

Proyecciones, Vol.11 No. 1, Abril de 2013

# Estudio comparativo de la congelación de papa (*Solanum tuberosum* L.) sometida a diferentes pretratamientos.

Patricia A. Della Rocca<sup>1</sup>, Luis Alberto Roche<sup>2</sup>, Rodolfo H. Mascheroni<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Química, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> CIDCA, Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología, (CONICET La Plata y Universidad de La Plata), Calle 47 y 116, La Plata (B1900AJJ), Pcia. de Buenos Aires, Argentina

Recibido el 18 de Febrero de 2013, aprobado el 13 de Marzo de 2013

## Resumen

Se estudió la historia térmica del proceso de congelación de papas frescas y pretratadas por los siguientes tratamientos: deshidratación osmótica, por escaldado y posterior microondas y deshidratación osmótica seguida de microondas. Las papas pretratadas disminuyen su contenido de agua durante los diferentes procesos y por consiguiente, el posterior proceso de congelación requiere tiempos de congelación menores y de esta manera se pueden lograr ahorros energéticos importantes. Los tiempos de congelación se estimaron muy satisfactoriamente aplicando la ecuación de Salvadori-Mascheroni y se compararon con los experimentales. Los errores son inferiores al 8%. Las papas pretratadas por deshidratación osmótica y microondas exhibieron un tiempo de congelación 9 minutos inferior al de las papas frescas.

**PALABRAS CLAVE:** CONGELACIÓN - OSMODEHIDROCONGELACIÓN - PAPA

## Abstract

The thermal history of freezing fresh and pre-treated potatoes was studied by the following treatments: osmotic dehydration, scald and later microwave and osmotic dehydration followed by microwave. Pre-treated potatoes reduce its water content during the different processes and therefore the subsequent process of freezing requires lower freezing times and in this way, significant energy savings can be achieved. The freezing times were estimated very satisfactorily by applying the equation of Salvadori - Mascheroni and were compared with the experimental ones. The errors are lower than 8%. Pre-treated potatoes by osmodehydration and then microwave exhibit a freezing time 9 minutes lower than the fresh potatoes one.

**KEYWORDS:** FREEZING - OSMODEHYDROFREEZING - POTATO

## Introducción

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento de la papa sometida a diferentes tratamientos antes de la congelación (deshidratación osmótica, escaldado y secado por microondas en tiempos cortos, secado combinado de papa por deshidratación osmótica y posterior secado con microondas). En todos los casos, se analizaron y compararon los diferentes tiempos de congelación necesarios para alcanzar una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  en el centro térmico del producto. Estos pretratamientos pretenden generalmente mejorar su aspecto en cuanto a sus características organolépticas y calidad luego del proceso de congelación y ahorrar en costos energéticos de refrigeración y transporte al disminuir su contenido de agua. Como se menciona precedentemente, los pretratamientos consisten en algunos casos en la deshidratación osmótica que permite preservar las características de aroma, sabor del alimento, y que evitan dañar su textura, si se lo compara con otros tratamientos más agresivos como los secados por convección en aire caliente a altas temperaturas. Cuando se combina una etapa inicial de deshidratación osmótica con una posterior congelación, al proceso total se lo denomina, osmodehidrocongelación. Las ventajas principales que ofrece este procesamiento respecto de la congelación tradicional son:

1. Obtención de un producto de mejor calidad.
2. Elaboración de productos con características especiales al poder adicionar durante la deshidratación osmótica diversos componentes que puedan otorgar aromas, sabores o fortificar el producto.
3. Ahorro en los costos finales (energéticos, de transporte, de almacenamiento, de empaque, etc.).

Una deshidratación parcial previa como la deshidratación osmótica logra disminuir la cantidad de agua que se solidificará en el proceso de congelación. Esto conduce a un menor daño de la estructura y a la obtención de una mejor calidad final. Asimismo, existe un importante ahorro de energía por menor carga térmica y una mayor facilidad en el manejo de los productos debido a un menor volumen de producto, ahorro en el uso de embalajes, disminución

del espacio requerido en almacenes y vehículos de transporte. (Garrote et al., 1989; Forni et al., 1990; Torregiani, 1993; Robbers et al., 1997; Spiazzi et al. 1998, Marani et al., 2007).

La energía consumida en una deshidratación osmótica a  $40^{\circ}\text{C}$ , considerando la reconcentración de la solución (jarabe) por evaporación, es por lo menos dos veces inferior a la consumida en el proceso de secado por convección de aire caliente a  $70^{\circ}\text{C}$  para alcanzar la misma humedad final del producto (Lenart y Lewicki, 1988). Por consiguiente, un ahorro energético significativo se puede alcanzar realizando una deshidratación osmótica como pre-tratamiento antes de la congelación, dependiendo de la humedad final alcanzada (Huxsoll, 1982).

El escaldado es un tratamiento térmico que tiene por finalidad destruir las enzimas susceptibles de alterar las verduras y las frutas. Estas modificaciones pueden presentarse como cambios en el aroma, en el color (degradación de la clorofila, pardeamiento en manzanas, etc.). Este pretratamiento se puede llevar a cabo en agua caliente o con vapor. Por lo general, en el primer caso se consume una tonelada de agua por tonelada de producto escaldado y en el segundo caso 0,2 a 0,3 toneladas de vapor por tonelada de producto, aproximadamente. También se debe considerar que el gasto energético del escaldado no es despreciable y que se producen pérdidas de algunas sustancias hidrosolubles como proteínas, azúcares, minerales y vitaminas, disminuyendo de esta manera el valor nutritivo del producto. Asimismo, las aguas de escaldado generan una importante cantidad de efluentes en la fábrica.

Si bien la actividad enzimática está muy reducida si congelamos luego el producto a  $-18^{\circ}\text{C}$ , sin embargo es necesario un almacenamiento a  $-40^{\circ}\text{C}$  para lograr el cese total de la actividad enzimática. Por ello para ahorrar en energía de congelación se continúa escaldando el producto y congelando el producto a  $-18^{\circ}\text{C}$ .

En cuanto a las pérdidas de vitaminas hidrosolubles se comprobó que las pérdidas que se producen por el lavado de las mismas pueden limitarse ya que con este tratamiento se inhiben las enzimas responsables de la destrucción de algunas de ellas. Según Poulsen (1986), en las habas conservadas durante 12 meses a  $-20^{\circ}\text{C}$  se perdía un 90% de la vitamina C, un 70% de

la vitamina B1 y un 40% de la vitamina B2 en el caso que se congelaran sin escaldarlas previamente. Sin embargo, las pérdidas eran del 50%, 20% y 3%, respectivamente cuando las habas eran escaldadas antes de la congelación ya que se inhibían las enzimas que colaboraban en su destrucción.

La utilización posterior del secado por microondas al pretratamiento de deshidratación osmótica intentó obtener un producto con menor contenido de agua para luego congelar.

No se trató solamente con microondas porque la finalidad fue obtener un producto con mínimas alteraciones en su calidad final. Se procuró de evitar las modificaciones en la forma y la textura y estructura no uniforme, los cambios de sabor y aroma, la modificación del color y

la degradación de componentes nutricionales, entre otros.

El objetivo del uso de métodos combinados de secado se centra en la mejora de la calidad caracterizada por una mínima degradación química y de cambios de estructura y de textura, mínima variación de sabor y aroma y obtención del color deseado junto con un control preciso del contenido de humedad.

La utilización de bajas temperaturas es uno de los métodos más antiguos de conservación de alimentos. Al solidificarse el agua contenida en el alimento por descenso de la temperatura deja de estar disponible para las reacciones químicas y bioquímicas que deterioran los alimentos. El efecto combinado de la baja temperatura y la disminución de actividad de agua

<b>Producto</b>	<b>Contenido de agua (% m/m)</b>	<b>Temperatura inicial de congelación (°C)</b>
Jugo de manzanas	87,2	-1,44
Concentrado de jugo de manzanas	49,8	-11,53
Salsa de manzanas	82,8	-1,67
Espárragos	92,6	-0,67
Zanahorias	87,5	-1,11
Jugo de cerezas	86,7	-1,44
Jugo de uvas	84,7	-1,78
Cebollas	85,5	-1,44
Jugo de naranjas	89	-1,17
Duraznos	85,1	-1,56
Peras	83,8	-1,61
Ciruelas	80,3	-2,28
Moras	82,7	-1,22
Jugo de moras	88,5	-1,22
Espinacas	90,2	-0,56
Frutillas	89,3	-0,89
Jugo de frutillas	91,7	-0,89
Pulpa de tomates	92,9	-0,72

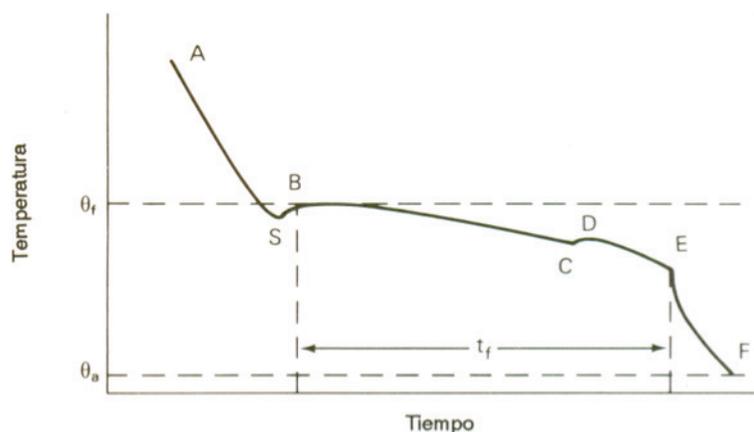
**Tabla 1. Contenido de humedad y temperatura inicial de congelación de diferentes productos alimenticios**

ocasionan la inhibición parcial o total del crecimiento y actividad de microorganismos, la actividad metabólica de los tejidos animales o vegetales luego del sacrificio o la recolección y las reacciones enzimáticas y químicas de deterioro. Durante el proceso de congelación se produce un descenso de la temperatura del alimento por debajo de su temperatura de congelación. La misma es inferior a la temperatura de congelación del agua de 0°C ya que los solutos que integran el alimento descienden la temperatura de congelación de la solución. Esta se halla entre -2°C y -5°C, aproximadamente, dependiendo del tipo de alimento considerado. En la Tabla 1 se presentan algunos alimentos y sus temperaturas de congelación características.

La congelación implica la eliminación del calor sensible del alimento para bajar la temperatura a la temperatura inicial de congelación y del calor latente asociado al cambio de fase del agua líquida a hielo. La determinación del calor a extraer, carga calórica, es importante ya que de ello dependerá la potencia que deberá tener la instalación. Debido a la inmovilización del agua por efecto de la formación de cristales de hielo, el agua no se encuentra disponible para las reacciones de deterioro mencionadas anteriormente. En alimentos vegetales congelados es muy importante que alcancen la maduración antes de ser sometidos al proceso de congelación ya que deben ser consumidos luego de la descongelación. La calidad de un alimento congelado no sólo depende del proceso de congelación sino también de la calidad del producto a congelar. La disminución de la temperatura por debajo de la temperatura de congelación provoca

la aparición de núcleos para solidificarse. El número y la distribución de cristales formados dependen de la velocidad de congelación. Existen dos tipos de nucleación: la homogénea, cuando se orientan al azar las moléculas de agua para formar el cristal y la heterogénea cuando los núcleos se forman sobre partículas en suspensión o sobre la pared celular del alimento. Esta última es la más común en los alimentos y es la que se produce durante el subenfriamiento, punto S en la curva de la Figura 1. La velocidad de nucleación es fuertemente dependiente del subenfriamiento, que es la fuerza impulsora. A mayor subenfriamiento mayor será la velocidad de nucleación por unidad de volumen del sistema. A muy altos valores de subenfriamiento, la velocidad de nucleación decrece debido a un aumento de la viscosidad del fluido y a una consecuente inhibición de la movilidad molecular.

En un alimento, la interacción del agua con los solutos presentes produce la depresión del punto inicial de congelación. Además, la cristalización del hielo ocasiona una progresiva concentración de la solución que permanece no congelada. Por consiguiente, a medida que más hielo se forma, aumenta la concentración en sólidos de la solución no congelada y su viscosidad y se reduce, por lo tanto, su punto de congelación. La meseta de cambio de estado que se presenta en la típica curva de solidificación del agua se ve perturbada y aparece en su lugar una zona con el descenso progresivo del punto de congelación, en realidad se observa una pseudo meseta. En las curvas de congelación, en las que generalmente se estudia la evolución de la temperatura del centro térmico, punto que



**Fig. 1. Evolución de la temperatura en el centro térmico con el tiempo durante el proceso de congelación**

se congela más tarde, en función del tiempo, se distinguen las siguientes partes:

**Primer tramo AS:** el alimento se enfría por debajo de su punto de congelación, siempre inferior a 0°C, temperatura de congelación del agua. En el punto S el agua se halla a una temperatura inferior al punto de congelación y ésta todavía se encuentra en estado líquido. A este fenómeno se lo conoce con el nombre de subenfriamiento. El tiempo correspondiente a este tramo se denomina tiempo de pre-enfriamiento.

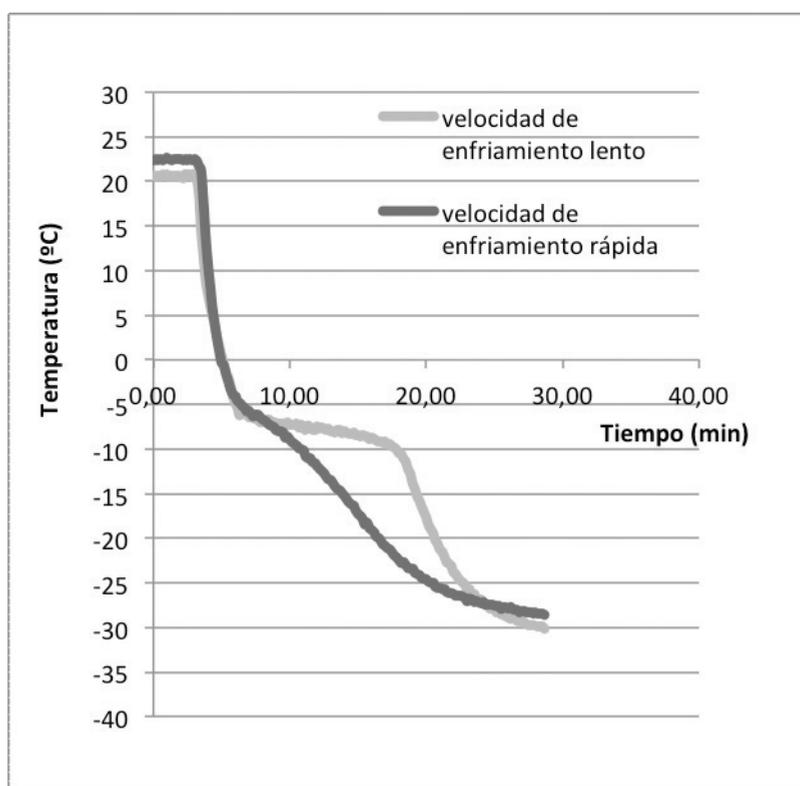
**Segundo tramo SB:** la temperatura aumenta rápidamente hasta alcanzar el punto de inicial de congelación, ya que al formarse los primeros cristales de hielo se libera el calor latente de congelación a una velocidad superior a la que se extrae el calor del alimento. El subenfriamiento se produce más extensivamente cerca de la superficie del sistema que se congela y a veces no se detecta si el enfriamiento es lento y el sensor de temperatura se ubica profundamente en el sistema.

**Tercer tramo BE:** en éste el calor latente se elimina y se forma el hielo. El incremento de la

concentración de solutos en la fracción de agua no congelada provoca un descenso en el punto de congelación y la temperatura desciende ligeramente. En esta etapa se forma la mayor cantidad de hielo. El tiempo total  $t_f$ , correspondiente a la pseudo-meseta de congelación depende de la velocidad a la que se extrae el calor. A velocidades más altas de congelación esta pseudo-meseta se reduce como puede observarse en la Figura 2.

**Cuarto tramo EF:** la temperatura del alimento continúa descendiendo hasta alcanzar la temperatura del congelador. El tiempo involucrado en esta etapa es el denominado tiempo de atemperado.

La velocidad de congelación determina la distribución de los cristales en los tejidos. Cuando la congelación es lenta, los primeros cristales que se forman son grandes y aparecen principalmente en el exterior de las células. Estos pueden provocar compresión mecánica aplastando las células. En la congelación rápida aparecen muchos pequeños cristales tanto en el interior como en el exterior de las células y el tejido es menos dañado. Es por ello que los tejidos con-



**Fig. 2. Curvas típicas de congelación a distintas velocidades**

gelados rápidamente liberan menos exudados que los congelados lentamente cuyos tejidos se desorganizan y degradan.

El volumen de hielo es un 9% superior al del agua líquida, por lo tanto, es esperable que durante la congelación del alimento se produzca una dilatación.

El proceso de ultracongelación o supercongelación se aplica a aquellos productos que se congelan con un descenso de temperatura de 5°C por minuto aproximadamente en el centro del alimento, punto crítico, y se prolonga hasta alcanzar una temperatura en el mismo de -18°C. Posteriormente son almacenados a temperaturas inferiores a -18°C.

La congelación es un proceso complejo que consta de las siguientes etapas:

1. Enfriamiento y subenfriamiento de la muestra
2. Nucleación, formación de los núcleos de cristales
3. Crecimiento de los núcleos de cristal formados
4. Enfriamiento posterior del material congelado hasta la temperatura final.

Las instalaciones de congelación se pueden clasificar en:

- Sistemas de refrigeración mecánicos en los que el refrigerante es evaporado y comprimido en un circuito cerrado. Los congeladores mecánicos por lo general utilizan como medio de congelación el aire enfriado o superficies frías.
- Sistemas criogénicos. Los congeladores criogénicos emplean anhídrido carbónico o nitrógeno líquido que entran en contacto directo con el alimento.

En ambos tipos de instalaciones, el funcionamiento puede ser continuo o discontinuo.

Equipo de congelación por contacto con aire: el aire fluye a través del alimento absorbiendo energía del mismo, y de esta manera el producto se enfría. Según cómo sea la velocidad del aire y su temperatura, el equipo puede refrigerar o congelar el producto.

En los sistemas de refrigeración mecánicos los componentes típicos son el evaporador, el com-

presor, el condensador, la válvula de expansión y el refrigerante. En el evaporador, el refrigerante se evapora a presión reducida, absorbiendo energía del aire que extrae calor de los productos a congelar. La temperatura se regula mediante un termostato. El vapor que deja el evaporador se sobrecalienta y luego pasa al compresor donde se aumenta su presión y temperatura. La compresión debe llevarse a cabo en la región seca ya que el líquido en forma de gotas puede erosionar las válvulas del compresor y puede disminuir la efectividad de lubricación del mismo. Posteriormente, el refrigerante es conducido al condensador donde la presión se mantiene constante mientras dura la condensación y deja el mismo como líquido subenfriado. El refrigerante líquido atraviesa la válvula de expansión que trabaja isoentálpicamente y reduce la presión a la correspondiente a la presión del evaporador para iniciar el ciclo nuevamente. El medio de enfriamiento en los sistemas de refrigeración mecánicos puede estar constituido por aire, agua o una superficie metálica. Las cámaras de refrigeración por aire cuando el mismo tiene circulación forzada presentan coeficientes de transmisión de calor bastante elevados, tal el caso de los túneles de congelación. Las propiedades más importantes de los refrigerantes deben ser las siguientes:

1. Bajo punto de ebullición y elevado calor latente de vaporización para poder extraer la mayor cantidad de energía
2. Baja toxicidad
3. Alta densidad de vapor para disminuir el tamaño del compresor
4. Baja inflamabilidad
5. Bajo costo
6. Baja miscibilidad con el aceite en el compresor

### **Estimación del tiempo de congelación**

El conocimiento del tiempo de congelación es muy importante para el diseño del proceso de congelación ya que puede convertirse en el tiempo de residencia del producto en el equipo y además se relaciona con la velocidad de refrigeración. Los factores que determinan la velocidad de refrigeración son:

- Temperatura del medio refrigerante
- Coeficiente efectivo de transferencia de calor
- Forma y tamaño del producto
- Propiedades físicas del sistema

- Otros (temperaturas inicial y final, humedad relativa)

Generalmente, se emplean dos métodos para la predicción de tiempos de congelación: los numéricos y los aproximados. Los métodos numéricos se basan en la siguiente ecuación diferencial en estado no estacionario para un sistema multidimensional y su solución:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $c_p$  el calor específico,  $k$  la conductividad térmica,  $t$  el tiempo y  $T$  la temperatura.

Se requiere información detallada de la variación de las propiedades térmicas: calor específico, densidad y conductividad térmica, en función de la temperatura y la posición. La solución de la precedente ecuación permite evaluar los perfiles de temperatura en el sistema durante la congelación, a través del conocimiento de la historia térmica en cada punto del sistema y su dependencia con las condiciones operativas del proceso representadas por la temperatura inicial, temperatura del medio refrigerante, tamaño característico del alimento, coeficiente de transferencia calórico que involucra características del medio refrigerante, tipo de equipo de congelación, presencia de embalaje, etc. Todo ello lleva a establecer, el tiempo de congelación del alimento (Zaritzky, 2002).

En la resolución numérica de la ecuación diferencial se emplean elementos finitos, diferencias finitas o volúmenes de control. Las diferencias finitas es un método satisfactorio en geometrías regulares mientras que los elementos finitos son más eficientes cuando se trata de geometrías irregulares.

Las soluciones aproximadas basadas en suposiciones simplificadoras fueron aplicadas por varios investigadores: Plank, Pham, Neumann, Cleland y Earle y Salvadori- Mascheroni.

El tiempo de congelación es aproximadamente proporcional a la inversa de la diferencia entre la temperatura inicial ( $T_i$ ) y la del refrigerante ( $T_a$ ) (o sea a  $1/(T_i - T_a)$ ).

Siempre que se baje la temperatura del refrigerante disminuirá proporcionalmente el tiempo

de proceso de congelación.

En congelación industrial de alimentos hay dos clasificaciones en cuanto a la temperatura de refrigerante (Mascheroni, 2000):

- En refrigeración mecánica la temperatura alcanzable en condiciones económicamente favorables es del orden de  $-40^\circ\text{C}$ .
- En refrigeración criogénica la temperatura está determinada por la de evaporación del refrigerante empleado (aproximadamente  $-79^\circ\text{C}$  para el  $\text{CO}_2$  y  $-179^\circ\text{C}$  para el  $\text{N}_2$ ).

Al haber variación continua de las propiedades térmicas en el rango de temperaturas de congelación no existe una solución analítica exacta del problema en la cual basarse para obtener el método aproximado. Generalmente se parte de soluciones exactas para problemas simplificados (propiedades constantes) o se hacen regresiones de datos teóricos y/o experimentales en un amplio rango de condiciones.

Salvadori y Mascheroni (1991) han desarrollado un método aproximado simple y muy preciso para el cálculo de los tiempos de congelación y descongelación de alimentos de formas regulares. El método cuenta con la ventaja de no requerir valores de propiedades térmicas del producto congelado ni del cálculo de la entalpía efectiva del cambio de fase.

Para estimar el tiempo de congelación la fórmula de cálculo propuesta para una geometría de placa plana infinita es:

$$t_{c,pl} = \frac{L^2}{\alpha} (a T_c + b) \left( \frac{1}{Bi} + c \right) \left| (1 + T_i)^n (-T_a - 1)^m \right| \quad (2)$$

donde  $\alpha$  es la difusividad térmica del producto sin congelar  $L$  es el semiespesor de la placa en  $m$ ,  $T_i$  es la temperatura inicial,  $T_a$  es la temperatura del refrigerante y  $T_c$  la temperatura final a alcanzar en el centro térmico (generalmente  $-10^\circ\text{C}$  o  $-18^\circ\text{C}$ ) expresadas todas en  $^\circ\text{C}$ . Las constantes, empíricas, dependen de la geometría. Para placa plana infinita  $a = -1.272$ ;  $b = 65.489$ ;  $c = 0.184$ ;  $n = 0.096$  y  $m = 1.070$ . Las condiciones de aplicación son:  $2^\circ\text{C} \leq T_i < 25^\circ\text{C}$ ,  $-45^\circ\text{C} \leq T_a \leq -25^\circ\text{C}$  y  $1 \leq Bi \leq 50$ . El

número de Biot,  $Bi$ , es un número adimensional que relaciona la resistencia interna del producto con la resistencia externa a la transferencia de energía y cuya expresión es:

$$Bi = h L/k \quad (3)$$

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor expresado en  $W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$  y  $k$  es la conductividad térmica del producto expresada en  $W/(m \text{ } ^\circ C)$ .

La difusividad térmica está dada por la relación:

$$\alpha = k/ \rho \text{ } cp \quad (4)$$

siendo  $\rho$  y  $cp$ , la densidad en  $kg/m^3$  y el calor específico del alimento en  $J/(kg \text{ } ^\circ C)$ , respectivamente.

Para tener en cuenta la influencia de la forma de los alimentos multidimensionales en ambos tiempos de proceso se han utilizado distintos tipos de factores de forma.

Cleland y Earle (1982) han desarrollado varias versiones de los mismos. La más ampliamente utilizada, debida a Cleland et al. (1987) es la siguiente:

$$t_c = \frac{t_{c,pl}}{E} \quad (5)$$

donde  $t_{c,pl}$  es el tiempo de congelación de una placa plana y  $E$  es el factor de forma o número equivalente de dimensiones de transferencia de calor, que relaciona el tiempo de congelación de una placa al tiempo de congelación de un objeto cualquiera de igual dimensión característica, ambos expuestos a las mismas condiciones.

Para una placa infinita  $E=1$ , para un cilindro infinito  $E=2$  y para una esfera  $E=3$ , independientemente del valor del número de Biot. Para el caso de un cubo se calcula el valor que resulta  $E = 3$ .

Para objetos de otras formas  $E$  se calcula según:

$$E = G_1 + G_2 E_1 + G_3 E_2 \quad (6)$$

donde  $E_1$  y  $E_2$  dependen de las relaciones de tamaño  $\beta_1: L_2/L_1$  y  $\beta_2: L_3/L_1$  ( $L_1, L_2$  y  $L_3$  son los lados o diámetros del contenedor ( $L_1 < L_2 < L_3$ )) y del número de Biot. y los factores  $G_1, G_2$  y  $G_3$  son constantes que dependen de la geo-

metría (Salvadori et al., 1996, Salvadori et al., 1997).

El cálculo del tiempo de descongelación se realiza de manera similar, tomando como base el tiempo de descongelación correspondiente a placa plana infinita y utilizando los mismos factores de forma (Salvadori y Mascheroni, 1996).

$$t_{d,pl} = \frac{L^2}{\alpha} (a Tc + b) \left( \frac{1}{Bi} + c \right) (-1 - Ti)^n (Ta + 1)^m \quad (7)$$

En la ecuación anterior  $t_{d,pl}$  es el tiempo de descongelación de una placa plana, y las constantes empíricas correspondientes valen:  $a = 0,321$ ;  $b = 23,637$ ;  $c = 0,435$ ;  $n = 0,099$  y  $m = 0,763$ .

El tiempo de descongelación de un cuerpo multidimensional se calcula efectuando el cociente entre el tiempo correspondiente a placa plana y el factor de forma calculado igual que en el caso de congelación.

El tiempo total calculado con la ecuación de Salvadori y Mascheroni tiene en cuenta los tiempos empleados en cada etapa:

$$t_{total} = t_p + t_f + t_a \quad (8)$$

donde  $t_p$  es el tiempo de preenfriamiento correspondiente al tramo AB de la Figura 1,  $t_f$  es el tiempo de congelación donde se produce la mayor formación de hielo que corresponde al tramo BE de la figura citada y  $t_a$  es el tiempo de atemperado que sería el que transcurre entre el final de la etapa anterior y el tiempo final total del proceso que en la industria se considera generalmente cuando se alcanza una temperatura de  $-18^\circ C$  en el centro del alimento y en las actividades de investigación  $-30^\circ C$ , tramo EF de la mencionada figura.

## Parte experimental

### Materiales

La papa (nombre científico: *Solanum tuberosum*) es una especie perteneciente a la familia de las Solanáceas, originaria de América del Sur y cultivada en todo el mundo por sus tubérculos comestibles. Existen miles de variedades con grandes diferencias de tamaño, forma, color, textura, cualidades y sabor. La variedad

Componente	Porcentaje
Humedad	79,35 ± 5,09
Proteínas	1,20 ± 0,20
Grasas	0,35 ± 0,05
Cenizas	0,90 ± 0,49
Fibras	1,22 ± 0,50
Carbohidratos	15,9 ± 1,91
Azúcares Reductores	0,31 ± 0,12

**Tabla 2. Composición química de la papa, variedad Spunta**

que se usó en este trabajo es la Spunta, con propiedades muy buenas para hervir o asar y de gran consumo en nuestro país. Se caracteriza por tener los tubérculos de forma oval y alargados, piel suave, carne amarilla, tamaño grande a muy grande, rendimiento muy alto y madurez semi temprana.

En la Tabla 2 se presenta la composición química de la papa, variedad Spunta (Basuny et al., 2009)

Las papas se cortaron en cubos de 1 cm de arista.

### Métodos

En el proceso de congelación se utilizó un túnel de congelación a escala piloto con bandejas en su interior, el cual permite alcanzar condiciones operativas similares a las de la industria. Se registró la temperatura en función del tiempo de las papas sometidas a los distintos tratamientos colocándose en el centro térmico (centro de los cubos) una termocupla. El coeficiente de transferencia calórico del equipo de congelación es de 20 W/(m<sup>2</sup> °C).

En todos los casos, la congelación se llevó a cabo desde una temperatura ambiente de 20 °C hasta una temperatura de congelación en el centro térmico de -18°C y una temperatura del aire de -35°C. Las papas recibieron distintos pretratamientos antes de su congelación:

**Pretratamiento 1** (Papa fresca), sin tratamiento previo.

**Pretratamiento 2 (DO)** se realizó la osmo-deshidratación de las papas en las condiciones operativas a continuación informadas.

### Condiciones operativas de la osmodeshidratación:

Concentración de sacarosa: 40 % m/m  
 Concentración de sal: 5 % m/m  
 Temperatura: 40°C  
 Relación masa de solución a masa de papa: 4  
 Tamaño de cubos (arista: 1 cm)  
 Nivel de agitación: 120-110 rpm  
 Tiempo: 1 h

**Pretratamiento 3 (Escaldado + MO)**, las papas fueron escaldadas a 85°C durante 5 min en agua caliente y luego secadas en microondas a una potencia de microondas del 60 % de la potencia máxima del equipo durante 5 minutos.

**Pretratamiento 4 (DO+ MO)**, se realizó el pretratamiento osmótico de las papas como en la experiencia 2 y luego el secado con microondas a una potencia de microondas del 60% de la potencia máxima del equipo durante 5 minutos.

La estimación de los tiempos de congelación se realizó aplicando la ecuación de Salvadori-Mascheroni.

Los errores en la estimación de los tiempos de congelación se calcularon mediante la siguiente ecuación:

$$Error = \frac{Valor\ experimental - Valor\ teórico}{Valor\ teórico} \quad (9)$$

Se utilizaron las correlaciones de Choi y Okos para estimar las propiedades de la papa fresca y deshidratada que correlacionan las mismas con la composición del producto y su temperatura.

El calor específico en J/kg K como una función de la temperatura en °C para los distintos componentes de un alimento se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$cp_p = 2008,2 + 1208,9 \cdot 10^{-3} T - 1312,9 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (10)$$

$$cp_g = 1984,2 + 1473,3 \cdot 10^{-3} T - 4800,8 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (11)$$

$$cp_c = 1548,8 + 1962,5 \cdot 10^{-3} T - 5939,9 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (12)$$

$$cp_f = 1845,9 + 1930,6 \cdot 10^{-3} T - 4650,9 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (13)$$

$$cp_{ce} = 1092,6 + 1889,6 \cdot 10^{-3} T - 3681,7 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (14)$$

$$cp_a = 4176,2 - 9,0862 \cdot 10^{-5} T - 5473,1 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (15)$$

Luego, el calor específico del alimento se calcula teniendo en cuenta los aportes de cada uno de sus componentes que lo integran, haciendo uso de la fracción másica, X

$$cp_{alim} = X_p cp_p + X_g cp_g + X_c cp_c + X_f cp_f + X_{ce} cp_{ce} + X_a cp_a \quad (16)$$

La densidad en kg/m<sup>3</sup> para cada componente se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\rho_a = 997,18 + 3,1439 \cdot 10^{-3} T - 3,7574 \cdot 10^{-3} T^2 \quad (17)$$

$$\rho_p = 1329,9 - 0,51814 T \quad (18)$$

$$\rho_g = 925,59 - 0,4157 T \quad (19)$$

$$\rho_c = 1599,1 - 0,31046 T \quad (20)$$

$$\rho_f = 1311,5 - 0,36589 T \quad (21)$$

$$\rho_{ce} = 2423,8 - 0,28063 T \quad (22)$$

$$\rho_{alim} = \frac{1}{\sum \left( \frac{x_i}{\rho_i} \right)} \quad (23)$$

La conductividad térmica del alimento en W/(m K) se estima como la suma de los productos de las conductividades térmicas de cada componente y su respectiva fracción volumétrica  $x_{vi}$ . Las ecuaciones se detallan a continuación:

$$k_a = 0,57109 + 1,7625 \cdot 10^{-3} T - 6,7306 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (24)$$

$$k_p = 0,1788 + 1,1958 \cdot 10^{-3} T - 2,7178 T^2 \quad (25)$$

$$k_g = 0,1807 - 2,7604 \cdot 10^{-3} T - 1,7749 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (26)$$

$$k_c = 0,2014 + 1,3874 \cdot 10^{-3} T - 4,3312 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (27)$$

$$k_f = 0,18331 + 1,2497 \cdot 10^{-3} T - 3,1683 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (28)$$

$$k_{ce} = 0,3296 + 1,401 \cdot 10^{-3} T - 2,9069 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (29)$$

$$k_{alim} = \sum k_i x_{vi} \quad (30)$$

$$x_{vi} = \frac{x_i \rho}{\rho_i} \quad (31)$$

Subíndices  
 alim= alimento  
 p= proteínas  
 g=grasas  
 c=carbohidratos  
 f=fibras  
 ce=cenizas  
 a=agua  
 i= cada componente  
 vi= volumétrica

La fracción de agua no congelada a una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  se estimó mediante la ecuación de Bartlett (1944)

$$\ln X = \frac{L}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (32)$$

L: calor latente de fusión del agua: 6003 J/mol  
 R: constante de los gases perfectos: 8,314 J/(mol K)  
 To: temperatura de la fusión del agua (273 K)  
 X: fracción molar del agua no congelada

Siendo E el contenido de agua no congelada del producto y S el contenido en extracto seco soluble de un peso molecular equivalente, M. La ecuación para calcular E es:

$$E = \frac{18 S X}{M (1-X)} \quad (33)$$

El contenido de hielo del producto, G se calcula:

$$G = W - E \quad (34)$$

W: humedad en base húmeda  
 También se empleó la ecuación de Tchigeov (1979), relación empírica que permite estimar la fracción másica de hielo, según la ecuación:

$$G = W \left[ \frac{1,105}{1 + \frac{0,7138}{\ln(Tic-T+1)}} \right] \quad (35)$$

Tic: temperatura inicial de congelación ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 T: temperatura a la que se desea calcular la fracción másica de hielo ( $^{\circ}\text{C}$ )

Fikin (1996) comprobó que esta ecuación es aplicable a una gran variedad de alimentos y provee una exactitud bastante satisfactoria

La temperatura de inicio de congelación se determinó considerando que la papa, como todo tejido vegetal, se puede considerar como una solución de extracto seco soluble en agua. Teniendo en cuenta que al principio de la congelación, un tejido biológico se puede comportar como una solución diluida al que se le puede aplicar la Ley de Raoult, la siguiente ecuación puede utilizarse para calcular aproximadamente la temperatura inicial de congelación, Tic.

$$Tic = -kw \frac{C}{M} (^{\circ}\text{C}) \quad (36)$$

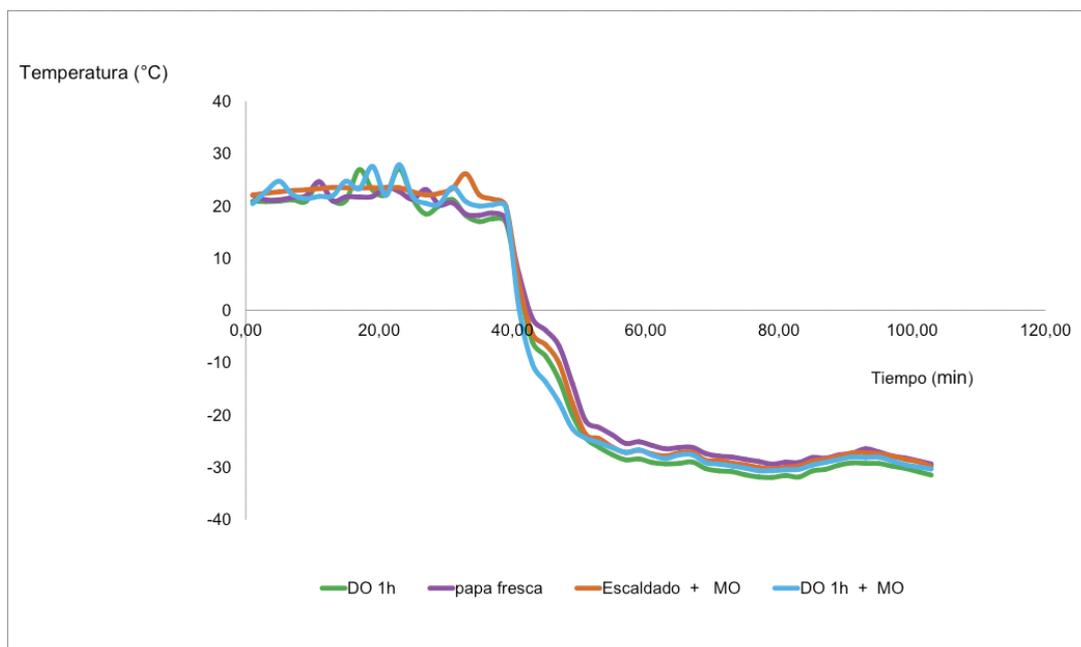
kw: constante criogénica del agua : 18,6 en CGS  
 C: masa de soluto en g disuelta en 100 g de agua  
 M: peso molecular del soluto

## Resultados y análisis

### Tiempos de congelación

En la Figura 3 se presentan las curvas de temperatura en función del tiempo durante la congelación para las papas sometidas a los distintos tratamientos descriptos en las experiencias detalladas en Materiales. A partir de las mismas se puede apreciar que la papa fresca de mayor contenido de humedad 84 % que las tratadas tarda más tiempo en alcanzar la temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  en el centro térmico. Los tiempos experimentales para los distintos tratamientos se presentan en la Tabla 2. El menor de los tiempos se registró para el tratamiento por deshidratación osmótica y secado posterior por microonda (DO+MO), ya que la humedad final es de 48 %. La papa con tratamiento de deshidratación osmótica cuya humedad es de 61 % (intermedia a las otras humedades mencionadas precedentemente) presenta un tiempo intermedio entre la papa fresca y la tratada con DO+MO, correspondiente con su humedad.

La ecuación de Salvadori-Mascheroni predijo los tiempos de congelación de manera muy precisa. Los valores de tiempo calculados tienen un error del 4 % y del 14 % para las muestras frescas y las tratadas por deshidratación osmótica, respectivamente, respecto de los valores de tiempo experimentales.



**Fig. 3. Curvas de congelación (temperatura en función del tiempo) para las papas frescas y tratadas con los tratamientos DO, Escaldado + MO y DO + MO**

Tratamiento	Tiempo experimental (min)	Tiempo calculado (min)
Papa Fresca	19	18,97
DO 1h	16,60	15,36
Escaldado + MO	12	-
DO + MO	10	-

**Tabla 3. Tiempos experimentales y calculados para las papas frescas y las sometidas a los distintos tratamientos**

**No se calcularon los tiempos para los dos últimos tratamientos porque no se tenían los valores de las propiedades de la papa luego de los mismos.**

Las propiedades de la papa fresca y deshidratada osmóticamente calculadas con la ecuación de Choi y Okos se presentan en la Tabla 4. Las mismas fueron utilizadas para predecir los tiempos de congelación.

Los errores fueron de 0,2 % y 8 %, en los casos de papa fresca y deshidratada osmóticamente, respectivamente.

Muestra	cp (J/(kg K))	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	k (W/(mK))
<b>Papa Fresca</b>	<b>3700,5</b>	<b>1064</b>	<b>0,552</b>
<b>Papa deshidratada (DO)</b>	<b>3157,4</b>	<b>1162</b>	<b>0,490</b>

**Tabla 4. Propiedades de la papa fresca y deshidratada osmóticamente calculadas con la ecuación de Choi y Okos**

<b>Humedad (%)</b>	<b>Hielo (%)</b>	<b>Agua no congelada (%)</b>	<b>Ecuación</b>
84	78,90	5,10	Bartlett
84	74,00	10,00	Tchigeov

**Tabla 5. Hielo formado y agua no congelada a -18 °C**

### Porcentaje de agua sin congelar a -18°C

Se estimó con la ecuación de Bartlett el porcentaje de agua sin congelar a la temperatura de -18°C. A la temperatura inicial de congelación no se ha formado hielo en cantidad apreciable,. Entonces, se calcula la fracción molar de agua no congelada cuyo valor es de 0,9877. Luego se calcula la masa molecular equivalente del extracto seco que resultó de 275,32 kg/kmol. Finalmente, se calcula la fracción de agua no congelada a -18°C. Los valores calculados con las ecuaciones de Bartlett y Tchigeov se presentan en la Tabla 5

### Temperatura inicial de congelación

La temperatura inicial de congelación calculada para la papa fresca, sin tratamiento, es de -1,286°C y la obtenida experimentalmente a partir de la curva de congelación de -1,27°C. Se calculó un error relativo de 1,2 % en valor absoluto.

### Conclusiones

La papa tratada térmicamente antes de su congelación, reduce su contenido en agua y por ello, disminuye su tiempo de congelación y entonces se reduce la carga de congelación, requiriéndose equipos de menor potencia y logrando por consiguiente un ahorro energético.

Los tiempos de congelación se pueden calcular muy precisamente por la ecuación de Salvadori-Mascheroni que cabe resaltar presenta la ventaja de no necesitar valores de las propiedades térmicas del alimento congelado ni del cálculo de la entalpía efectiva del cambio de fase.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional y al Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA) Universidad Nacional de La Plata.

### Referencias

- BASUNY, A.; MOSTAFA, D. y SHAKER, A., (2009) Relationship between chemical composition and sensory evaluation of potato chips made from six potato varieties with emphasis on the quality of fried sunflower oil, *World Journal of Dairy and Food Sciences*, 4 (2) 193-200.
- CLELAND, A.C. y EARLE, R.L.,(1982) Freezing time prediction for foods: a simplified procedure, *Int. J. Refrig.* 5, 134-140.
- CLELAND, A.C.,(1986) A review of methods for predicting the duration of freezing processes, in *Food Engineering and Process Applications Volume 2* ed. M Le Maguer and P. Yelen. Elsevier Applied Science Publisher, London, 41-54.
- CLELAND, D.J.; CLELAND, A.C. y EARLE, R.L., (1987) Prediction of freezing and thawing times for multidimensional shapes by simple methods. Part I: Regular shapes. *Int. J. Refrig.* 10, 156.
- CHOI, Y. y OKOS, M.R., (1986) Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods, In *Food Engineering and Process Application1*: 93-101, Elsevier Applied Science, London.
- FIKIN, K.A., (1996) Ice content prediction methods during food freezing: A survey of the Eastern European Literature. In *New developments in refrigeration for Food Safety and Quality*, International Institute of Refrigeration, Paris, France and American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, Michigan, 90-97.
- Food Processing Handbook*, Volumen 1, 2º edición, Wiley-VCH, Brennan, J.G. y Grandison, A. S., editors, 2012.

FORNI, E.; TORREGGIANI, D.; CRIVELLI, G.; MAESTRELLI, A.; BERTELO, G. y SANTELLI, F., (1990) Influence of osmosis time on the quality of dehydrofrozen kiwi fruit, in International Symposium of kiwifruit, Padova, *Acta Horticulturae* 282, 425-433.

FRICKE, B. A. y BECKER, B. R., (2001) Evaluation of thermophysical property models for foods, *HVAC&R Research*, Vol.7, N°4, 311-330.

GARROTE, R. L. y BERTONE, R. A., (1989) Osmotic concentration at low temperature of frozen strawberry halves. Effect of glycerol, glucose and sucrose solutions on exudate loss during thawing, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 22, 264-267.

HUXSOLL, C., (1982) Reducing the refrigeration load by partial concentration of foods prior to freezing. *Food Technology*, 35 (11), 98-102.

LENART A. y LEWICKI P., (1988) Energy consumption during osmotic and convective drying of plant tissue. *Acta Alimentaria Polonica*, 14, 65.

MAFART, P., (1991) *Ingeniería Industrial Alimentaria*, Vol.1 Procesos Físicos de conservación, Editorial Acribia S.A., Zaragoza, España.

MARANI, C.M.; AGNELLI, M.E. y MASCHERONI, R.H., (2007) Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 79, 1122-1130.

ONITA, N.; IVAN, E., (2005) Estimation of the specific heat and thermal conductivity of foods only by their classes of substances content (water, proteins, fats, carbohydrates, fibers and ash), *Scientific Researches, Agrialimentary Processes and Technologies*, Volume XI, N°1, 217-222.

ROBBERS, M.; SINGH, R.P. y CUNHA, L.M., (1997) Osmotic-convective dehydrofreezing process for drying kiwifruit, *Journal of Food Science*, 62(5), 1039-1047.

ROCHE, L. A.; SALVADORI, V.O. y MASCHERONI, R. H., Influencia del tamaño de los cortes, la congelación, almacenamiento congelado y descongelación en la producción de exudados en patas de cerdo deshuesadas. S/Fecha

SALVADORI, V. O; DE MICHELIS A. y MASCHERONI, R. H., (1997) Prediction of freezing times for regular multi-dimensional foods using simple formulae, *Lebensm. Wiss.u.Technol*, 30, 30-35.

SALVADORI, V. O; MASCHERONI, R. H. y DE MICHELIS A., (1996) Freezing of strawberry pulp in large containers: experimental determination and prediction of freezing times, *Int. J. Refrig.*, Vol. 19 N°12, 87-94.

SPIAZZI, E.; RAGGIO, Z.; BIGNONE K. y MASCHERONI, R., (1998) Experiments in dehydro-freezing of fruits and vegetables: mass transfer and quality factors, in IIR proceedings Series "Refrigeration Science and Technology", Sofia, Bulgaria.

TOLEDO, R., (2007) *Fundamentals of food process engineering*, 3rd Edition, Springer science and Business Media, New York, USA.

TORREGGIANI, D., (1993) Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International* 26: 59-68.

ZARITZKY, N., (2002) *Preservación III, Congelación de Alimentos*, Temas en Tecnología de Alimentos, Volumen 1, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Alfaomega Grupo Editor.