

Deshidratación de papas por métodos combinados de secado: deshidratación osmótica, secado por microondas y convección con aire caliente¹

Patricia Della Rocca¹, Rodolfo Mascheroni²

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Química, Medrano 951 (C1799AAQ) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

² CIDCA (Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos) (CCT La Plata - CONICET y UNLP). 47 y 116, 1900 La Plata, Argentina, y MODIAL Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, La Plata, Argentina

patriciadellarocca@hotmail.com

Recibido el 11 de Julio de 2011, aprobado el 1º de Agosto de 2011

Resumen

El presente trabajo se enfocó en el estudio y análisis de las variables que afectan el secado de un producto hortícola como la papa, que se destinará a la elaboración de guisos. En primer lugar, el secado se llevó a cabo mediante la deshidratación osmótica y luego a través del secado combinado (microondas y convección con aire caliente). Se aplicaron diferentes modelos matemáticos a los datos experimentales a fin de representar los datos cinéticos obtenidos durante el proceso de secado.

PALABRAS CLAVE: DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA - SECADO COMBINADO DE PAPAS - SECADO DE FRUTIHORTÍCOLAS - MICROONDAS Y CONVECCIÓN CON AIRE CALIENTE - ALIMENTOS MÍNIMAMENTE PROCESADOS

Abstract

The present work is focused on the study and analysis of the drying of a horticultural product, the potato, which will be used for the preparation of stew. Firstly, the drying is carried out by osmotic dehydration and then, by a combined drying (microwave and convection with hot air). Different mathematical models were applied to the experimental data in order to represent the kinetics data obtained during the drying process.

KEYWORDS: OSMOTIC DEHYDRATION - POTATOES COMBINED DRY - MICROWAVE AND CONVECTION WITH HOT AIR - MINIMUM PROCESSED FOOD

¹ El presente artículo forma parte del trabajo de tesis de P. Della Rocca para optar al grado de Magister en Tecnología de los Alimentos, bajo la dirección del Dr. R. H. Mascheroni

Introducción

Teniendo en cuenta los hábitos actuales de consumo de alimentos mínimamente procesados, en este trabajo se realizó el secado combinado (SC) por microondas y convección con aire caliente de papas pretratadas por deshidratación osmótica (DO), que se conservaron en atmósfera modificada (30 % de CO₂ y 70 % de N₂) y refrigeración a 4°C. Las mismas requieren para su consumo una posterior rehidratación y cocción en un tiempo mínimo con agua en ebullición. Este tiempo se estimó en 5-6 min aproximadamente, luego de ensayos de laboratorio y sensoriales.

La deshidratación osmótica (DO) es una técnica de deshidratación parcial de alimentos que consiste en la inmersión de los mismos en soluciones acuosas de solutos (azúcares y/o sales) de alta presión osmótica. La fuerza impulsora requerida para el flujo del agua es la diferencia de potencial químico entre la disolución y el fluido intracelular. Si la membrana celular es perfectamente semipermeable, el soluto es incapaz de difundir hacia el interior de las células. Sin embargo, en los alimentos es difícil tener membranas perfectamente semipermeables, debido a su compleja estructura interna, y entonces, siempre se produce alguna difusión del soluto al alimento, y viceversa, una lixiviación de los componentes del alimento hacia la solución. Por consiguiente, el fenómeno presenta dos procesos simultáneos en contracorriente: el movimiento de agua desde el alimento hacia la solución hipertónica, en el que se pueden arrastrar algunos componentes disueltos del alimento junto con el agua extraída y por otro lado, la impregnación del alimento con los solutos que provienen de la solución.

El proceso de deshidratación osmótica se caracteriza por presentar dos etapas: una dinámica y otra de equilibrio. En la etapa dinámica las velocidades de transferencia de materia disminuyen hasta que se llega al equilibrio. El proceso osmótico termina cuando se alcanza este equilibrio, es decir, cuando la velocidad neta de transporte de materia se anula. El agua se elimina principalmente por difusión y flujo capilar, mientras que la impregnación del alimento con los solutos y la lixiviación de los componentes del alimento se producen solamente por difusión.

El uso de la deshidratación osmótica en la industria alimenticia como pretratamiento mejora la calidad del producto en términos de color, flavour y textura con un mínimo requerimiento energético ya que se realiza a bajas temperaturas. Se aplica como etapa previa de muchos procesos para mejorar las propiedades nutricionales, sensoriales y funcionales del alimento sin modificar su integridad (Torreggiani, 1993). Generalmente precede a procesos como la congelación (Ponting, 1973, Ramallo y Mascheroni, 2010, Bianchi y col., 2009), liofilización (Hawkes y Flink, 1978), secado al vacío (Dixon y Jen, 1977) o secado por aire caliente (Nanjundaswamy y col., 1978).

La ventaja de la tecnología de secado combinado, microondas y convección con aire caliente, luego del pretratamiento con deshidratación osmótica radica en las superiores velocidades de secado alcanzadas preservando las propiedades organolépticas del producto, cuando se lo compara con el secado convectivo con aire caliente o microondas solamente.

Los objetivos del presente trabajo fueron:

Generales

El estudio de las cinéticas de deshidratación osmótica y secado combinado: microondas y convección con aire caliente de las papas.

Específicos

1. Las determinación de las condiciones más favorables para la deshidratación osmótica de las papas. Se procuró obtener la mayor pérdida de agua del producto (cubos de papas) preservando las características sensoriales adecuadas del mismo (color, sabor, aroma y textura). Para ello se trabajó variando la concentración de sacarosa en 10%, 20%, 30%, 40% y 50% m/m y la concentración de sal en 5%, 10% y 20% m/m. La relación masa de solución a masa de papa se varió entre 1,6, 4 y 10. Se analizó también cómo influye la modificación de la temperatura (30 y 40 °C) y el tamaño de los cubos (0,6; 1 y 1,2 cm de lado) en la deshidratación osmótica.

2. Una vez obtenidas las condiciones más favorables, se reemplazó la sacarosa por xilitol, usando la misma concentración hallada en

la búsqueda de las condiciones de operación empleando sacarosa. El uso de xilitol fue con el propósito de no aumentar el contenido calórico del producto.

3. En la etapa siguiente se llevó a cabo el secado combinado de las papas luego del pretratamiento con deshidratación osmótica en solución acuosa de xilitol y sal. Se desarrollaron las actividades que se enuncian a continuación:

- a) Análisis de la concentración más adecuada de sal que enmascare el dulzor del xilitol.
- b) Evaluación del tiempo de deshidratación osmótica para alcanzar una pérdida de agua adecuada antes del secado combinado (por microondas y convección con aire caliente simultáneamente).
- c) Elección de la potencia en el secado combinado y del tiempo de tratamiento, que resultan en una mejora en la calidad del producto final obtenido, considerando las características sensoriales (color, aroma y sabor) y de rehidratabilidad.

4. Modelado de la deshidratación osmótica por medio de modelos basados en la solución analítica de la segunda Ley de Fick aplicados sobre los datos experimentales y determinación de los coeficientes de difusión. Los valores obtenidos se contrastaron con los encontrados en la literatura y con los obtenidos considerando una cinética de secado de primer orden.

5. Modelado de la deshidratación osmótica por métodos empíricos que correlacionan directamente la pérdida de agua y la ganancia de sólidos con algunas variables representativas del proceso como puede ser el tiempo mediante ecuaciones muy simples (Peleg, Azuara, Hawkes y Flink, cinética de primer orden, modelo polinomial y Raoult-Wack). Los parámetros obtenidos dependen de las condiciones de operación: concentración de solutos en la solución, la temperatura, el nivel de agitación, el tamaño del producto, etc.

6. Modelado del secado por microondas. Se ajustaron las curvas de secado con distintos modelos matemáticos: lineal, exponencial, potencial, logarítmico y polinómicos de diferentes grados.

7. Evaluación de los índices de calidad del producto (sabor y rehidratabilidad) luego del se-

cado combinado en busca de condiciones óptimas para el proceso combinado.

8. Envasado en atmósfera modificada (30% de CO₂ y 70% de N₂) y determinación de su tiempo de vida útil luego del análisis de los resultados microbiológicos del producto.

9. Estudio de las estructuras de las papas a diferentes tiempos de tratamientos durante la deshidratación osmótica, el secado por microondas y el secado combinado a través de microscopía electrónica de barrido ambiental.

Parte Experimental

Materiales

Se trabajó con papas (nombre científico: **Solanum tuberosum**) variedad Spunta. Para llevar a cabo las experiencias se seleccionaron papas de tamaño similar. Los agentes deshidratantes utilizados para elaborar las diferentes soluciones acuosas empleadas en las distintas experiencias fueron: sacarosa comercial, marca Ledesma, xilitol calidad alimenticia, marca Huakang Pharma, y sal fina comercial (cloruro de sodio), marca Dos Anclas.

Métodos

En una etapa inicial se realizó la búsqueda de las condiciones de operación para la deshidratación osmótica. Se trabajó con papas, que se pelaron y cortaron manualmente en cubos de 0,6, 1 y 1,2 cm de lado. Para la pesada se utilizó una balanza granataria, marca Mettler, modelo P1210.

Para los ensayos de deshidratación osmótica se prepararon soluciones con mezclas de sacarosa y sal como solutos y agua como solvente. Se trabajó variando la concentración de sacarosa en 10%, 20%, 30%, 40% y 50% m/m y la concentración de sal en 5%, 10% y 20% m/m. La relación masa de solución a masa de papa se varió entre 1,6; 4 y 10. Se analizó cómo influía en la deshidratación osmótica la modificación de la temperatura (30 y 40 ± 0.5 °C) y el tamaño de los cubos (0,6; 1 y 1,2 cm de lado). Se realizó la búsqueda de los valores de estas variables, condiciones de operación, para un mismo nivel de agitación 120-130 rpm, que permiten alcanzar una adecuada pérdida de agua analizando y comparando las curvas

de deshidratación. Se estudiaron las variables que afectaban más la pérdida de peso como: el tiempo, la concentración de sacarosa y la concentración de sal a través de la optimización con superficies de respuesta. Las superficies de respuesta se obtuvieron con el programa Statistica, versión 7. Se consideró como criterio de ajuste de la superficie de respuesta a los datos experimentales, el error medio, ERM:

$$ERM = \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_{\text{exp}_i} - V_{\text{pre}_i}}{V_{\text{exp}_i}} \right| \frac{1}{N} \quad (1)$$

Donde:

V_{exp_i} = valor experimental

V_{pre_i} = valor predicho por la superficie de respuesta

N = número de datos experimentales

Experiencias de deshidratación osmótica

El sistema (papas y solución) se colocó en un vaso de precipitado de 2 L y se agitó a 120-130 rpm en un agitador orbital con controlador de temperatura y una campana acrílica que permite mantener una temperatura constante en el recinto en donde se halla el recipiente.

Al inicio de las experiencias se trabajó con una masa de papa de 270 g y una masa de solución de 1080 g (relación masa de solución/masa de papa igual a 4).

La humedad inicial de las papas frescas se determinó tomando una muestra de 10 g de papa sin deshidratar y llevándola a estufa. A intervalos de tiempo de 30 min (para la primera medición) y 1h para las mediciones posteriores se extrajeron del vaso de precipitado las papas que se hallaban inmersas en la solución deshidratante. Se las enjuagó con agua destilada para extraer la sacarosa adherida a su superficie y se las secó cuidadosamente con papel tissue. Posteriormente, las papas se pesaron para analizar cómo varía la pérdida de peso en función del tiempo. Se pesaron en conjunto y luego se para cada tiempo analizado se separaron 5 g de papa para determinar humedad en estufa y 20 g de solución para determinar la concentración de

sólidos solubles en la misma.

Para elaborar las curvas de secado (pérdida de peso de las papas en función del tiempo de deshidratación osmótica) se realizaron las correcciones de peso correspondientes por la masa de muestra que se retiró para cada tiempo de medida.

Las experiencias se llevaron a cabo por triplicado.

Descripción de las experiencias de secado por microondas

Se trabajó en un microondas marca De Longhi, potencia máxima 1000W, capacidad 25 litros; frecuencia: 2450 MHz.

Al inicio de la experiencia se colocó una masa de papa fresca de 270 g en el microondas. Las papas se distribuyeron de manera concéntrica y dejando un espacio en el centro (formando una especie de corona) sobre la bandeja. Se trabajó con distintas potencias: 20%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% y 90% respecto de la potencia máxima alcanzada por el equipo en las distintas experiencias de secado. Se pesó la masa de papa total a diferentes tiempos para obtener así las curvas de secado, masa en función de su variación con el tiempo de secado por microondas: Masa (g) vs t (min). El secado se continuó hasta obtener peso aproximadamente constante. Las experiencias se realizaron por triplicado. El tratamiento de las réplicas fue similar al realizado con los datos experimentales de deshidratación osmótica.

Descripción de las experiencias de secado combinado (microondas y convección con aire caliente) de las papas y pretratamiento con deshidratación osmótica

Se realizó en tres etapas:

1. Análisis de la concentración más adecuada de sal a emplear en el pretratamiento.

En el pretratamiento con deshidratación osmótica, antes del secado combinado, se reemplazó la sacarosa por xilitol y la concentración de sal se modificó manteniendo las restantes variables en las condiciones de operación indicadas anteriormente. Las papas se deshidrataron osmóticamente durante 1h

a dos concentraciones de sal diferentes 5% m/m y 10% m/m. El producto obtenido en los dos casos se evaluó sensorialmente por un panel no entrenado y también se comparó la pérdida de peso en ambas experiencias.

2. Análisis del tiempo de pretratamiento con deshidratación osmótica.

En las experiencias de deshidratación osmótica utilizando una concentración de xilitol del 40% m/m y una concentración de sal del 5% m/m y con las restantes variables en las condiciones finales de operación obtenidas, se estudió si era más conveniente deshidratar durante 1 o 2h analizando la pérdida de peso.

3. Condiciones elegidas de operación de las papas pretratadas con deshidratación osmótica.

Finalmente, las papas fueron pretratadas con deshidratación osmótica en solución acuosa de xilitol en las siguientes condiciones, y luego se realizó el secado combinado:

- Concentración de xilitol: 40 % m/m
- Concentración de sal: 5 % m/m
- Temperatura: 40 °C
- Relación masa de solución a masa de papa: 4
- Tamaño de cubos: 1 cm de arista
- Nivel de agitación: 120-130 rpm
- Tiempo de deshidratación osmótica: 1 h

Descripción de las experiencias de secado combinado de las papas luego del pretratamiento

Las papas fueron luego llevadas al equipo de microondas, el que se hizo operar en condiciones de secado combinado, microondas junto con convección con aire caliente. Se analizaron para el secado combinado las siguientes potencias de microondas: 40%, 50% y 60% de la potencia máxima del equipo. Estas experiencias se realizaron por triplicado y el tratamiento de los datos experimentales obtenidos en las réplicas fue similar al que se dio a los datos de deshidratación osmótica.

Determinación de humedad de las papas

El contenido de humedad se determinó a través de la pérdida de peso por desecación en estufa. Durante 2h se las seca a 70 °C y lue-

go a 104 °C por 72h más. En un principio el secado se realiza a menor temperatura para evitar la pérdida abrupta de agua y la pérdida de material por proyección.

Medición de la transferencia de masa

La evolución de la transferencia de masa con el tiempo se midió a través de la pérdida de peso (PP); el contenido de sólidos totales (ST); la pérdida de agua (PA); la ganancia de sólidos (GS) y la concentración de los sólidos solubles en la solución (SS). Las ecuaciones se detallan a continuación:

$$PP(\%) = \left(\frac{m_0 - m_f}{m_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

m_0 = masa inicial de muestra de papa fresca.
 m_f = masa de muestra deshidratada osmóticamente a tiempo t

$$ST(\%) = \left(\frac{m_s}{m_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$H(\%) = 100 - ST(\%) \quad (3)$$

m_s = masa de muestra seca para determinado tiempo, t
H (%) = porcentaje de humedad para determinado tiempo, t

$$PA(\%) = \left[\left(1 - \frac{ST^0}{100} \right) - \left(1 - \frac{ST}{100} \right) \right] \times 100 \quad (4)$$

$$\left(1 - \frac{ST}{100} \right) \left(1 - \frac{PP}{100} \right) \times 100 \quad (5)$$

ST^0 = contenido de sólidos totales iniciales
ST = contenido de sólidos totales para determinado tiempo, t

$$GS(\%) = \left[\left(1 - \frac{PP}{100} \right) \frac{ST}{100} - \frac{ST^0}{100} \right] \times 100$$

Modelado de la deshidratación osmótica

Varios modelos encontrados en la literatura

se utilizaron para ajustar los datos experimentales. En este trabajo se aplicaron modelos que se basan en la segunda Ley de Fick de la difusión y modelos totalmente empíricos como los de Peleg, Azuara, Hawkes y Flink, Raoult-Wack, cinéticas de primer orden y modelos polinómicos.

Se consideró como criterio de ajuste de los modelos a los datos experimentales, el coeficiente de determinación, R^2

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{pre_i} - \bar{V})^2}{\sum_{i=1}^N (V_{exp_i} - \bar{V})^2} \quad (6)$$

\bar{V} = promedio de todos los N datos experimentales

N = número de datos experimentales

Subíndices

pre indica valor predicho por el modelo

exp indica valor experimental

i: valor iésimo, cada uno de los N valores

Para la presentación estadística de los coeficientes de difusividad efectivos se calcularon los coeficientes de variación muestral que miden la variabilidad de los datos respecto de la media y cuya ecuación es la siguiente:

$$CV = 100 \frac{s}{\bar{X}} \quad (7)$$

donde:

CV= coeficiente de variación muestral

s= desviación estándar o típica que se calcula con la expresión:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (8)$$

\bar{X} = promedio muestral que se determina mediante la ecuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (9)$$

Modelado del secado por microondas

Se aplicaron los siguientes modelos para el secado por microondas: lineal, potencial, exponencial, logarítmico y polinómicos (grado 2, 3, 4, y 5).

Modelado del secado combinado (microondas y convección con aire caliente simultáneo)

En el caso del secado combinado, los datos experimentales se ajustaron con los modelos de Page, de primer orden, exponencial y polinómicos

Condiciones de envasado en atmósfera modificada y determinación del tiempo de vida útil del producto.

Las papas deshidratadas por secado combinado (potencia de microondas 60% del máximo) y pretratadas por deshidratación osmótica durante 1h, utilizando como agentes deshidratantes: xilitol y sal, 40% m/m y 10% m/m en la solución, respectivamente, fueron luego envasadas en atmósfera modificada: 30% de CO₂ y 70% de N₂ en bolsas de material multicapa: polietileno-poliamida-polietileno. Luego se determinó el tiempo de vida útil durante su almacenamiento en refrigeración a 4°C. Los ensayos microbiológicos realizados fueron: aerobios mesófilos a 30°C, anaerobios mesófilos a 30°C, enterobacterias, coliformes totales, mohos, levaduras clostridios sulfito reductores, staphylococcus aureus coagulasa, escherichia coli.

Los análisis se realizaron en los días 0, 30, 60 y 120 de almacenamiento.

Microscopía electrónica de barrido ambiental de las papas para estudiar su estructura y los efectos que provocan en la misma los distintos tratamientos

Se realizó la microscopía electrónica de barrido ambiental a las papas sometidas a los siguientes tratamientos: deshidratación osmótica, microondas y secado combinado (secado por microondas y convección con aire caliente), en este último caso luego de pretratamiento con deshidratación osmótica.

La microscopía electrónica de barrido es una

herramienta fundamental en el estudio de la microestructura de las muestras y permite ver las modificaciones del producto cuando es sometido a los distintos tratamientos. Se trabajó con un microscopio electrónico de barrido ambiental, marca Philips, modelo XL 30. Las muestras se sometieron a una atmósfera con 45% de humedad relativa, temperatura de 5°C y una presión de 3 torr y se analizaron al natural.

Resultados

Como este trabajo es una síntesis de un trabajo de tesis se presentan algunos de los resultados obtenidos y no todos por razones de espacio.

Se realizó la búsqueda de las condiciones óptimas de trabajo (concentración de sacarosa, de sal, temperatura, relación masa de solución a masa de papa, tiempo de deshidratación, etc.) durante la deshidratación osmótica. Es decir se buscó el valor de las anteriores variables que maximizan la pérdida de peso (PP), incrementando la pérdida de agua (PA) y minimizando la ganancia de sólidos (GS) (ecuación 10). A continuación se estudiaron cada una de estas variables y sus efectos sobre el fenómeno de deshidratación. Para ello se modificaron cada una de las variables que se deseaban analizar manteniendo las restantes constantes.

$$PP = PA - GS \quad (10)$$

Las condiciones finales de operación obtenidas fueron:

Concentración de sacarosa: 40 % m/m
Concentración de sal: 10% m/m
Temperatura: 40 °C
Relación masa de solución a masa de papa: 4
Tamaño de cubos: 1 cm de arista
Nivel de agitación: 120-130 rpm

Una concentración de sacarosa de 40% m/m produce una pérdida de peso considerable y una viscosidad de la solución adecuada para el nivel de agitación usado. Si la concentración de sacarosa es muy elevada la solución se torna muy viscosa y requiere un nivel de agitación mayor y el gasto energético se incrementa, pudiendo también aumentar las posibilidades de daño del producto por ero-

sión durante la agitación. El dulzor de la solución se enmascara favorablemente con una concentración de sal de 10% m/m no permitiendo percibir el salado. Además la sinergia de estos dos solutos a las concentraciones empleadas produce una apreciable pérdida de agua sin ser significativa la ganancia de sólidos ya que la impregnación de la superficie de las papas con sacarosa forma una barrera a la entrada de sal pero no a la salida del agua. Una temperatura de 40°C permite también obtener una pérdida de peso favorable manteniendo una conveniente eficiencia energética. Si bien un tamaño de cubo inicial menor al elegido (0,6 cm de arista) produce una mayor pérdida de peso (pérdida de agua) durante las primeras horas de deshidratación, tenemos que considerar que estos cubos se encogen luego de la deshidratación osmótica obteniéndose un tamaño de cubos de papa muy pequeño para el uso que deseamos darle. La relación masa de solución a masa de papa de 4 parece adecuada a los efectos de la pérdida de peso y al manejo de la cantidad de solución a reciclar en posteriores partidas para deshidratar y la disposición del efluente cuando la solución deba reemplazarse.

A partir de los datos experimentales obtenidos se pudo inferir que cuando el propósito es la deshidratación osmótica de un producto es maximizar la pérdida de agua, y se quiere limitar la impregnación del mismo sólo a las capas externas, es conveniente usar altas concentraciones de solución (del orden de 40-50% m/m, no superiores) y tiempos de deshidratación osmótica cortos (entre 1 y 2 horas).

Si lo que se desea es la impregnación del producto es más conveniente emplear una concentración relativamente baja y tiempos largos de deshidratación. Los resultados concuerdan con los alcanzados por Genina Soto et al (2001).

Si analizamos el efecto sinérgico de los dos solutos: sacarosa y sal en la pérdida de agua del producto, se encuentra que cuando se incrementa la concentración de los solutos en la solución, se produce una mayor deshidratación del producto, ya que la actividad de agua de la solución acuosa disminuye y la fuerza impulsora para la deshidratación es mayor.

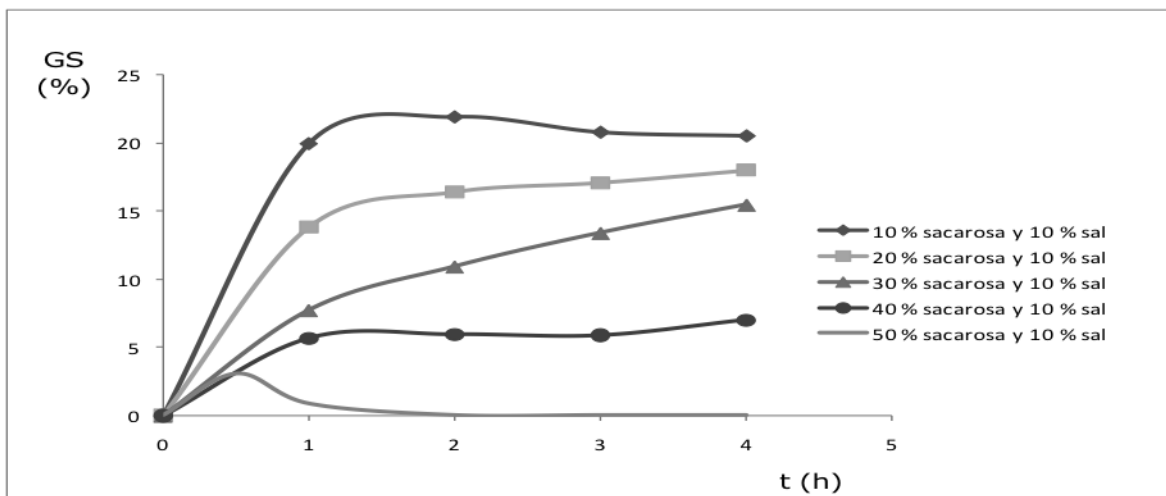


Fig. 1. Ganancia de sólidos en función del tiempo en las distintas experiencias de deshidratación osmótica con diferentes concentraciones de sacarosa y la misma concentración de sal en la solución, 10% m/m. Los valores de las restantes variables iguales a las de las condiciones de operación óptimas finales

Análisis de la ganancia de sólidos en el producto durante el proceso de deshidratación osmótica

En la Fig. 1 se puede apreciar la ganancia de sólidos en función del tiempo para las distintas experiencias de deshidratación osmótica realizadas en soluciones de diferente concentración de sacarosa (10% m/m, 20% m/m, 30% m/m, 40% m/m y 50% m/m) y la misma concentración de sal, 10% m/m.

En esta figura se puede observar que la ganancia de sólidos es inferior a altas concentraciones de sacarosa debido probablemente a la formación de una capa de sacarosa superficial sobre el producto que impide el ingreso de sólidos dentro del mismo (como se mencionó anteriormente). Este fenómeno fue observado también por otros autores (Giraldo, 2003; Mujica – Paz y col., 2003). Según estos investigadores, la solución más diluida puede penetrar mejor en el interior de los tejidos, en contraste con las soluciones concentradas que son más viscosas y, entonces, obstaculizan el paso de los solutos que se hallan en la solución (iones sodio y cloruro hidratados y moléculas de sacarosa) al desarrollarse dicha capa de soluto sobre el alimento. Esta película posee un espesor mayor para concentraciones de sacarosa en la solución superiores. Por consiguiente, resulta mayor el impedimento para el ingreso de sólidos al producto.

En la curva correspondiente a la mayor concentración de sacarosa en la solución, 50% m/m se observa un máximo a aproximadamente 30 min. Luego de este tiempo los valores disminuyen en concordancia con una disminución en la entrada de sólidos por la formación de dicha capa y un incremento en la salida del agua que arrastra consigo los iones solvatados de la sal desde el interior del producto hacia la solución. Estudio de la deshidratación osmótica en función del tiempo de deshidratación

En el proceso de deshidratación osmótica la mayor pérdida de peso se presenta luego de transcurridas las primeras dos horas aproximadamente para las distintas concentraciones de sacarosa en la solución. Para las soluciones de concentración en sacarosa inferiores (30% m/m, 20% m/m y 10% m/m) la pérdida de peso comienza a disminuir levemente luego de las 2h. Este fenómeno, como afirmamos precedentemente, podría atribuirse a una impregnación del producto con solutos provenientes de la solución.

Superficies de respuesta

La metodología de superficie de respuesta se utilizó para estimar los efectos de las variables de proceso: tiempo de deshidratación, concentración de sacarosa y concentración de sal en la solución deshidratante. Estas fueron las variables que provocaron variaciones más signifi-

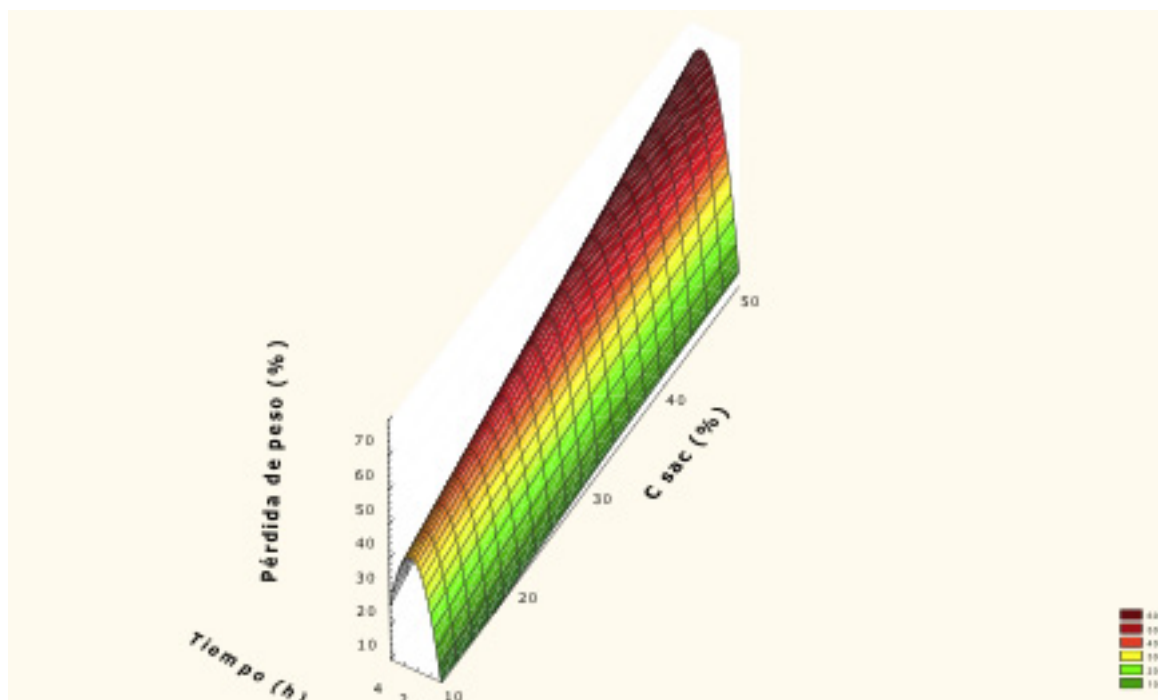


Fig. 2. Superficie de respuesta: Pérdida de peso en función de la concentración de sacarosa en la solución deshidratante (10% m/m – 50% m/m) y el tiempo de deshidratación (0 – 4h)

cativas en el rango de valores que se analizaron, tal como puede observarse al analizar los gráficos anteriormente presentados. En el caso de la temperatura no se empleó esta metodología porque sólo se estudiaron dos valores: 30°C y 40°C y en el caso de la relación masa de solución a masa de papa no se observaron diferencias muy significativas en el rango de R (1,6-10). En cuanto al tamaño de los cubos se empleó el valor intermedio del rango estudiado (1 cm).

La metodología de superficie de respuesta es una herramienta muy efectiva para la optimización de los parámetros de proceso. En primer lugar, se analizó la influencia sobre la pérdida de peso de la concentración de sacarosa de la solución y el tiempo. La superficie de respuesta se muestra en la Fig. 2 y la ecuación que la representa es la siguiente:

$$PP = 4,8617 + 0,3411Csac + 27,4196 t + 0,032 Csac^2 + 0,2229 Csac * t - 6,2952 t^2 \quad (11)$$

Donde PP: pérdida de peso (%)
Csac: concentración de sacarosa (%)
t: tiempo

El modelo propuesto fue el cuadrático que para ambas variables estudiadas incluye un término lineal, otro cuadrático y uno correspondiente a las interacciones entre variables. Las variables con mayor coeficiente son las que influyen más significativamente sobre la pérdida de peso. En este caso es el tiempo. Los coeficientes lineales resultaron mayores que los cuadráticos en valor absoluto y la interacción (concentración de sacarosa y tiempo) exhibió un coeficiente menor que el obtenido por las variables analizadas de manera aislada (término lineal) y superior respecto del coeficiente del término cuadrático de la concentración de la sacarosa e inferior que el coeficiente del término cuadrático del tiempo (en valor absoluto).

El error relativo medio entre los datos experimentales y los valores predichos por la superficie de respuesta es de 0,29%.

A partir del gráfico se puede verificar que la pérdida de peso presenta un máximo alrededor de las dos horas de deshidratación para cualquier valor de concentración de sacarosa en la solución deshidratante y que el valor de este máximo se incrementa con el aumento en la concentración de sacarosa en la solución. Estas afirmaciones concuerdan con las anteriormente obtenidas.

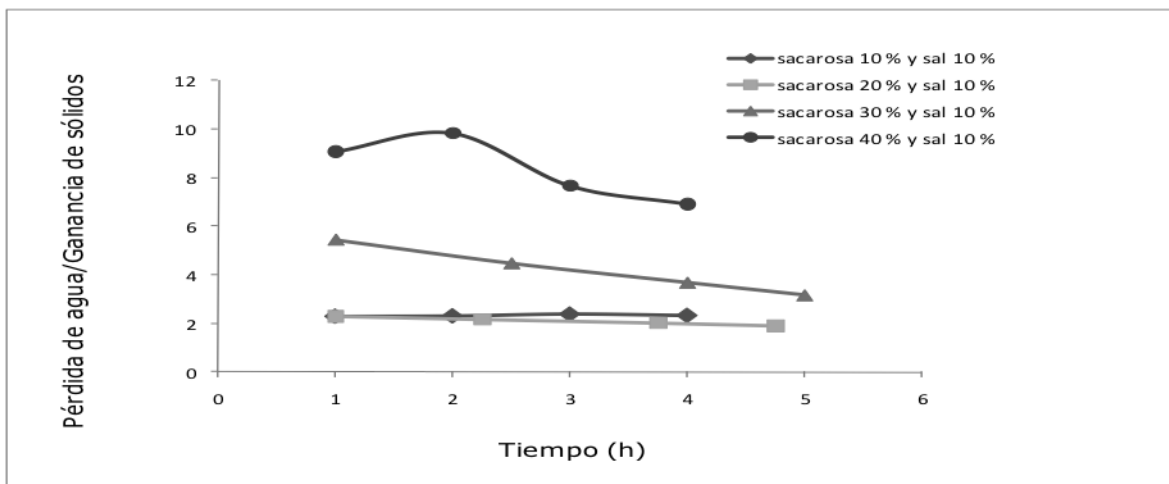


Fig. 3. Relación pérdida de agua a ganancia de solutos en función del tiempo para diferentes concentraciones de sacarosa en la solución deshidratante

Estudio de la relación pérdida de agua a ganancia de sólidos en función del tiempo para diferentes concentraciones de sacarosa en la solución

La eficiencia del proceso de deshidratación osmótica puede medirse analizando la relación entre la pérdida de agua y la ganancia de sólidos (PA/GS). En este proceso, teniendo en cuenta el material (papa), los solutos (azúcar y sal) y el uso propuesto es deseable maximizar la pérdida de agua y minimizar la ganancia de sólidos. Este objetivo se logra al maximizar la relación (PA/GS).

En la Fig. 3 se muestran los valores de estas relaciones en función del tiempo para las distintas concentraciones de sacarosa en la solución.

A concentraciones de sacarosa bajas (10% m/m y 20% m/m) en la solución, la relación PA/GS se mantiene prácticamente constante en el tiempo. Si analizamos las curvas, para una concentración en sacarosa del 30% m/m y del 40% m/m la relación presenta sus valores más altos en las primeras dos horas de deshidratación osmótica. En el caso de la concentración de sacarosa del 50 % m/m en la solución (no representada en el gráfico), la relación PA/GS aumenta y tiende a infinito a medida que el tiempo se incrementa ya que la ganancia de sólidos disminuye tendiendo a 0 para tiempo superiores a 2h. De esta manera se concluye que, la máxima eficiencia en la deshidratación

osmótica se presenta en las primeras dos horas de tratamiento para concentraciones de sacarosa en la solución (30% m/m-40% m/m) y concentración de sal de 10% m/m.

Modelado de la deshidratación osmótica

Modelos fenomenológicos que se basan en la segunda Ley de Fick de la difusión. Modelo de Crank. Determinación de los coeficientes de difusión

Para la estimación de los coeficientes de difusión para el transporte de agua y de sólidos solubles durante la deshidratación osmótica se aplicó la solución correspondiente a la 2ª ley de Fick, para el caso de geometría cúbica y se consideró que como el número de Fourier, $F_o = 3 D_{ew} t / a^2$ (transporte de agua) o $F_o = 3 D_{es} t / a^2$ (transporte de sólidos) es mayor a 0,1 sólo los primeros términos de la ecuación son significativos y los demás términos pueden despreciarse.

a) Determinación del coeficiente de difusión de agua de las papas para las condiciones de operación óptimas finales de deshidratación osmótica

Si se grafica el primer miembro de la ecuación simplificada (primer término de la ecuación general)

$$\ln \left[\frac{(H_t - H_e)}{H_0 - H_e} \right]$$

versus el tiempo de deshidratación, empleando los datos experimentales, se obtiene aproximadamente una recta.

En esa ecuación H representa el porcentaje de humedad y los subíndices t, 0 y e se refieren a las condiciones a un tiempo determinado, inicial y de equilibrio, respectivamente.

La Fig. 4 presenta los datos experimentales para las condiciones de operación finales, para las que la concentración de sacarosa en la solución es del 40 % m/m. La pendiente y la ordenada al origen de la recta de regresión son las siguientes:

$$\text{Pendiente} = -D_{ew} q_1^2 \frac{3}{a^2} \quad (12)$$

$$\text{Ordenada al origen} = 3 \ln C_1 \quad (13)$$

A partir de la ordenada al origen de la recta de regresión, se obtiene el valor de C_1 : 0,9965 y para un valor calculado de $\alpha=1080$ y despejando de la siguiente ecuación:

$$C_1 = \frac{2\alpha(1+\alpha)}{(1+\alpha+\alpha^2 q_1^2)} \quad (14)$$

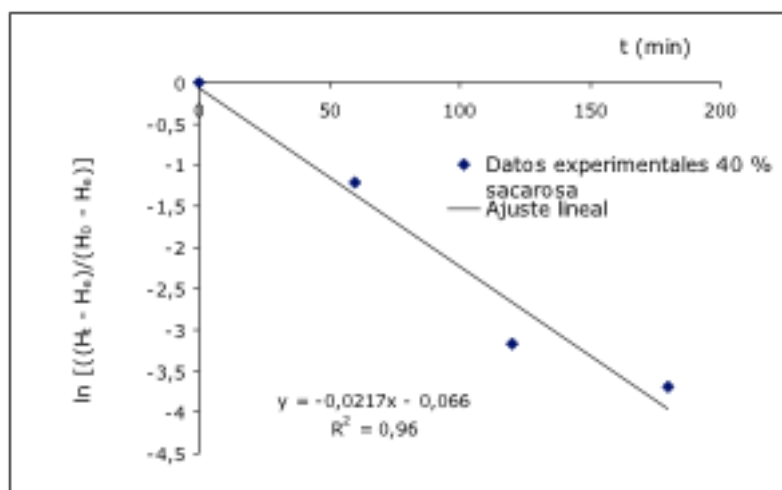


Fig. 4. Resultados experimentales y regresión lineal del modelo de Fick para la difusión del agua, en la deshidratación osmótica de papas en cubos de 1 cm de arista en solución de sacarosa 40% m/m, sal 10 % m/m, relación masa de solución a masa de papa: 4, temperatura: 40°C y nivel de agitación 120-130 rpm.

q_1 son las raíces positivas no nulas de la ecuación

$$\tan q_1 = -\alpha q_1$$

α es la relación entre el volumen de solución y el volumen del producto se obtiene $q_1^2 = 2,00$. Con este valor y el de $a =$ mitad del lado del cubo = 0,5 cm se reemplaza –en la ecuación de la pendiente, y se despeja el valor de D_{ew} .

El valor obtenido para las condiciones finales es: $D_{ew} = 1,32 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor es del orden del obtenido por Lenart y Flink (1984) en papas ($D_{ew} = 1,10 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) deshidratadas en solución de cloruro de sodio, 15% p/v y de sacarosa, 45 % p/v.

Asimismo se calcularon los valores de D_{ew} para las otras concentraciones de sacarosa (10 %, 20 %, 30 % y 50 %) consideradas en las experiencias.

Los valores del coeficiente de determinación se hallan en el rango de (0,83-0,99).

En la Tabla 1 se presentan los valores medios y las correspondientes desviaciones estándares de los coeficientes de difusión del agua, D_{ew} para distintas concentraciones de sacarosa en la solución. También se presentan los coeficientes de variación respectivos.

Solución Deshidratante	D_{ew} 1010 (m²/s)	CV (%)
10% sacarosa 10% sal	5,70 ± 0,35	6,1
20% sacarosa 10% sal	7,40 ± 0,13	1,8
30% sacarosa 10% sal	10,7 ± 0,90	8.4
40% sacarosa 10% sal	13.2 ± 1,60	12,1
50% sacarosa 10% sal	17,4 ± 1,80	10,3

Tabla 1. Valores medios y sus correspondientes desviaciones estándares de los coeficientes de difusión del agua, D_{ew} para distintas concentraciones de sacarosa y la misma concentración de sal 10% m/m en la solución

A partir de los resultados obtenidos se puede inferir que a medida que la concentración de sacarosa aumenta en la solución, en el rango de 10% m/m a 50% m/m, los valores de los coeficientes de difusión efectivos del agua incrementan presentando diferencias bastante significativas entre ellos. Esto podría atribuirse a que una mayor concentración de sacarosa en la solución aumenta la fuerza impulsora para la salida de agua desde el producto a la solución.

b) Determinación del coeficiente de difusión de sólidos para las condiciones óptimas finales de deshidratación osmótica calculadas

Los datos experimentales para la difusión de sólidos se trataron de manera similar que para la difusión de agua, aplicando la ecuación de Fick.

El coeficiente de difusión de los sólidos obtenido es de $3,12 \pm 0,63 \times 10^{-10}$ m²/s, inferior al coeficiente de difusión del agua, $13,2 \pm 1,60 \times 10^{-10}$ m²/s ya que a una concentración de sacarosa 40% m/m y 10% m/m de sal la difusión del agua resulta más significativa que la ganancia de soluto.

En el modelado matemático de la deshidratación osmótica se emplearon también otros

modelos del tipo empíricos como los de Peleg, Azuara, Hawkes y Flink y Raoult-Wack que ajustaron los datos experimentales de manera satisfactoria. No obstante, se considera que el modelo de Hawkes y Flink ajusta los valores experimentales mejor para tiempos cortos. Los modelos de Peleg, Azuara y Raoult Wack predijeron los valores de equilibrio para la humedad y la pérdida de agua de manera similar. Sin embargo se pudo apreciar un mejor ajuste a los datos experimentales de los modelos de Azuara y Raoult Wack. También se utilizaron modelos polinomiales cuyo ajuste fue apropiado para el caso de tercer grado. La discusión de estos modelos se presentaron en P. Della Rocca et al. Proyecciones Vol. 8, Nº 2, 2010.

Modelado del secado por Microondas

Las curvas experimentales de secado por microondas se ajustaron con distintos modelos matemáticos simples: lineal, exponencial, logarítmico, potencial y poli nómicos de grado 2, 3, 4 y 5. Los resultados se presentaron en

P. Della Rocca et al. Proyecciones Vol. 7, Nº 2, 2009.

Modelado del secado combinado

Luego de un pretratamiento con deshidratación osmótica de 1 hora (en las condiciones

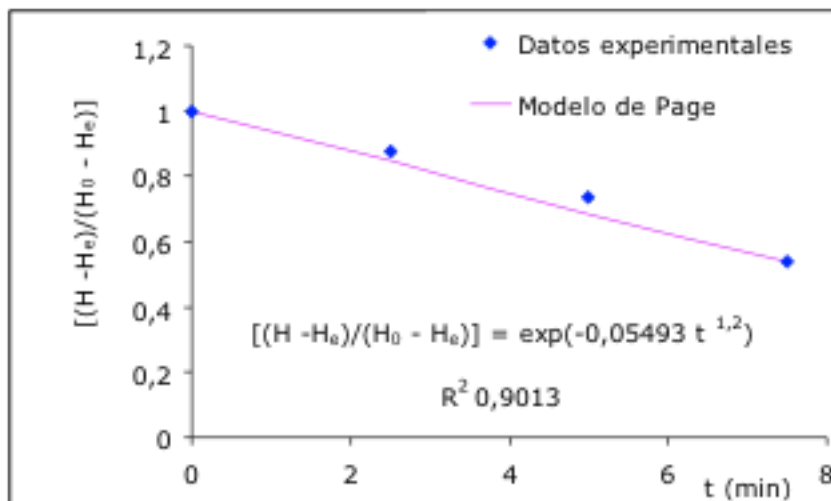


Fig. 5. Humedades del producto en función del tiempo durante el secado combinado (microondas, potencia 60% y convección con aire caliente) para papas pretratadas por deshidratación osmótica durante 1h en solución 40% m/m de xilitol y 5% m/m de sal y ajuste de los datos experimentales con el modelo de Page

citadas en Métodos) se evaluaron los resultados obtenidos con microondas y convección con aire caliente a distintas potencias 40, 50 y 60 % de la potencia máxima del horno de microondas (P. Della Rocca et al. Proyecciones Vol. 8, Nº 1, 2010.)

Los datos experimentales se ajustaron satisfactoriamente con expresiones polinómicas de tercer grado.

Los datos de las humedades de las papas durante el secado combinado (microondas a una potencia de 60 % y convección con aire caliente) en función del tiempo se ajustaron también con métodos empíricos. Entre ellos se aplicaron el modelo de Page, el de primer orden también llamado por algunos autores, de difusión, y otras expresiones exponenciales y polinómica. A continuación se muestra el ajuste del modelo de Page a los datos experimentales.

Modelo de Page: ecuación

$$\frac{H_1 - H_e}{H_0 - H_e} = \exp(-A t^B)$$

donde A y B son parámetros del modelo y los subíndices t, 0 y e se refieren a las condiciones a un tiempo determinado, inicial y de

equilibrio, respectivamente.

Los mejores ajustes se lograron con las expresiones exponenciales y polinómicas de segundo orden como puede apreciarse en las Figuras 6 y 7.

El modelo de difusión no ajustó satisfactoriamente los datos experimentales. El modelo de Page ajustó satisfactoriamente los datos a tiempos cortos $t \leq 7,5$ min y se obtuvo un coeficiente de determinación, R^2 de 0,9013. Las expresiones exponenciales y polinómicas de segundo grado permitieron un mejor ajuste, con coeficientes de determinación muy cercanos a 1 en ambos casos, y permitieron ajustar los datos experimentales en un rango de tiempo mayor (hasta 12,5 min)

Condiciones de operación y resultados obtenidos con el tratamiento seleccionado para el secado de las papas

Finalmente, el tratamiento de las papas consistió en la deshidratación osmótica durante 1h en una solución con 40% m/m de xilitol y 5% m/m de sal y las condiciones restantes iguales a las detalladas en el ítem Métodos). La pérdida de peso obtenida fue de aproximadamente del 40% y se alcanzó una humedad en el producto del 70% en base húmeda. Luego se continuó con el secado combinado de las pa-

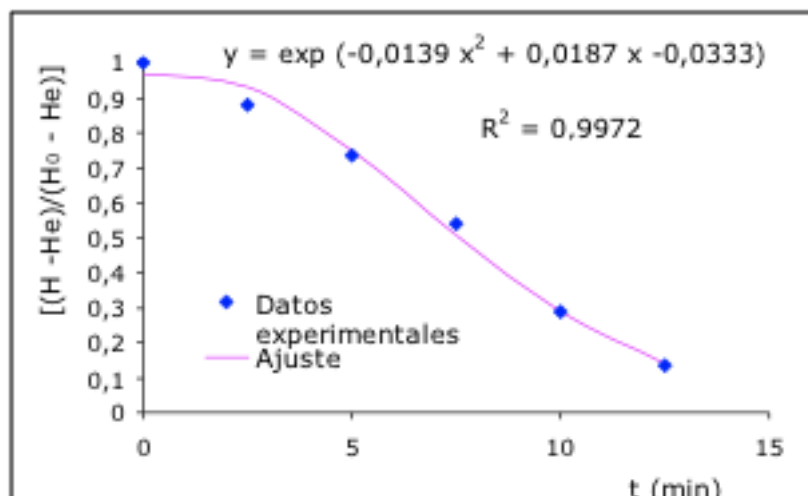


Fig. 6. Humedades del producto en función del tiempo durante el secado combinado (microondas, potencia 60% y convección con aire caliente) para papas pretratadas por deshidratación osmótica durante 1h en solución 40% m/m de xilitol y 5% m/m de sal y ajuste de los datos experimentales con expresión exponencial

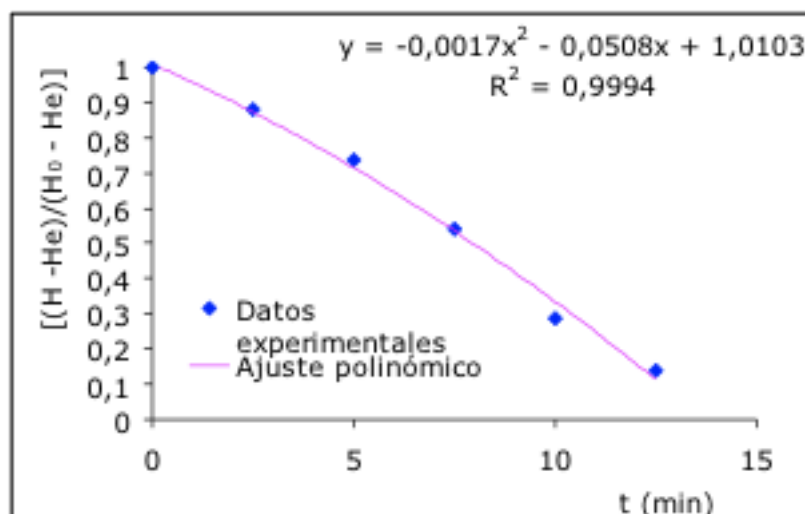


Fig. 7. Humedades del producto en función del tiempo durante el secado combinado (microondas, potencia 60% y convección con aire caliente) para papas pretratadas por deshidratación osmótica durante 1h en solución 40% m/m de xilitol y 5% m/m de sal y ajuste de los datos experimentales con expresión polinómica de segundo grado

pas (microondas y convección con aire caliente) durante 5 min con una potencia del 60% respecto de la máxima que puede suministrar el equipo. Al final de esta etapa se logró una pérdida de peso de alrededor del 60-65% y una humedad del producto en base húmeda del 50%.

En este trabajo se emplearon factores com-

binados de conservación con el objeto de aumentar la vida útil del alimento. Estos consistieron en: deshidratación osmótica durante 1h en solución al 40% de xilitol y 5% de sal y secado combinado (microondas y convección con aire caliente a una potencia de microondas del 60% de su potencia máxima), que reducen la actividad de agua, y un posterior envasado en atmósfera modificada (30% de

CO₂ y 70% de N₂) y refrigeración a 4°C.

Luego de 120 días de almacenamiento del producto en atmósfera modificada y conservación a 4°C no se detectó contaminación apreciable por los microorganismos típicos que se consideran para establecer la inocuidad de un alimento (CAA). Por lo tanto podemos considerar que el producto se mantuvo estable frente al deterioro microbiano en el lapso analizado. Los resultados se presentaron en R. Mateucci et al. *Proyecciones* Vol. 9, N° 1, 2011.

El estudio de las microestructuras de las papas sin tratar y tratadas permitió entender más sobre los distintos tratamientos térmicos

Conclusiones

Para el proceso de deshidratación osmótica, la solución de la 2ª Ley de Fick de la difusión para la transferencia de masa en estado no estacionario en el caso de geometría cúbica se utilizó para calcular los coeficientes de difusión efectivos. La importancia de este cálculo radica en que conociendo los coeficientes de difusión efectivos se puede predecir la humedad de las papas en cualquier instante de tiempo si se trabaja en condiciones experimentales similares. Los valores de difusividad efectiva del agua calculados para la deshidratación osmótica utilizando una solución de concentración 40% m/m de sacarosa y 10% m/m de sal fueron de $1,32 \pm 0,16 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ empleando el modelo de Fick.

Estos valores obtenidos fueron similares a los encontrados en la literatura. Se calcularon los coeficientes de difusión efectivos del agua para distintas concentraciones de sacarosa en la solución y se pudo concluir que el coeficiente aumenta a medida que se incrementa la concentración de los solutos en la solución. Es decir, aumenta al ser superior la fuerza impulsora (actividad acuosa) entre el alimento y la solución en que se halla inmerso. Asimismo se calculó el coeficiente de difusión efectivo de sólidos. El valor obtenido fue de $3,12 \pm 0,63 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ inferior al coeficiente de difusión del agua, $13,2 \pm 1,60 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ya que a una concentración de sacarosa de 40% m/m y 10 % m/m de sal, la difusión del agua resulta más significativa que la de sólidos.

En el modelado matemático de la deshidra-

tación osmótica se emplearon también otros modelos del tipo empíricos como los de Peleg, Azuara, Hawkes y Flink y Raoult-Wack que ajustaron los datos experimentales de manera satisfactoria. No obstante, se considera que el modelo de Hawkes y Flink ajusta los valores experimentales mejor para tiempos cortos. Los modelos de Peleg, Azuara y Raoult Wack predijeron los valores de equilibrio para la humedad y la pérdida de agua de manera similar. Sin embargo se pudo apreciar un mejor ajuste a los datos experimentales de los modelos de Azuara y Raoult Wack. También se utilizaron modelos polinomiales cuyo ajuste fue apropiado para el caso de tercer grado.

Por otra parte, en la etapa de secado combinado de las papas pretratadas con deshidratación osmótica en las condiciones anteriormente mencionadas se ajustaron los datos experimentales de manera favorable con expresiones polinómicas de tercer grado y se alcanzaron coeficientes de determinación muy cercanos a 1.

La deshidratación osmótica como pretratamiento antes del secado combinado contribuyó a impedir el deterioro de la estructura y la pérdida de aromas y sabores que se originarían en el producto si se sometiera a altas temperaturas como en el caso del tratamiento térmico empleando sólo secado convectivo. La deshidratación osmótica es un proceso eficiente desde el punto de vista energético

El secado combinado posterior al pretratamiento con deshidratación osmótica requiere condiciones menos severas que si se aplica únicamente el secado combinado

Los resultados y las conclusiones alcanzadas en esta tesis aportan información para el diseño de productos hortícolas mínimamente procesados y permiten predecir la tendencia de algunas variables (pérdida de agua, ganancia de sólidos) determinantes en la eficiencia del tratamiento pudiendo contribuir a optimizar las condiciones de proceso a escala industrial

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Secretaría de Ciencia y Técnica y al Departamento de Ingeniería Química de la FRBA por su contribución financiera que hicieron posible que esta tesis

pueda llevarse a cabo en las instalaciones de esta Facultad. También deseo expresar mi reconocimiento al Ing. Ricardo Mateucci por su colaboración en los ensayos microbiológicos, al

gerente de la empresa Rapi-vac, Werner Pablo Kähnlein que puso a mi disposición sus máquinas de envasado en atmósfera modificada.

Referencias

- AZUARA, E.; BERISTAIN, C.I. y GARCÍA, H.S., (1992) Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *International Journal of Food Science and Technology* 29 (4), 239-242.
- AZUARA, E.; BERISTAIN, C. I. y GUTIÉRREZ, G.F., (1998) A Method for continuous kinetic evaluation of osmotic dehydration. *Lebensmitt-Wissenschaft und-Technologie*, 31, 317-321.
- BIANCHI, M.; MILISENDA, P.; GUARNASCHELLI, A. y MASCHERONI, R.H., (2009) Modelado y simulación de procesos de congelación y dehidrocongelación de frutas, *Ingeniería Alimentaria* (83), pag. 52- 60.
- CRANK, J., (1975) *The mathematics of diffusion*, Second Edition, UK, Clarendon Press.
- DELLA ROCCA, P. y MASCHERONI, R. "Secado de papas por microondas" *Proyecciones*, Vol 7, N°2, 2009. Buenos Aires, FRBA.
- DELLA ROCCA, P. y GUTIERREZ, M.C., LANGUASCO, J.M. y MASCHERONI, R. "Secado combinado de papas" *Proyecciones*, Vol 8, N°1, 2010. Buenos Aires, FRBA.
- DELLA ROCCA, P. y MASCHERONI, R. "Modelado matemático del proceso de deshidratación osmótica utilizado como pretratamiento en el secado de papas" *Proyecciones*, Vol 8, N°2, 2010. Buenos Aires, FRBA.
- GIRALDO BEDOYA, D.; ARANGO VÉLEZ, L. y MÁRQUEZ CARDOZO, C., (2003) Osmodeshidratación de Mora de Castilla (*Rubus Glaucus Benth*) con tres agentes edulcorantes www.scielo.org.com
- HAWKES J. y FLINK J., (1978) Osmotic concentration of fruits slices prior to freeze dehydration. *J. Food Proc. Preserv.* 2, 265-284.
- MATEUCCI, R., DELLA ROCCA, P. y MASCHERONI, R. "Estudio microbiológico y estructural de papas deshidratadas por métodos combinados y envasadas en atmósfera modificada" *Proyecciones*, Vol 9, N°1, 2011. Buenos Aires, FRBA.
- MUJICA-PAZ, H.; VALDEZ-FRAGOSO, A.; LÓPEZ MALO, A.; PALOU, E. y WELTI-CHANES, J., (2003 a) Impregnation of some fruits at vacuum pressure. *Journal of Food Engineering* 56, 307-314.
- POINTING, J.D.; WATTERS, G.G.; FORREY, R.R.; JACKSON, R. y STANLEY, W.L., (1966) Osmotic dehydration of fruits, *Food Technology*, 20, 125.
- RAMALLO, L.; SCHVEZOV, C. y MASCHERONI, R., (2002) Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de ananá: un modelo matemático sencillo, tesis de maestría, Universidad Nacional de Misiones.
- RAOULT-WACK, A. L.; LAFONT, F.; RÍOS, G. y GUILBERT, S., (1989) Osmotic dehydration: Study of mass transfer in terms of engineering properties. En: Mujumdar, A.S. y Roques, M. (ED). *Drying '89*. New York, USA: Hemisphere Publ. Corp., 487-495.
- TORREGGIANI, D., (1993) Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International* 26: 59-68.