



EFFECTO DE LAS VARIABLES DE ENCURTIDO EN LOS PARÁMETROS DE TRANSFERENCIA DE MASA, ESTABILIDAD Y CALIDAD DE CHILE PIQUÍN

PICKLING VARIABLES EFFECT ON MASS TRANSFER, STABILITY AND QUALITY PARAMETERS OF PIQUIN PEPPER

A. Valdez-Fragoso, M.C. Soto-Caballero, C.G. Soria-Hernández,
J.I. Valiente-Banuet, J. Welti-Chanes y H. Mújica-Paz*

*Escuela de Biotecnología y Alimentos, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey,
Av. Eugenio Garza Sada 2501. Monterrey, Nuevo León 64849, México*

Recibido 6 de Agosto 2012; Aceptado 12 de Diciembre 2012

Resumen

Se encurtió chile piquín aplicando un pulso de vacío inicial y se evaluó el efecto de la concentración de ácido acético y del cloruro de sodio de la salmuera de encurtido y del tiempo de procesamiento en los parámetros de transferencia de masa, de calidad y de estabilidad del chile. Se obtuvieron ecuaciones para modelar la ganancia de solutos (SG), relación WL/SG, a_w , pH, firmeza e índice de color (IC) del chile piquín. El chile piquín encurtido ganó hasta 7.9% de solutos y por la hidratación del producto (-WL) se obtuvieron valores de WL/SG hasta de -15. Se observó una disminución de firmeza del producto encurtido desde 2 a 59%, en relación al producto fresco, y un cambio de color de verde brillante a diferentes tonos de verde olivo (IC entre -0.8 y -1.80). Se encontró que al encurtir el chile piquín durante 15 días con una solución de encurtido al 2.8% de ácido acético y 13% de cloruro de sodio se obtuvieron los mejores parámetros de estabilidad ($a_w = 0.933$ y $\text{pH} = 3.0$).

Palabras clave: chile piquín, encurtido, transferencia de masa, estabilidad, calidad.

Abstract

Pickling of piquin pepper was performed assisted by an initial vacuum pulse. This study was aimed at evaluating the effect of acetic acid and sodium chloride concentrations in pickling solutions, and processing time on stability, quality, and mass transfer parameters of piquin pepper. Model equations were developed for solute gain (SG), WL/SG ratio, water activity (a_w), pH, firmness and color index (CI) of piquin pepper. Pickled piquin pepper gained pickling solutes (up to 7.9%) and water (-WL), producing WL/SG values up to -15. In comparison with fresh pepper, pickled pepper firmness decreased between 2 and 59% Color changed from bright green to different tones of olive green (CI from -0.8 to -1.8). Pickling of piquin pepper during 15 days in 2.8% acetic acid and 13% sodium chloride gave the best stability parameters ($a_w = 0.933$ and $\text{pH} = 3.0$).

Keywords: piquin pepper, pickling, mass transfer, stability, quality.

1 Introducción

El chile piquín (*Capsicum annuum* var. *aviculare*) es un fruto muy apreciado y cotizado en México por su agradable sabor y porque a pesar de su alto grado de pungencia no produce malestares digestivos como otros chiles (González-García y *col.*, 2011).

Generalmente, el chile piquín se consume fresco, en forma de salsa o encurtido (Montoya-Ballesteros y

col., 2010). El encurtido de chile se puede realizar mediante la incorporación, en el tejido de producto, de suficiente ácido acético y cloruro de sodio, que además de darle un sabor característico, evitan su deterioro microbiano, sin necesidad de calentamiento. A este proceso se le conoce como encurtido en frío (Daeschel y *col.*, 1990) y se utiliza para la conservación de productos que sufren deterioro de la textura cuando se calientan.

*Autor para la correspondencia. E-mail: h.mujica@itesm.mx

Una limitante del uso del encurtido en frío es que la velocidad de penetración de la sal y el ácido acético en los chiles es muy lenta. En condiciones de presión atmosférica se requieren varias semanas para lograr que la salmuera (solución hipertónica de sal y ácido acético) en la que se sumerge el chile, se difunda en el tejido, acidificándolo y salándolo y deshidratándolo hasta alcanzar condiciones de estabilidad ($\text{pH} < 4.6$ y $a_w < 0.95$) (Valdez-Fragoso y col., 2009).

Para acelerar la transferencia de masa de solutos en el encurtido de otros chiles como el jalapeño y el cherry, se han aplicado pulsos de vacío en los sistemas producto/salmuera (Martínez-Monteagudo y col., 2006; Valdez-Fragoso y col., 2007; Valdez-Fragoso y col., 2009). Estos pulsos de vacío permiten la incorporación de la solución en matrices porosas en un corto tiempo debido al mecanismo hidrodinámico (Guillemin y col., 2008). La transferencia de masa durante el proceso de impregnación de solutos con pulso de vacío se puede expresar como pérdida de agua (WL), ganancia de solutos (SG) y/o reducción de peso (WR) del producto tratado. Dicha transferencia de masa depende de las variables de operación (presión de vacío, tiempo de vacío y relajación, concentración y tipo de solutos) y de las características del producto (tipo, geometría, tamaño) (Martínez-Valencia y col., 2011).

La deshidratación y la acidificación de los vegetales encurtidos permiten reducir la actividad de agua y el pH, estabilizando el producto al impedir el crecimiento microbiano. Sin embargo, también es importante considerar que la acidificación del tejido puede generar ablandamiento y pérdida del color verde (Daeschel y col., 1990) lo que disminuye la calidad del producto. Para evitar esta pérdida de calidad se puede añadir calcio y zinc en la solución de encurtido. Se ha reportado que el calcio evita el ablandamiento del tejido debido a que interacciona con las pectinas manteniendo la textura del producto (Cybulska y col., 2011; Casas-Forero y Cáez-Ramírez, 2011) y que puede inhibir el oscurecimiento enzimático (Tomás-Barberán y col., 1997) mientras que el zinc forma un complejo con la clorofila que da un color verde brillante a los vegetales (Tonucci y von Elbe, 1992).

En este trabajo se evaluó el efecto de la aplicación de un pulso de vacío, de la composición de la salmuera acidificada de encurtido y del tiempo de proceso, en los parámetros de transferencia de masa, estabilidad y calidad del chile piquín encurtido.

2 Materiales y métodos

2.1 Materia prima

En los experimentos se utilizó como materia prima chile piquín verde (*Capsicum annuum* var. *aviculare*), adquirido en la central de abastos de Guadalupe, Nuevo León, México y soluciones de encurtido preparadas con ácido acético, cloruro de sodio, cloruro de calcio y cloruro de zinc, grado alimentario.

2.2 Procedimiento y diseño experimental

Se prepararon soluciones de encurtido variando la concentración del ácido acético entre 1.5 y 3.0% (p/p) y la del cloruro de sodio entre 9 y 13% (p/p). A todas las soluciones se les añadió 0.2% (p/p) de cloruro de calcio y 1000 ppm de cloruro de zinc.

Las muestras de chile piquín entero se mantuvieron sumergidas en la solución de encurtido durante 5 min a 50 cm de Hg de vacío, y de 0.3 a 30 días a presión atmosférica en desecadores adaptados para vacío y en un laboratorio climatizado ($T \sim 24^\circ \text{C}$). La relación de chile/solución de encurtido utilizada fue de 1:10. Al finalizar el tiempo de tratamiento (t_e), los chiles se sacaron de la solución, se escurrieron por 5 min y se pesaron.

Los experimentos se realizaron de acuerdo a un diseño central compuesto de tres variables (concentraciones de ácido acético y de cloruro de sodio y tiempo de encurtido) y cinco niveles de cada una. El diseño se generó con el software Design Expert 7.1.5 (Stat Ease Co. Minneapolis, MN, USA). El tiempo de encurtido (t_e) incluye el tiempo de tratamiento a vacío y a presión atmosférica. El análisis estadístico de los datos se realizó también con el software Design Expert.

2.3 Mediciones y cálculos

2.3.1 Determinación de parámetros fisicoquímicos

A las muestras de chile piquín fresco y encurtido se les determinó la humedad con el método 934.06, AOAC (1990) y la acidez, expresada como ácido ascórbico, con el método reportado por Salvatori y col., (1998). La actividad de agua (a_w) se midió con un higrómetro Aqua Lab (Decagon, Washington, USA), el pH con un potenciómetro (Hanna, Padova, Italy) y la concentración de NaCl con un salinómetro (Atago, Tokio, Japón). Todos los análisis se hicieron al menos por triplicado.

2.3.2 Determinación de firmeza

La firmeza del chile piquín se midió con un texturómetro TA-XT2 (Scarsdale, NY, USA). Se aplicó la prueba de compresión a las muestras de chiles enteros con pedúnculo. Se utilizó un cilindro de aluminio de 3.5 cm de largo y 1.2 cm de diámetro y un pre y post ensayo de 5 mm/s, una velocidad de 1 mm/s, una distancia de compresión de 4 mm. Se registró la $F_{\text{máx}}$ (N) y se reporta el promedio del triplicado.

2.3.3 Determinación de color

Para medir el color se utilizó un colorímetro CR-300 series (Minolta, USA), con un diámetro de cabezal de 8 mm y un índice de difusión de D65. Se cubrió la superficie de la base de una caja Petri con chiles sin pedúnculo y enseguida se colocó dentro de una caja negra, bajo la fuente de luz del colorímetro. Se midieron por quintuplicado los parámetros L^* , a^* y b^* (escala CIELAB) y se calculó el índice de color (IC) como la relación entre a^*/b^* (Koca y col., 2006).

2.3.4 Cálculo de parámetros de transferencia de masa

Los parámetros de transferencia de masa: pérdida de agua (WL) y ganancia de solutos (SG) se calcularon mediante las ecs. 1 y 2 (Villalpando-Guzman y col., 2011).

$$WL = \frac{(w_i X_{wi}) - (w_t X_{wt})}{w_i} \times 100 \quad (1)$$

$$SG = \frac{(w_t X_{st}) - (w_i X_{si})}{w_i} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

w_i es el peso del chile fresco (g); w_t es el peso del chile encurtido (g); X_{wi} es la fracción de agua del chile fresco (g H₂O/g chile fresco); X_{wt} es la fracción de agua del chile encurtido (g H₂O/g chile encurtido); X_{si} es la fracción de solutos del chile fresco (g de solutos/g chile fresco); X_{st} es la fracción de solutos del chile encurtido (g de solutos/g chile encurtido).

Con los valores de WL y SG se calculó la relación WL/SG, que es un indicador de los fenómenos que predominan en el encurtido, deshidratación impregnación (WL/SG) o hidratación (-WL/SG).

3 Resultados y discusión

3.1 Caracterización de chile piquín

El chile piquín fresco tuvo una humedad de $75.6 \pm 0.6\%$, una a_w de 0.995 ± 0.0035 , un pH de 5.3 ± 0.05 y una acidez de 0.60% . Se caracterizó también por un color verde brillante ($IC = -1.29 \pm 0.04$) y una textura firme ($F_{\text{máx}} = 42.1 \pm 8.4$ N). Los valores altos de pH y a_w del chile fresco lo hacen muy sensible a reacciones de deterioro que acortan su vida de anaquel.

3.2 Análisis estadístico

Mediante la metodología de superficie de respuestas se llevó a cabo un análisis de regresión no lineal y de varianza para ajustar modelos matemáticos a los datos experimentales de las respuestas de transferencia de masa, estabilidad y calidad del chile piquín (Montgomery, 2001; Design Expert 2007). Los modelos polinomiales significativos ($p < 0.05$) que se obtuvieron se encuentran en la Tabla 1 y son de utilidad para estudiar el efecto de las variables de encurtido y para definir la región óptima de las respuestas estudiadas (Myers y Montgomery, 2002).

3.3 Parámetros de transferencia de masa

La variación de los parámetros de transferencia de masa SG y WL/SG se describió adecuadamente con modelos de segundo orden ($p < 0.05$) (Tabla 1). La concentración de ácido acético y de cloruro de sodio y el tiempo de encurtido afectaron significativamente ($p < 0.05$) la incorporación de los solutos de encurtido (SG) al chile piquín, mientras que solo la concentración de cloruro de sodio y el tiempo de encurtido tuvieron influencia en la relación WL/SG.

En la Fig. 1 se puede observar que hubo un aumento importante de la ganancia de solutos durante los primeros 15 días de encurtido. La mayor SG del chile piquín (7.9%) se obtuvo con la solución hipertónica al 3.0% de ácido acético y una concentración de NaCl de 13% . Resultados similares de SG se reportaron en el encurtido de chile cherry (SG entre 1.2 y 7.3%) (Valdez-Fragoso y col., 2009).

En las diferentes condiciones del encurtido se obtuvieron valores negativos de WL/SG del chile (Fig. 2). Estos valores resultan de valores negativos de WL, lo cual significa que el producto se hidrata. La mayor ganancia de agua del chile piquín (WL/SG = -15) se obtuvo con una salmuera de 9% de NaCl y tiempos de encurtido menores a 5 días.

Tabla 1. Ecuaciones predictivas de los parámetros de transferencia de masa, estabilidad y calidad de chile piquín encurtido

Parámetros de transferencia de masa		
$SG = -33.43 + 7.78[CH_3COOH] + 3.65[NaCl] + 0.64t_e + 0.17[CH_3COOH][NaCl] + 9.21 \times 10^{-3}[CH_3COOH]t_e - 0.01[NaCl]t_e$	$R^2 = 0.953$	
$-2.01[CH_3COOH]^2 - 0.13[NaCl]^2 - 0.01t_e^2$		
$WL/SG = -19.06 + 2.43[CH_3COOH] - 1.23[NaCl] + 2.53t_e + 0.08[CH_3COOH][NaCl] - 0.08[CH_3COOH]t_e - 0.09[NaCl]t_e$	$R^2 = 0.903$	
$-0.38[CH_3COOH]^2 + 0.12[NaCl]^2 - 0.04t_e^2$		
Parámetros de estabilidad		
$a_w = 1.03 + 5.44 \times 10^{-3}[CH_3COOH] - 7.63 \times 10^{-3}[NaCl] - 3.81 \times 10^{-3}t_e - 5.46 \times 10^{-4}[CH_3COOH][NaCl]$	$R^2 = 0.946$	
$+2.33 \times 10^{-4}[CH_3COOH]t_e - 8.80 \times 10^{-5}[NaCl]t_e - 7.19 \times 10^{-5}[CH_3COOH]^2 + 2.39 \times 10^{-4}[NaCl]^2 + 1.28 \times 10^{-4}t_e^2$		
$pH = 3.44 + 0.15[CH_3COOH] + 0.15[NaCl] - 0.13t_e - 1.38 \times 10^{-15}[CH_3COOH][NaCl] - 9.54 \times 10^{-3}[CH_3COOH]t_e$	$R^2 = 0.872$	
$+3.09 \times 10^{-17}[NaCl]t_e - 0.05[CH_3COOH]^2 - 7.48 \times 10^{-3}[NaCl]^2 + 5.33 \times 10^{-3}t_e^2$		
Parámetros de calidad		
$IC = -11.40 + 2.68[CH_3COOH] + 1.24[NaCl] + 0.19t_e - 0.02[CH_3COOH][NaCl] - 0.03[CH_3COOH]t_e$	$R^2 = 0.877$	
$-5.54 \times 10^{-3}[NaCl]t_e - 0.51[CH_3COOH]^2 - 0.05[NaCl]^2 - 3.88 \times 10^{-3}t_e^2$		
$F_{max} = -120.27 + 7.60[CH_3COOH] + 29.80[NaCl] - 3.08t_e + 2.58[CH_3COOH][NaCl] - 0.44[CH_3COOH]t_e + 0.19[NaCl]t_e$	$R^2 = 0.810$	
$-7.49[CH_3COOH]^2 - 1.75[NaCl]^2 + 0.08t_e^2$		

Las variables significativas ($p < 0.05$) son las que aparecen en negritas en las ecuaciones

SG (%): ganancia de solutos, WL (%): pérdida de peso, [NaCl] (%): concentración de cloruro de sodio, [CH₃COOH] (%): concentración de ácido acético, t_e (días): tiempo de encurtido, aw: actividad de agua, IC: índice de color, F_{max} (N): fuerza máxima

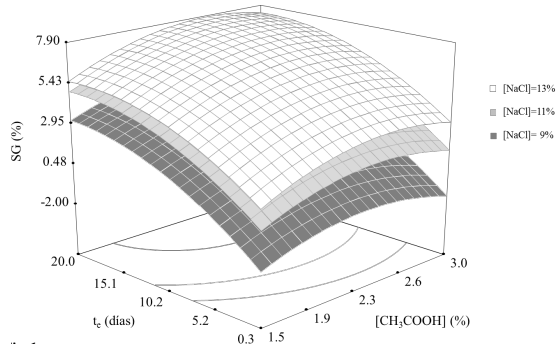


Fig. 1. Ganancia de solutos (SG) de chile piquín en función del tiempo de encurtido y de la concentración de CH_3COOH en la salmuera, a tres niveles de concentración de NaCl.

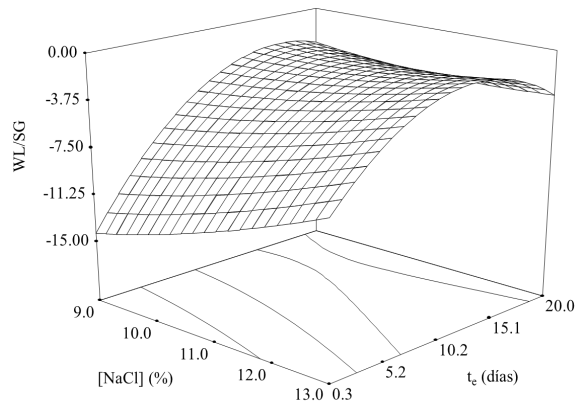


Fig. 2. Relación WL/SG de chile piquín en función del tiempo de encurtido y de la concentración de NaCl, en salmueras con 2.2% de CH_3COOH .

En estas condiciones el fenómeno de ganancia de agua llega a ser más importante que la impregnación de solutos al chile. La ganancia de agua se puede atribuir a dos fenómenos: primero la eliminación del gas que llena los poros del chile por el pulso de vacío aplicado al sistema chile-solución y en seguida, cuando se rompe el vacío, se produce un gradiente de presión ($P_{atm} - P_{vacío}$) que impulsa un flujo másico de la solución de encurtido hacia los poros del tejido de chile. Este mecanismo hidrodinámico podría ser más notorio en soluciones menos concentradas, las cuales se impregnarían más fácilmente en el tejido del chile (Guillemin y col., 2008; Fito y col., 2001). El efecto de deshidratación de la solución hipertónica, aunque sea por tiempos largos, sería menor sobre WL y WL/SG, por ser un mecanismo molecular y porque después de la impregnación masiva, el gradiente de concentración es menor. En efecto, la solución impregnada incorpora al tejido solutos de encurtido y agua.

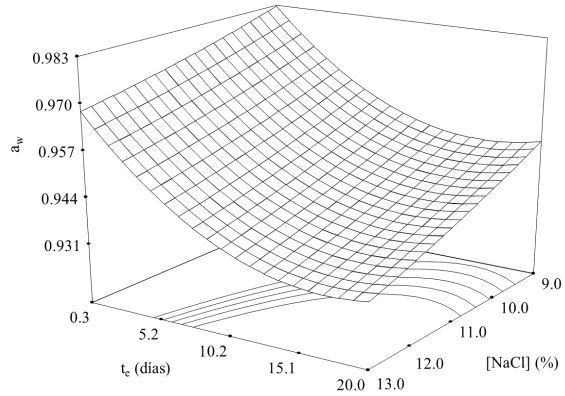


Fig. 3. Actividad de agua de chile piquín en función del tiempo de encurtido y de la concentración de NaCl, en salmueras con 2.2% de CH_3COOH .

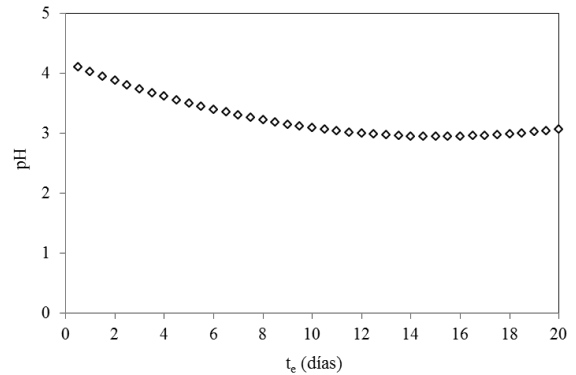


Fig. 4. pH del chile piquín en función del tiempo de encurtido, a 11% de cloruro de sodio y 3.0% de CH_3COOH en la solución.

El fenómeno de ganancia de agua ($-WL$) ha sido reportado también en el encurtido de chile cherry (Valdez-Fragoso y col., 2009), y en el salado en salmueras de carne de pollo (Deumier, 2004) y de pavo (Deumier y col., 2003), procesos en los que se aplicó un pulso de vacío inicial (1.6 - 11 min).

3.4 Parámetros de estabilidad

Los análisis de varianza (ANOVA) y de regresión mostraron que los datos experimentales de a_w y pH se pueden predecir con modelos cuadráticos con $R^2 = 0.946$ y $R^2 = 0.850$, respectivamente (Tabla 1). Las variables que afectaron significativamente la a_w fueron la concentración de NaCl, y los términos lineales y cuadráticos del t_e ($p < 0.05$) (Tabla 1). Estos dos términos del t_e también afectaron significativamente el pH.

La a_w disminuyó hasta 0.931 en 15 días de tratamiento en una solución de 13% de NaCl y 2.2% de CH_3COOH (Fig. 3). Esta disminución en la a_w permite tener un producto más estable. En un estudio de encurtido de chile cherry con un pulso de vacío inicial se llegó a una a_w de 0.964, pero en 30 días (Valdez-Fragoso y col., 2009). La mayor y más rápida reducción de a_w en el chile piquín puede atribuirse a que tiene un área superficial específica mayor que el cherry.

Se observó una disminución del pH en los chiles (de 4.3 a 2.9) al aumentar el tiempo de encurtido (Fig. 4). A partir de los 15 días de tratamiento ya se puede considerar un producto estable ($\text{pH} = 2.9$), ya que la acción combinada de los iones hidrógeno y las moléculas no disociadas del ácido acético pueden tener un efecto antimicrobiano (Levine y Fellers, 1940). En un estudio sobre acidificación de rebanadas de chile se observó una disminución significativa del pH cuando se aplicaron pulsos de vacío, en relación a la acidificación tradicional a presión atmosférica (Derossi y col., 2010).

3.5 Parámetros de calidad

Los parámetros de color indican que hubo un cambio de color del producto fresco de verde brillante ($a^* = -13.28 - 0.16$, $b^* = 10.28 - 0.42$, $L^* = 56.17 - 0.32$) a verde opaco del chile encurtido (Tabla 2). Los valores más pequeños de a^* , b^* y L^* se acercan al centro de la escala de color Hunter Lab lo que corresponde a un color cercano al verde olivo.

La variación en los parámetros a^* y b^* se puede agrupar en el índice de color (IC), con el que es posible modelizar los cambios de color del chile encurtido en función de las variables del proceso (Tabla 1). El índice de color IC del chile piquín encurtido se puede describir mediante un modelo de segundo orden ($p < 0.05$, $R^2 = 0.877$). Las variables de encurtido que afectaron significativamente el IC fueron la concentración de ácido acético y la interacción de la concentración de ácido acético con el tiempo de encurtido, así como los términos cuadráticos de las concentraciones de ácido acético, de cloruro de sodio y el tiempo de encurtido.

En la Fig. 5 se observa que la mayor pérdida del color del chile piquín ocurre en tratamientos con salmueras con más de 2.3% de ácido acético y tiempos largos de encurtido (10-20 días). La degradación del color puede ser provocada por la acción del ácido acético ya que disminuye el pH, y los iones hidrógeno pueden sustituir a los iones magnesio en

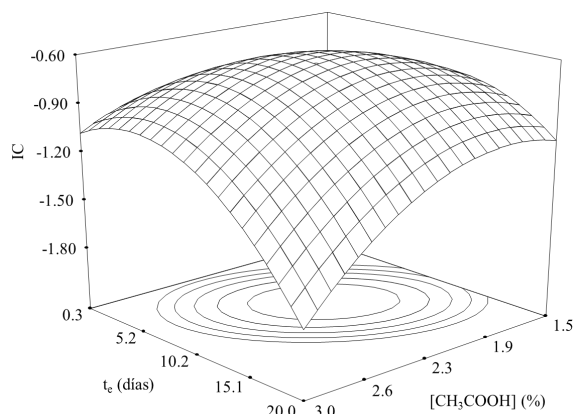


Fig. 5. Índice de color de chile piquín encurtido en 356 salmueras con 11% de NaCl.

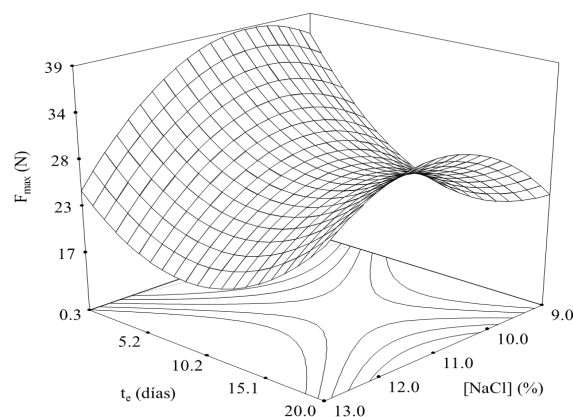


Fig. 6. Fuerza máxima de compresión de chile piquín encurtido en salmueras acidificadas con 2.2% de CH_3COOH .

el anillo de porfirina de la clorofila convirtiéndola en feofitina y feofoforbida (Tonucci y von Elbe, 1992). Se ha reportado el efecto del pH en la degradación de la clorofila conforme se reduce el pH en brócoli escaldado (Gunawan y Barringer, 2000).

En tiempos cortos de encurtido (0.3-5 días) y con concentraciones bajas de ácido acético (1.5-1.8%) la pérdida de color fue mínima, debido posiblemente a una menor pérdida del ión Mg^{+2} o a una incorporación del ión Zn^{+2} en la molécula de clorofila (Tonucci y von Elbe, 1992; LaBorde y von Elbe, 1990).

La firmeza del chile piquín, determinada como la fuerza máxima de compresión, se ajustó adecuadamente a un modelo de segundo orden ($R^2 = 0.811$, $p < 0.05$) (Tabla 1). Las variables de encurtido que afectaron significativamente la $F_{\text{máx}}$ fueron los términos cuadráticos de la concentración de NaCl y

Tabla 2. Parámetros de color del chile piquín encurtido en diferentes salmueras acidificadas y tiempos de encurtido.

[CH ₃ COOH] (%)	[NaCl] (%)	t_e (días)	L*	a*	b*
1.8	9.8	16.0	56.2	-8.1	8.4
2.3	11.0	10.1	40.0	-4.6	7.0
2.3	13.0	10.1	46.9	-8.2	9.2
1.8	12.2	4.3	50.8	-9.0	10.9
3.0	11.0	10.1	45.0	-8.2	7.9
2.3	11.0	20.0	54.4	-8.0	7.8
2.7	9.8	4.3	49.8	-8.8	9.5
1.8	12.2	16.0	55.8	-7.6	8.7
2.3	11.0	10.1	39.7	-4.5	8.1
2.7	9.8	16.0	56.1	-14.2	12.4
2.3	11.0	10.1	40.5	-4.9	7.2
2.7	12.2	4.3	51.7	-9.5	12.9
2.3	11.0	10.1	40.1	-4.5	7.5
2.3	9.0	10.1	42.0	-5.4	6.9
1.5	11.0	10.1	41.9	-5.2	6.5
2.7	12.2	16.0	58.1	-15.6	12.0
2.3	11.0	10.1	45.5	-4.8	6.4
2.3	11.0	10.1	43.0	-4.3	7.1
2.3	11.0	0.3	51.7	-10.4	10.5
1.8	9.8	4.3	47.4	-8.0	9.1

[CH₃COOH]: concentración de ácido acético, [NaCl]: concentración de cloruro de sodio, t_e : tiempo de encurtido

Tabla 3. Optimización de los parámetros de estabilidad del chile piquín encurtido en diferentes salmueras y tiempos de encurtido.

Variables de encurtido			Parámetros			
[CH ₃ COOH] (%)	[NaCl] (%)	t_e (días)	SG (%)	pH	a_w	Deseabilidad
2.8	13.0	15.0	7.5	3.0	0.933	0.906
2.8	13.0	15.0	7.5	3.0	0.933	0.906
2.8	13.0	15.0	7.5	3.0	0.933	0.904
2.8	13.0	14.8	7.5	3.0	0.933	0.903
2.9	13.0	15.0	7.4	3.0	0.933	0.901
2.9	13.0	15.0	7.3	3.0	0.933	0.901
2.9	13.0	15.0	7.3	3.0	0.933	0.900

[CH₃COOH]: concentración de ácido acético, [NaCl]: concentración de cloruro de sodio, t_e : tiempo de encurtido, SG: ganancia de solutos, a_w : actividad de agua.

del tiempo de encurtido ($p < 0.05$) (Tabla 1). La concentración de ácido acético no tuvo un efecto significativo en la firmeza del chile piquín encurtido. Estos resultados son similares a datos reportados, en los que no se observó ablandamiento de chiles cherry y jalapeños encurtidos con salmueras al 2, 3 y 4% de ácido acético (Valdez-Fragoso y col., 2009).

En general, la firmeza del chile piquín encurtido fue menor a la del chile fresco (Fig. 6). Los productos más firmes se pueden obtener con una salmuera

de 11% de NaCl y 2.2% de ácido acético. Estas condiciones probablemente favorecen la formación de carboxilos libres en las pectinas y su interacción con iones Ca⁺² y permiten la formación de estructuras tridimensionales más rígidas que promueven la firmeza de los chiles (Castro y col., 2008; Fleming y col., 1993).

3.6 Optimización de los parámetros de estabilidad

Para optimizar las diferentes variables respuesta del proceso de encurtido se utilizó una técnica de optimización simultánea que hace uso de las funciones de deseabilidad (Eren y Kaymak-Ertekin, 2007; Montgomery, 2001). La técnica se basa en convertir cada respuesta y_i en una función de deseabilidad individual (d_i) que está en el rango $0 \leq d_i \leq 1$. Si la variable respuesta está en el valor objetivo, $d = 1$, pero si la variable respuesta está fuera de ese valor, $d = 0$. Mediante el software Design Expert 7.1.5 se escogieron las variables de diseño que maximizaran la deseabilidad global $D = (d_1, d_2, \dots, d_m)^{1/m}$, donde m son las respuestas. Se tomaron en cuenta solo las variables respuesta que tuvieran una función deseabilidad global (D) cercana a 1, y no se consideraron las que tuvieran una $D < 0.5$ (Myers y Montgomery, 2002).

La Tabla 3 muestra 7 condiciones de proceso (tiempo de encurtido y composición de la salmuera acidificada), para las cuales los modelos desarrollados predicen máxima SG (7.3-7.5%) y pH (3.0) y a_w (0.933) mínimos, con una función deseabilidad $D > 0.90$. Estos niveles de los factores de conservación (pH y a_w) son un indicador de la estabilidad y seguridad del chile piquín encurtido (Leistner, 1995), sin tener que recurrir a la refrigeración.

Conclusiones

Se determinaron los parámetros de estabilidad, calidad y de transferencia de masa del chile piquín encurtido.

Se obtuvieron ecuaciones polinomiales de segundo orden para modelizar la ganancia de solutos (SG), la relación WL/SG, el pH, la a_w , el color y la firmeza del chile encurtido en función de la concentración de ácido acético, del cloruro de sodio y del tiempo de encurtido.

Se optimizaron las condiciones de encurtido de chile piquín con un pulso de vacío inicial para obtener un producto con color y textura adecuadas y parámetros que favorecen la estabilidad del producto (pH = 3.0 y $a_w = 0.933$) en 15 días de proceso.

Agradecimientos

Los autores agradecen al ITESM Campus Monterrey el financiamiento de este proyecto. Agradecemos especialmente al Dr. José Guadalupe Ríos Alejandro por su apoyo en el análisis de datos.

Referencias

- AOAC (1990). *Official Methods of Analysis*. Washington, D. C. Association of Official Analytical Chemists.
- Casas-Forero, N. y Cáez-Ramírez, G. (2011). Cambios morfológicos y de calidad por aplicación de tres fuentes de calcio bajo tratamiento térmico suave en melón (*Cucumis melo* L.) fresco pre-cortado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10, 1-14.
- Castro, S. M., Saraiva, J. A., Lopes-da-Silva, J. A., Delgadillo, I., Van Loey A., Smout, C. y Hendrickx, M. (2008). Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and red bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry* 107, 1436-1449.
- Cybulska, J., Zdunek, A. y Konstantkiewicz, K. (2011). Calcium effect on mechanical properties of model cell walls and apple tissue. *Journal of Food Engineering* 102, 217-223.
- Daeschel, M.A., Fleming, H. P. y Pharr, D.M. (1990) Acidification of brined cherry peppers. *Journal of Food Science* 55, 186-192.
- Derossi, A., De Pilli, T. y Severini, C. (2010). Reduction in the pH of vegetables by vacuum impregnation: A study on pepper. *Journal of Food Engineering* 99, 9-15.
- Design Expert. 2007. Stat-Ease Corporation, Minneapolis, USA.
- Deumier, F., Trystram, G., Collignan, A. Guédider, L. y Bohuon, P. (2003). Pulsed vacuum brining of poultry meat: interpretation of mass transfer mechanisms. *Journal of Food Engineering* 58, 85-93.
- Deumier, F. (2004). Pulsed-vacuum immersion of chicken meat and skin in acid solutions. Effects on mass transfers, colour and microbial quality. *International Journal of Food Science and Technology* 39, 277-286.
- Eren, I. y Kaymak-Ertekin, F. (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 79, 344-352.

- Fito, P., Chiralt, A., Barat, J.M., Andrés, A., Martínez-Monzó, J. y Martínez-Navarrete, N. (2001). Vacuum impregnation for development of new dehydrated products. *Journal of Food Engineering* 49, 297-302.
- Fleming, H. P., Thompson, R. L. y McFeeters, R. F. (1993). Firmness retention in pickled peppers as affected by calcium chloride, acetic acid and pasteurization. *Journal of Food Science* 58, 325-356.
- González-García, F. I., Martínez-García, H. L. Villalón-Mendoza, H., Medina-Martínez, T. Ramírez-Meráz M. y Garza-Ocañas, F. (2011). Alternatives of utilization of the resource chili piquín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum/aviculare*) of the Northeast Mexico. León, Gto. México. Mayo 2011. Abstracts of the Eight World Pepper Convention.
- Guillemín, A., Degraeve, P., Noël, C. y Saurel, R. (2008). Influence of impregnation solution viscosity and osmolarity on solute uptake during vacuum impregnation of apple cubes (var. *Granny Smith*). *Journal of Food Engineering* 86, 475-483.
- Gunawan, M. I. y Barringer, S. A. (2000). Green colour degradation of blanched broccoli (*Brassica oleracea*) due to acid and microbial growth. *Journal of Food Processing and Preservation* 24, 253-263.
- LaBorde, L. F. and von Elbe J. H. (1990). Zinc complex formation in heated vegetable purees. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 38, 484-487.
- Leistner, L. (1995). Use of hurdle technology in food processing: recent advances. En: *Food Preservation by Moisture Control Fundamentals and Applications*. (Barbosa-Cánovas, G. y Welti-Chanes, J. eds), Technomic Co., Lancaster, PA, USA.
- Levine, A. S. y Fellers, C. R. (1940). Inhibiting effect of acetic acid upon microorganisms in the presence of sodium chloride and sucrose. *Journal of Bacteriology* 40, 255-269.
- Martínez-Monteagudo, S. I., Salais-Fierro, F. Perez-Carrillo, J. R., Valdez-Fragoso, A., Welti-Chanes, J. y Mújica-Paz, H. (2006). Impregnation and infiltration kinetics of isotonic solution in whole jalapeño pepper using a vacuum pulse. *Journal of Food Science* 71, E125-E131.
- Martínez-Valencia, B. B., Abud-Archila, M., Ruiz-Cabrera, M. A., Grajales-Lagunes, A., Dendooven, L., Ovando-Chacón, S. L. y Gutiérrez-Miceli, F. A. (2011). Pulsed vacuum osmotic dehydration kinetics of melon (*Cucumis melo* L.) var. cantaloupe. *African Journal of Agricultural Research* 6, 3588-3596.
- Montgomery, D.C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*, 5th. ed. John Wiley & Sons, Inc. NY.
- Myers, R. H. y Montgomery, D. C. (2002). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. NY.
- Montoya-Ballesteros, L. C., Gardea-Béjar, A., Ayala-Chávez, G. M., Martínez-Núñez Y.Y. y Robles-Ozuna, L. E. (2010). Capsaicinoids and color in chiltepin (*Capsicum annuum* var. *aviculare*) Processing effect on sauces and pickles. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 9, 197-207.
- Salvatori, D., Andrés, A., Chiralt, A. y Fito, P. (1998). The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering* 21, 59-73.
- Tomás-Barberán, F. A., Gil, M. I., Castañar, M., Artes, F. y Saltveit, M. E. (1997). Effect of selected browning inhibitors on phenolic metabolism in item tissue of harvested lettuce. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45, 583-589.
- Tonucci, L. H. y von Elbe, J. H. (1992). Kinetics of the formation of zinc complexes of chlorophyll derivatives. *Journal Agricultural and Food Chemistry* 40, 2341-2344.
- Valdez-Fragoso, A., Martínez-Monteagudo, Salais-Fierro, F., Welti-Chanes, J. y Mújica-Paz, H. (2007). Vacuum pulse-assisted pickling whole jalapeño pepper optimization. *Journal of Food Engineering* 79, 1261-1268.
- Valdez-Fragoso, A., Sáenz-Hernández, C. M., Welti-Chanes, J. y Mújica-Paz, H. (2009). Cherry pepper pickling: mass transport and firmness

parameters and stability indicators. *Journal of Food Engineering* 95, 648-655.

Villalpando-Guzman, J., Herrera-López, E. J.
Amaya-Delgado, L., Godoy-Zaragoza, M. A.,

Mateos-Díaz, J. C., Rodríguez-González, J.
y Jaubert-Garibay, S. (2011). Efecto del
secado complementario con microondas sobre
tres formas de rebanadas de mango. *Revista
Mexicana de Ingeniería Química* 10, 281-290.