso, que es una característica de la transferencia de masa necesaria para el diseño de la operación unitaria estudiada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANDRADE, S.A.C.; BARROS N., B.; LÓBREGA, A.C.; AZOUBEL, P.M.; GUERRA, N.B. Evaluation of water and sucrose difusión coefficients during osmotic dehydration of jenipapo (*Genipa americana* L.). **J. Food Eng.** 78(2): 551-555. 2007.

[2] AKPINAR, E.K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **J. Food Eng**. 73(1): 75-84. 2006.

[3] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (A.O.A.C). **Official Methods of Analysis**. 15th Ed. Washington, USA. 1285 pp. 1990.

[4] AZEVEDO, I.C.A.; OLIVEIRA, F.A.R.; DRUMOND, M.C. A study on the accuracy and precision of external mass transfer and diffusion coefficients jointly estimated from pseudo-experimental simulated data. **Math. Comput. Simul.** 48(1): 11–22. 1998.

[5] AZOUBEL, P.M.; MURR, F.E.X. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. **J. Food Eng**. 61(3): 291-295. 2004.

[6] CHENLO, F.; MOREIRA, R.; FERNÁNDEZ-HERRERO, C.; VÁSQUEZ, G. Mass transfer during osmotic dehydration of chestnut using sodium chloride solutions. **J. Food Eng**. 73(2): 164-173. 2006a.

[7] CHENLO, F.; MOREIRA, R.; FERNÁNDEZ-HERRERO, C.; VÁSQUEZ, G. Experimental results and modeling of the osmotic dehydration kinetics of chestnut with glucose solutions. **J. Food Eng.** 74(3): 324-334. 2006b.

[8] CHENLO, F.; MOREIRA, R.; FERNÁNDEZ-HERRERO, C.; VÁSQUEZ, G. Osmotic dehydration of chestnut with sucrose: Mass transfer processes and global kinetics modeling. **J. Food Eng**. 78(3): 765-774. 2007.

[9] COLLADO, J.; FERNÁNDEZ, A.; RODRIGO, M.; MARTINEZ, A. Modelling the effect of a heat shock and germinant concentration on spore germination of a wild strain of *Bacillus cereus.* **Int. J. Food Microbiol**. 106(1): 85-89. 2006.

[10] CORZO, O.; BRACHO, N. Application of Peleg model to study mass transfer during osmotic dehydration of sardine sheets. **J. Food Eng.** 75(4): 535-541. 2006.

[11] CORZO, O.; BRACHO, N. Water effective diffusion coefficient of sardine sheets during osmotic dehydration at different brine concentrations and temperatures. **J.Food Eng**. 80(2): 497-502. 2007.

[12] CRANK, J. Diffusion in solids. **The mathematics of diffusion**. Chapter 3. 2nd Ed. Clarendon Press, Oxford. 24-25 pp. 1975.

[13] CUNHA, L.M.; OLIVEIRA, F.A.R.; ABOIM, A.P.; FRÍAS, J.M. Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic dehydration and improved parameter estimation. **Int. J. Food Sci. Technol**. 36: 253-262. 2001.

[14] CUNHA, L.M.; OLIVEIRA, F.A.R.; OLIVEIRA, J.C. Optimal experimental design for estimating the kinetic parameters of process described by the Weibull probability distribution function. **J. Food Eng.** 37(2): 175-191. 1998.

[15] FERNÁNDEZ, A.; COLLADO, J.; CUNHA, L.M.; OCIO, M.J.; MARTINEZ, A. Empirical model building based on Weibull distribution to describe the joint effect of pH and temperature on the thermal resistance of Bacillus cereus in vegetable substrate. **Int. J. Food Microbiol.** 77: 147-153. 2002.

[16] FITO, P.; CHIRALT, A. An approach to the modeling of solid food-liquid operations: Application to osmotic dehydration. In P. Fito, E. Ortega & G. V. Barbosa-Cánovas (Eds.) **Food engineering 2000**. Chapman & Hall, New York. 231-252 pp. 1997.

[17] GASTÓN, A.L.; ABALONE, R.M.; GINER, S.A.; BRUCE, D.M. Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. **Biosys. Eng**. 8(2): 175-185. 2004.

[18] GELY, M.C.; SANTALLA, E.M. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenpodiun quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. **J. Food Eng**. 78(3): 1029-1033. 2007.

[19] GIOVANELLI, G.; ZANONI, V.; LAVELLI, V.; NANI, R. Water sorption, drying and antioxidant properties of tomato products. **J. Food Eng.** 52(2): 135-141. 2002.

[20] GARCÍA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; MELIS, R.; MULET, A. *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modeling. **J. Food Eng.** 72(4): 346-353. 2006.

[21] HAHN, G.J.; SHAPIRO, S.S. Weibull probability distribution function. **Statistical Models in Engineering**. Wiley, New York. 81-99 pp. 1967.

[22] HASSINI, L.; AZZOUZ, S.; PECZALSKI, R.; BELGHITH, A. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. **J. Food Eng.** 79(1): 47-56. 2007.

[23] HEINZ, V.; KNORR, D. High pressure inactivation kinetics of *Bacillus subtilis* cell by a three-state model considering distributed resistance mechanisms. **Food Biotechnol.** 10: 149-161. 1996.

[24] KHIN, M.M.; ZHOU, W.; PERERA, C.O. A study of the mass transfer in osmotic dehydration of coated potato cubes. **J. Food Eng.** 77(1): 84-95. 2006.

[25] MACHADO, M.F.; OLIVEIRA, F.A.R.; CUNHA, L.M. Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture uptake by ready-to-eat breakfast cereal. **Int. J. Food Sci. Technol**. 34: 47-57. 1999.

[26] MACHADO, M.F.; OLIVEIRA, F.A.R.; GEKAS, V.; SINGH, P. Kinetics of moisture uptake and soluble-solids loss by puffed breakfast cereal immersed in water. **Int. J. Food Sci. Technol**. 33: 225-237. 1998.

[27] MARABI, A.; JACOBSON, M.; LIVINGS, S.; SAGUY, I.S. Effect of mixing and viscosity on rehyd ration of dry food particulates. **Europ. Food Res. Technol**. 218: 339–344: 2004.

[28] MARABI, A.; LIVINGS, S.; JACOBSON, M.; SAGUY, I.S. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. **Eur. Food Res. Technol**. 217: 311-318. 2003.

[29] MARABI, A.; SAGUY, S. Effect of porosity on rehydration of dry food particulates. **J. Sci. Food Agric**. 84: 1105-1110.

[30] MAYOR, L.; MOREIRA, R.; CHENLO, F.; SERENO, A.M. Kinetics of osmotic dehydration of pumpkin with sodium chloride solutions. **J. Food Eng**. 74(2): 253-262. 2006.

[31] SANJUÁN, N.; CÁRCEL, J.A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. Modelling of the rehydration process of broccoli florets. **Eur. Food Res. Technol**. 212: 449-453. 2001.

[32] STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES (SPSS). User's guide, version 10.0. SPSS Inc., Chicago. 135 pp. 2003.

[33] TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruits and vegetables processing. **Food Res. Int.** 26: 59-68. 1993.

[34] ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B. Effective moisture diffusivity estimation from drying data- A comparison between various methods of analysis. **Drying. Technol**. 14(7-8): 1543-1573. 1996.