

# COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE TROZOS DE PIÑA POR LA TRANSFERENCIA DE MASA DEBIDA A LA IMPREGNACIÓN A VACÍO Y LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

Débora Castro\*<sup>1</sup>, Pedro Fito<sup>2</sup>, Amparo Chiralt<sup>3</sup>, Ana Andrés<sup>2</sup> y Ana Albors<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Finlay. Ave 27, No. 19805, La Habana, Cuba, CP 16017

<sup>2</sup>Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo, UPV, España.

<sup>3</sup>Departamento de Tecnología de Alimentos, UPV, España.

E-mail: dcastro@finlay.edu.cu

## RESUMEN

La impregnación a vacío (IV) y la deshidratación osmótica (DO) de la piña (var. Española Roja) se llevaron a cabo con solución de sacarosa. Esta variedad de piña presentó una baja porosidad tanto real (2 % v) como efectiva (4 % v) debido a la presencia de espacios intercelulares pequeños, llenos mayormente de líquido nativo y no de aire, teniendo lugar durante la IV un intercambio de líquido nativo por similar volumen de solución (aproximadamente 6 % del volumen inicial de fruta), lo cual fue confirmado por criomicroscopía electrónica de barrido. La fruta además, tuvo una deformación (incremento de volumen) de 2 % durante la etapa de aplicación de vacío y no recuperó su volumen inicial después de restablecida la presión atmosférica. La IV podría resultar eficaz para inducir muy rápidamente cambios composicionales en la piña con la posibilidad de introducirle ingredientes funcionales, así como también para acelerar la transferencia de materia en la DO, esto último fue comprobado también por microscopía en las muestras de DO a vacío pulsante, donde hubo mayor avance de la impregnación (frente de perturbación) que en las de DO a presión atmosférica.

**Palabras claves:** piña, impregnación a vacío, deshidratación osmótica, cambios estructurales.

## ABSTRACT

**Structural behavior of pineapple pieces by the mass transference due to vacuum impregnation and osmotic dehydration**

Vacuum impregnation (VI) and osmotic dehydration (OD) of the pineapple (var. Red Spanish) were carried out with sucrose solution. This variety showed a low porosity either real (2% v) or effective (4% v) due to the presence of small intracellular spaces, which were filled of native liquid rather than air. During VI there was an exchange of native liquid by a similar volume of solution (approximately 6% of the initial volume of the fruit) and it was confirmed by scanning electronic cryomicroscopy. The fruit also suffered an increase of volume (2%) during vacuum application and it did not recover its initial volume when the atmospheric pressure was restored VI may be effective to induce rapidly compositional changes in the pineapple, allowing the introduction of functional ingredients, at the same time it may accelerate the mass transference in OD. The latter was also confirmed by microscopy in the samples of OD at pulsing vacuum, where there was a higher advance of impregnation (perturbation front) than in samples of OD at atmospheric pressure.

**Key words:** pineapple, vacuum impregnation, osmotic dehydration, structural changes.

\*Débora Castro Espín: Ingeniera Química (ISPJAE, 1982). Investigador Auxiliar: Doctora en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (Universidad Politécnica de Valencia, 1999) con más de 20 años de experiencia en investigaciones básicas y aplicadas al desarrollo de procesos y productos para la industria cubana de procesamiento de frutas y vegetales y de asistencia, asesoría y servicios a esta.

## INTRODUCCIÓN

Los avances en el control de la deshidratación osmótica (DO) en las dos últimas décadas, han abierto un nuevo camino para la optimización del proceso y el desarrollo de nuevas aplicaciones. Dentro de estos avances se destaca el descubrimiento y modelación del mecanismo hidrodinámico (MHD) (1,2) como un mecanismo de transferencia de masa no difusional que tiene lugar en sistemas alimento sólido-líquido, que es responsable de la penetración e impregnación de una solución dentro de la estructura porosa del alimento cuando se somete a presiones de vacío por breves períodos de tiempo.

Debido a los cambios estructurales que produce el MHD, se ha caracterizado el comportamiento macro y micro estructural de diferentes alimentos frente a este (3) para su potencial aplicación industrial en lo que pudiera constituir un nuevo proceso u operación unitaria, la impregnación a vacío de alimentos (IVA) con diferentes líquidos o soluciones, en la obtención de una gama ilimitada de nuevos productos funcionales (4). Además, el MHD y la IVA han contribuido a una mejor comprensión científica y a aplicaciones de la DO al vacío (DOV), así como a la propuesta de una modalidad más económica, la DO a vacío pulsante (DOVP), en ambas se combinan mecanismos difusionales de transferencia de masa con el MHD (1, 2,5-8). El aporte de este trabajo fue la caracterización macro y micro estructural de trozos de piña y de su comportamiento frente a la IV, así como de los cambios micro estructurales que provoca la DO a presión atmosférica y a vacío-pulsante en el tejido de esta fruta.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las piñas var. Española Roja fueron seleccionadas por su calibre y estado de madurez uniformes y adecuado para el procesamiento (sólidos solubles de 12,3 °BRIX y pH de 3,51), peladas y cortadas longitudinalmente, troceadas en picadora mecánica en octavos, obteniéndose pequeños trozos de forma semitriangular de aproximadamente 7,5 mm de espesor.

## Caracterización macroestructural de la piña fresca:

Consistió en la determinación de la densidad aparente ( $\rho_a$ ) y la densidad real ( $\rho_r$ ). La primera es la que corresponde a la muestra intacta, a los trozos de piña que contienen aire ocluido en los poros. Como densidad real se consideró la que presenta el producto una vez eliminado el aire de los poros. Para ello la muestra fue sometida a vacío después de triturada. En ambos casos la determinación de la densidad se realizó por desplazamiento de volumen, utilizando para ello un picnómetro de sólidos. A partir de las densidades aparente y real se determinó la porosidad real ( $\varepsilon_r$ ) de la fruta según la siguiente expresión:

$$\varepsilon_r = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r}$$

## Caracterización microestructural:

Para la observación microscópica de la fruta, se cortaron muestras del tejido en sentido perpendicular a la interfase de la muestra. La técnica empleada fue la criomicroscopía electrónica de barrido (Cryo-SEM), utilizando un microscopio JEOL JSM-5410. Antes de realizar las observaciones microscópicas, la muestra se criofijó con el fin de estabilizar e inmovilizar la estructura, para lo cual se introdujo en la cámara el portamuestras con el corte del tejido y se congeló por inmersión en nitrógeno *slush* (nitrógeno subenfriado, punto de congelación de -210 °C), luego fue trasladada, sin romper el vacío, hasta la criocámara del microscopio donde fue fracturada, sublimada y metalizada con cubierta de oro. La fractura se utilizó para exponer la organización interna de células y tejidos sin alterarse por efecto del corte. La temperatura durante toda la sesión fue mantenida por debajo de -150 °C. Además, una trampa de frío (-180 °C) situada por encima de la criocámara redujo la contaminación de la superficie debido a que su temperatura es más baja que la de la fruta y capta cualquier humedad que pueda producirse.

### **Comportamiento macroestructural de la piña frente a la impregnación a vacío:**

Consistió en la determinación de su porosidad eficaz o efectiva ( $E_e$ ), así como en la cuantificación de la impregnación ( $X_t$ ) y la deformación ( $\gamma_t$ ) de la muestra.

Con el fin de evitar la presencia de mecanismos de transferencia de masa diferentes al MHD, se utilizó una solución isotónica de sacarosa, o sea, de la misma  $a_w$  que la fruta a temperatura ambiente y con el sistema piña:solución se procedió de la siguiente forma: Aplicación de 5 a 10 min de presiones menores de 40 kPa + restablecimiento de la presión atmosférica teniendo lugar el MHD + 5 a 10 min a presión atmosférica. Las experiencias se llevaron a cabo según metodología y equipamiento a escala piloto diseñados para este fin (3).

Con esta instalación fue posible cuantificar la fracción volumétrica de solución que impregna la muestra debido al MHD ( $X_t$ ) y la deformación que los gradientes de presión impuestos pueden ocasionar en la misma ( $\gamma_t$ ), midiendo las variaciones de peso que experimenta la muestra para el cálculo de  $X_t$  y las variaciones del empuje que ésta ejerce en cada momento para el cálculo de ( $\gamma_t$ ). Con estos datos y la presión de vacío aplicada, se calculó la porosidad eficaz de los trozos de piña, que es la fracción volumétrica de poros que se comunican con la interfase sólido:líquido y por tanto con posibilidades de ser impregnados por la solución debido al MHD.

### **Comportamiento microestructural:**

Para la observación de los cambios microestructurales producidos en la fruta por la impregnación a vacío, la muestra se secó con papel absorbente, realizándose un corte en sentido perpendicular a la interfase, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente en la fruta fresca.

### **Cambios microestructurales provocados en la piña por la DO**

Desarrollo de perfiles: Se siguió el mismo procedimiento descrito, realizando además un barrido para observar el tejido de todo el semiespesor desde la interfase has-

ta el plano central y las diferencias entre muestras de dos tratamientos osmóticos, correspondientes a presión atmosférica y 40 °C durante 1 h y vacío pulsante (presión de vacío de 6 kPa durante 5 y 55 min a presión atmosférica) igualmente a 40 °C durante 1 h, ambos con solución osmótica de sacarosa a 65 °BRIX.

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Es de destacar el bajo valor de porosidad real que se obtuvo en la piña ( $2,0 \pm 1,3$  %) en comparación con frutas que han sido muy estudiadas como por ej. la manzana (9) que posee más de 20 % de porosidad real, así como una densidad aparente menor que la piña (de aproximadamente  $800$  vs.  $1030$  kg/m<sup>3</sup>). La pequeña diferencia entre la densidad real ( $1050$  kg/m<sup>3</sup>) y aparente en la piña corrobora la baja cantidad de aire que posee el tejido de la piña en los espacios intercelulares.

La Fig. 1 refleja una imagen de la microestructura de la piña. La interpretación de las micrografías obtenidas por Cryo-SEM se realizó sobre la base de lo descrito (10) para manzana fresca. Según estos autores las regiones brillantes corresponden a la membrana plasmática, a la pared celular y a la disolución crioconcentrada (solutos + agua) del jugo celular, que queda en estado vítreo durante la congelación ultrarápida de la muestra. Las regiones oscuras corresponden a los huecos que dejan los microcristales de hielo al sublimar. De este modo las regiones del tejido con residuo vítreo (agua + soluto) aparecen con una apariencia dentífrica después de la sublimación superficial del hielo.

Puede observarse en la misma figura la heterogeneidad del tejido de la piña, con células de tamaño muy variado debido a la presencia de haces vasculares, que son muy abundantes en el tejido parenquimático de la piña. Las células presentan una forma más poliédrica que redondeada y un alto grado de empaquetamiento que deja entre ellas espacios intercelulares pequeños, los cuales en su mayoría están llenos de líquido nativo. Esta característica del tejido de la piña justifica su baja porosidad determinada experimentalmente y estos estudios demuestran la utilidad de la criomicroscopía sobre la base del aspecto distintivo que presenta el tejido

de diferentes frutas frescas, así como su comparación con las frutas impregnadas, por ejemplo en manzana fresca se ha observado que a diferencia de la piña, los espacios intercelulares son grandes (células menos empaquetadas) y casi no contienen líquido nativo sino aire (9).

La cinética de impregnación a vacío y el MHD tienen lugar muy rápidamente, equilibrándose en tiempos muy cortos las presiones del sistema. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos.

El valor negativo de impregnación durante la etapa de vacío ( $X_1$ ) indica pérdida de líquido nativo por parte del producto debido a la expansión del gas, que lo arrastra y comparado con otras frutas, esta puede considerarse una pérdida de líquido nativo importante. La presencia de poros llenos de líquido que justifica estos valores de  $X_1$  se constató en los resultados de Cryo-SEM anteriores. Asimismo, durante el tiempo de vacío se produce una deformación-expansión de la muestra como indica el valor positivo de  $\gamma_1$ , este aumento de volumen es también producido por la expansión del gas ocluido en los poros.

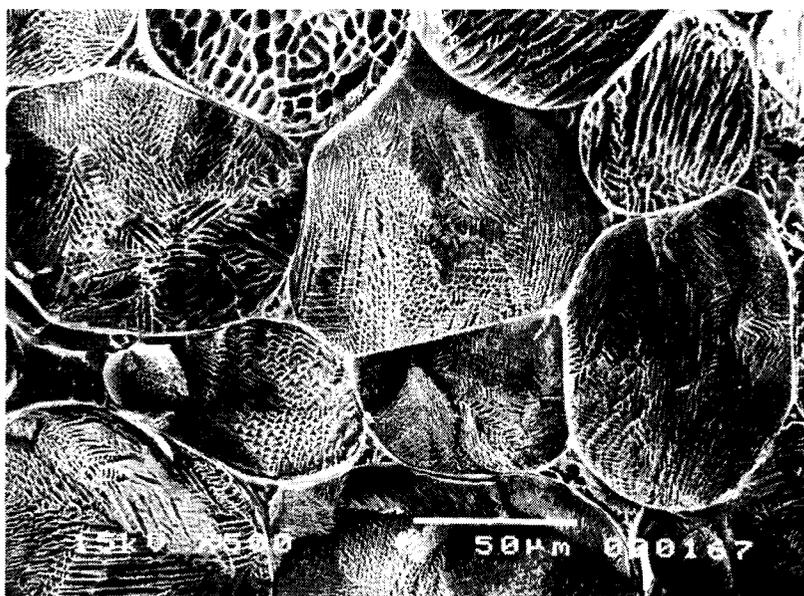


Fig. 1. Imagen microscópica del tejido de la piña fresca.

Tabla 1. Valores promedios de impregnación ( $X$ ), deformación ( $\gamma$ ) y porosidad eficaz ( $\epsilon_e$ )

$X_1$	e.s.	$\gamma_1$	e.s.	$X$	e.s.	$\gamma$	e.s.	$\epsilon_e$	e.s.
-6,5	0,6	1,8	0,4	5,7	0,8	2,3	0,4	3,7	1,3

El restablecimiento de la presión atmosférica permite la penetración del líquido acoplada a una deformación-relajación de la matriz sólida debido al cambio de presión. Los valores de impregnación neta ( $X$ ) obtenidos en la piña, son similares a los valores de líquido nativo extraído durante la etapa de vacío ( $X_1$ ). Esto implica que el tratamiento a vacío ha dado lugar principalmente a un intercambio de líquido nativo por solución de impregnación y no de aire por solución de impregnación. A pesar de que el nivel de impregnación conseguido no es mayor que la cantidad de líquido nativo extraído, la IV de la piña resultaría eficaz tanto desde el punto de vista de la introducción de distintos ingredientes funcionales (principios activos, nutrientes, crioprotectores, conservantes, etc.), como para acelerar la transferencia de materia, por ejemplo en la deshidratación osmótica (DO) debido a que incrementa la superficie de intercambio de la fruta con la solución osmótica al llenarse los poros con dicha solución.

Se presenta además una deformación residual neta ( $\gamma$ ) que pone de manifiesto que la estructura no recupera su volumen inicial a pesar de la compresión del gas una vez restablecida la presión atmosférica, puesto que el valor de  $\gamma$  no se diferencia significativamente del de  $\gamma_1$ . Es de destacar el bajo valor de porosidad eficaz ( $E_e$ ) de esta variedad de piña comparada también con la manzana que es de 17 a 20 % (9). La Fig. 2 muestra una imagen Cryo-SEM de la piña impregnada con solución isotónica. La piña impregnada presenta un aspecto muy similar al de la fresca (Fig. 1) de manera que prácticamente no pueden distinguirse. Estas observaciones confirman los resultados anteriores, con relación a los valores de impregnación, en el sentido en que tiene lugar un intercambio no de aire, sino de líquido nativo de los poros de la fruta por solución isotónica externa.

Los fenómenos de transferencia de masa provocan la aparición de un perfil de concentraciones de agua y soluto en la muestra, el cual se extiende desde la interfase hasta interior, existiendo una zona interna de la muestra donde las concentraciones no difieren de la concentración inicial (fruta fresca). La distancia desde la interfase fruta:solución hasta el límite que separa la zona con perfil de concentraciones, de la

zona inalterada, es el llamado "frente de perturbación". Las observaciones por crío-microscopía electrónica de barrido permitieron constatar la existencia de estas dos zonas (con perfil desarrollado y no desarrollado, esto último correspondiente al tejido intacto) en la microestructura del tejido de muestras recién deshidratadas de piña y la visualización del frente de perturbación.

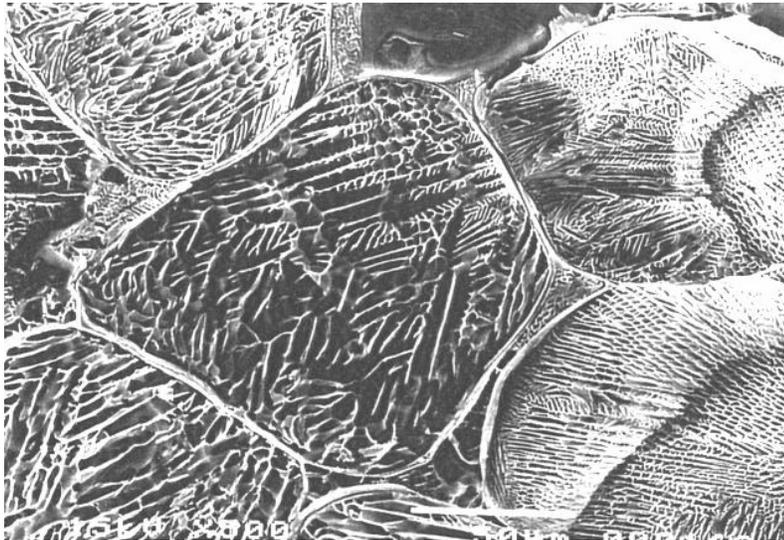
La composición (empalmes) de micrografías a lo largo del semiespesor de las muestras, para los tratamientos atmosférico y vacío pulsante, permitió su observación desde la interfase hacia el interior de las muestras, visualizándose primero una zona de aspecto compacto, donde no es observable la apariencia dentrificada, y después una segunda zona donde el tejido celular presenta un aspecto similar al de la muestra fresca. La ausencia de formaciones dentrificadas en la primera zona se debe a la alta concentración de azúcar de la fracción líquida celular. A alta concentración de solutos, el enfriamiento ultra rápido provoca la vitrificación completa de la fracción líquida de estas células, con lo cual no se forman microcristales de hielo o su tamaño no es observable al microscopio.

La Fig. 3 presenta una micrografía amplificada tomada aproximadamente a 0,5 mm de la interfase del tratamiento a vacío pulsante, donde se puede apreciar la completa vitrificación de la fracción líquida, la plasmolisis celular y la deformación de las paredes celulares. La micrografía de la muestra deshidratada a presión atmosférica fue muy similar a esa distancia. El grado de vitrificación y alteración celular va decreciendo a medida que se avanza desde la interfase hacia el interior de la muestra.

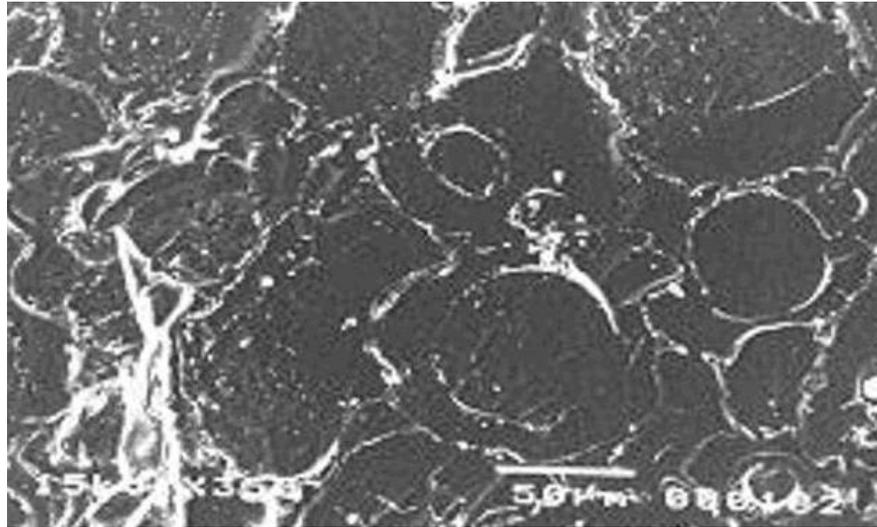
La Fig. 4 presenta a 1,7 mm de la interfase y a mayor aumento, el tejido de la muestra deshidratada a vacío pulsante. Se puede observar en la imagen alteración celular y plasmolisis. Sin embargo, a esta misma distancia de la interfase, la muestra a presión atmosférica presentó un aspecto celular completamente inalterado, como en la fruta fresca. Esto refleja un avance superior del frente de perturbación por efecto de la impregnación con solución osmótica, en la deshidratación a vacío pulsante que a presión atmosférica. No obstante la per-

turbación en el tratamiento a VP no se extiende mucho más hacia el interior de la muestra y a 3 mm de profundidad, no se observó en esta alteración celular.

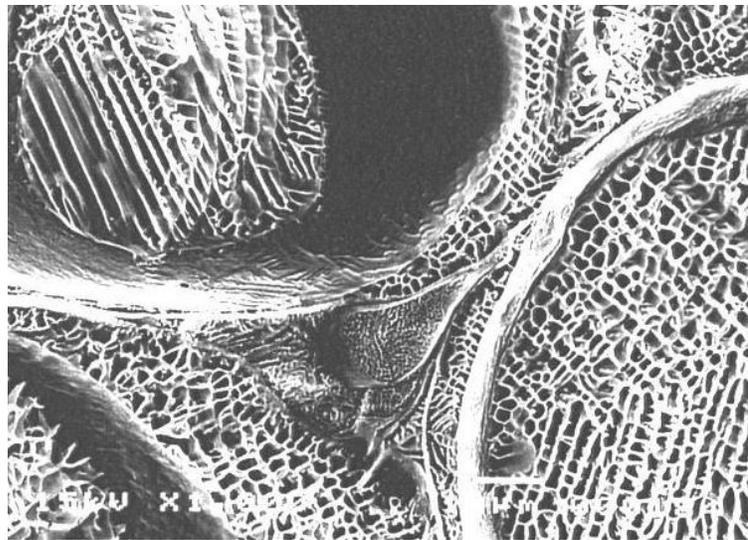
Estos resultados son coherentes con el comportamiento de las muestras durante un tiempo corto de deshidratación y con una pequeña proporción de poros, donde los más externos son inundados por la solución osmótica llevando el frente de perturbación ligeramente más adentro del tejido a vacío pulsante que a presión atmosférica.



**Fig. 2. Piña impregnada con solución isotónica de sacarosa.**



**Fig. 3.** Piña deshidratada osmóticamente a vacío pulsante (1 h y 40 °C) a aproximadamente 0,5 mm de la interfase.



**Fig. 4.** Piña deshidratada osmóticamente a vacío pulsante (1 h y 40 °C) a aproximadamente 1,7 mm de la interfase.

## CONCLUSIONES

La piña var. Española Roja presentó una baja porosidad real (2 % v) y efectiva (4 % v) debido a la presencia de espacios intercelulares pequeños, llenos mayormente de líquido nativo y no de aire, teniendo lugar durante la impregnación a vacío un intercambio de líquido nativo por solución de aproximadamente 6 % referido al volumen inicial de fruta, lo cual fue confirmado por microscopía electrónica. La impregnación a vacío de piña podría resultar eficaz para inducir muy rápidamente cambios composicionales en esta, introduciendo soluciones de diferentes concentraciones de azúcares o de ingredientes funcionales, así como para acelerar la transferencia de materia durante la DO, lo cual fue comprobado también por microscopía en la DOVP en comparación con DO a presión atmosférica.

## REFERENCIAS

1. Fito, P. y Pastor, R. J. Food Sci. 21: 513-519, 1994.
2. Fito, P. J. Food Eng. 22: 313-328, 1994.
3. Andrés, A. Impregnación a vacío en alimentos porosos. Aplicación al salado de quesos (tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia) 1995.
4. Betoret, N. Aplicación de algunas técnicas de Ingeniería de Alimentos en el desarrollo de alimentos naturales enriquecidos (tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia) 2002.
5. Pereira, L.; Rodríguez, A.; Sarantopoulos, C.; Junqueira, V.; Cunha, R. y Hubinger, M. J. Food Sci. 69: 172-177, 2004.
6. Castro, D. Procesamiento mínimo de piña por deshidratación osmótica (tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia) 1999.
7. Castro, D.; Barat, J. y Fito, P. Energy evaluation of Pineapple Osmotic Dehydration. Proceedings of EFFOST -Intrafood Conference 2005, Elsevier, 25-28 Oct, Valencia, 2005.
8. Castro, D.; Fito, P.; Panadés, G.; Banguela, S.; Paz, M. y de Hombre, R. Process for obtaining a traditional product in conjunction with a new product: Yoghurt with minimally processed pineapple pieces. Proc. EFFOST- Intrafood Conference 2005, Elsevier, 25-28 Oct, Valencia, 2005.
9. Martínez-Monzó, J.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. y Fito, P. Mechanical and structural changes in apple (var. Granny Smith) due to vacuum impregnation with cryoprotectant agents. En: IFT Annual Meeting Abstracts. Orlando, 59 D-9, 1997.
10. Bomben, J. y King, C. J. Food Technol. 17: 615-632, 1982.