

ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICAS DE ALIMENTOS MEXICANOS DURANTE LA CONGELACIÓN Y EL ALMACENAMIENTO CONGELADO

STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES IN MEXICAN FOODS DURING FREEZING AND FROZEN STORAGE

K.M. Machado-Velasco y J.F. Vélez-Ruiz*

*Departamento de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, Universidad de las Américas, Puebla.
Ex-Hda. Sta. Catarina Mártir, Cholula, Pue. 72820 México*

Recibido 26 de Junio 2007; Aceptado 11 de Enero 2008

Resumen

Se realizó un estudio del proceso de congelación en diez alimentos para determinar el efecto del proceso de cambio de fase, así como su almacenamiento congelado durante 2 meses. Se seleccionaron diez alimentos con diferentes características, los cuales fueron caracterizados en su forma fresca y congelada, midiendo su contenido de humedad, temperatura y tiempo de congelación, color, densidad, propiedades termofísicas y atributos texturales. La humedad en los alimentos varió desde 13 hasta 97%, con temperaturas de congelación muy variadas, de -0.10°C para el nopal, hasta -35.2°C para la pasta de mole. En general, para la predicción del tiempo de congelación, la ecuación de Plank resultó mejor que la de Salvadori y Mascheroni, sobre todo para ciertos alimentos como nopal, masa, puré, pellizcada y tamal, en que los errores fueron menores a 27%. El color de los alimentos, expresado por los parámetros de Hunter como cambio neto, varió poco durante el almacenamiento. La densidad se mantuvo constante y sin efecto significativo del almacenamiento congelado. La conductividad térmica resultó más baja para el pan de hojaldras ($0.07\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$), y más alta para la nogada fresca ($0.49\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$), las conductividades aumentaron para el alimento congelado con valores extremos de 0.06 para el pan y de $1.51\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ para el nopal. La conductividad de la mayoría de los alimentos estudiados fue predicha con errores menores al 25% por la ecuación de Spalls. La textura fue la propiedad más afectada por la congelación y el almacenamiento.

Palabras clave: congelación, almacenamiento congelado, alimentos mexicanos, propiedades termofísicas.

Abstract

A study on freezing of foods was carried out to know the effect of freezing process and storage time on some properties of ten selected items. Mexican foods were selected including different characteristics, they were characterized in fresh form as well as frozen; moisture, freezing point and freezing time, color, density, thermal properties and texture were determined. Moisture ranged from 13 to 97%, freezing point varied from -0.10°C for nopal to -35.2°C for "mole" paste; in general, for freezing time evaluation of the studied foods, Plank's model was better than Salvadori and Mascheroni equation. Net color of foods based on Hunter parameters showed low changes during storage. Density was constant did not showing significant effect of storage time. Thermal conductivity ranged from 0.07 for fresh "hojaldras" to $0.49\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ for "nogada", changing their values in frozen samples that changed from 0.06 for bread to $1.51\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ for nopal. Thermal conductivity for most of the foods was predicted by Spalls equation with error less than 25%. Food texture was the most affected property.

Keywords: freezing, frozen storage, Mexican foods, thermophysical properties.

1. Introducción

La congelación es uno de los métodos de conservación que además de seguirse empleando, recientemente ha tomado más importancia. Este método de conservación aplicado apropiadamente preserva los alimentos y sistemas biológicos sin producir cambios importantes en su tamaño, forma, color, sabor, textura y valor nutritivo, es un método que hace posible que el trabajo de preparación de un

artículo alimenticio o de una comida completa se haga antes de esta etapa y se conserve congelado. Actualmente, productos tan diferentes como el jamón, los filetes de pescado empanizados, platillos típicos, sustitutos de crema batida, pasteles de frutas o merengues y hasta cenas individuales completas son preparadas mediante técnicas de producción en masa, para posteriormente ser congelados en forma instantánea o rápida, dependiendo de la técnica de congelación (Vélez, 2006). Un alimento congelado

* Autor para la correspondencia: E-mail: jorgef.velez@uadlax.mx
Tel. (222) 2292648, 2292126; Fax: (222) 2292727

en condiciones adecuadas se puede asemejar al producto fresco (Hung y King, 1996).

La tecnología de congelación de alimentos ha avanzado notablemente, y su importancia económica también ha aumentado en todo el mundo. En países que no poseen una industria propia de productos procesados-congelados, la utilizan únicamente para conservar la materia prima perecedera, mientras que en países que sí tienen la cadena de frío se desarrollan una mayor variedad de productos (Mallet, 1993). México es un país en donde la congelación aún no tiene el auge que tiene en otros países desarrollados, debido en parte a la abundancia y disposición de alimentos frescos, y en parte a la falta de equipos de refrigeración/congelación en medios rurales.

Muchos productos no se pueden conservar mediante la adición de conservadores, o no son adecuados para conservación por enlatado; lo que aunado a la necesidad de desarrollar productos prácticos, precocidos, o para microondas ha dado un amplio campo para la aplicación de la tecnología de congelación (Machado, 2006). Sin embargo, el lograr que un alimento tenga una vida de anaquel mayor, ya no es la única razón por la que las industrias congelan sus productos o utilizan materias primas congeladas. La necesidad de congelar alimentos o materias primas alimenticias para el transporte de alimentos a regiones distantes de su zona de origen, y también el suministro de productos de temporada en todo el año, son dos objetivos muy importantes para congelar alimentos.

Ninguna otra forma de preservación de alimentos puede proporcionar el mismo grado de comodidad que la congelación. El congelamiento consiste en la reducción de la temperatura, generalmente en el rango de -2 a -18°C o menos, cristalización de parte del agua y de algunos de los solutos que componen el alimento. Actualmente en la industria de alimentos, los productos congelados son cada vez más comunes; lo cual se debe a la necesidad o conveniencia original de conservar los alimentos por más tiempo. Las técnicas de congelamiento son muy variadas y el método a usar depende del destino y/o de las características del alimento (Rahman y Vélez, 2007).

Los estudios sobre diferentes aspectos relacionados con la congelación de alimentos se han incrementado en los últimos 20 años, a continuación se mencionan algunos. Navarro y col. (1995) analizaron la influencia de la velocidad de congelación en pastas alimenticias. Fikiin y Fikiin (1999) desarrollaron modelos predictivos de las propiedades termofísicas de algunos alimentos sometidos a enfriamiento y congelación, empleando métodos subjetivos e instrumentales para evaluar la calidad de pescado congelado. Agnelli y Mascheroni (2002) estudiaron el efecto de la congelación en ciertos parámetros de calidad, color y textura de algunos alimentos, tales como camarón, fresas y

moras. Jie y col. (2003) estudiaron y relacionaron la concentración de sólidos solubles de frutas con su punto de congelación. Tseng y col. (2005) estudiaron el almacenamiento congelado de pescado y asociaron el ablandamiento de las muestras con el tiempo de almacenamiento. Lim y col. (2006) en un estudio de la calidad de chícharos congelados, asociaron la temperatura de transición vítrea con una menor pérdida de calidad durante el almacenamiento; mientras que Telis y col. (2007) relacionaron la conductividad térmica a la fracción de agua congelada en pulpa de mango y papaya.

El punto de congelación de un alimento se puede calcular por medio de modelos en base a sus componentes alimenticios, sobresaliendo aquellos que emplean la humedad, algunos han resultado muy efectivos para ciertos alimentos específicos (Rahman y Vélez, 2007). Por otro lado, durante casi cien años y partiendo de la ecuación de Plank, se han desarrollado varios modelos matemáticos para calcular el tiempo de congelación (Vélez, 2006). De manera semejante el uso de fórmulas empíricas se ha empleado para la predicción de propiedades termofísicas en alimentos sin congelar (Martins y Silva, 2004a y 2004b) o en productos congelados (Simpson y Cortés, 2004). Hay otras propiedades para las cuales aún no se han desarrollado modelos matemáticos y por lo tanto se deben determinar experimentalmente.

Ante una industria creciente, la Ingeniería en Alimentos debe de contar con los conocimientos y herramientas suficientes para diseñar, crear, y mejorar equipos y procesos. Actualmente son pocos los datos disponibles de propiedades físicas de alimentos, y todavía es mucho más limitada la información publicada para alimentos congelados; dichas propiedades son necesarias para el estudio y diseño del proceso y equipos de congelación. Por lo que este trabajo se enfocó al análisis del efecto de congelación sobre diez alimentos mexicanos, tanto frescos como procesados, algunos de los cuales ya se encuentran en el mercado como productos congelados. Su aplicación futura puede ser como materia prima, o bien, productos enfocados a la exportación, por lo que se realizó el estudio para caracterizar la congelación de algunos alimentos por medio de sus propiedades físicas y la evolución de algunas de sus propiedades durante el almacenamiento.

2. Materiales y métodos.

2.1 Materiales.

Los productos analizados fueron: chile poblano (*Capsicum annum*), puré de mamey (*Calocarpum mammosum*), masa de maíz (*Zea mays*) cruda para tortilla, masa de maíz precocida como pellizcada, mole poblano, nogada a base de nuez (*Eriobotrya communis*) y almendra (*Amigdalus communis va*),

nopal (*Opuntia Spp*), pan tipo hojaldra, queso tipo Oaxaca y tamales de dulce.

En el caso del chile poblano, el mamey, el nopal, y el queso Oaxaca, así como la materia prima para la elaboración de la nogada, fueron comprados en un mercado de la ciudad de Puebla. La pasta de mole utilizada fue marca Santa Mónica. La pulpa de mamey se le trituro con una batidora manual hasta hacerlo un puré y se homogeneizó la mezcla. La masa de tortilla se obtuvo en una tortillería, y las pellizcadas se elaboraron con el mismo tipo de masa, añadiendo 2 cucharadas de aceite vegetal por cada medio kilo de masa, elaborando muestras circulares de aproximadamente 10 cm de diámetro, con un tiempo de cocción de 7 min. El pan tipo hojaldra se obtuvo en una panadería de la ciudad de Puebla. Los tamales utilizados fueron tamales de dulce sin ningún otro ingrediente más que la masa. La nogada se elaboró con 500 g de nuez, 250 g de almendra y el resto de leche de vaca para completar 1.5 L de producto final. Para las pruebas de almacenamiento, todos los productos fueron comprados el mismo día y procedieron del mismo lote.

2.2 Metodología.

2.2.1. Curvas de Congelación

Las curvas de congelación se obtuvieron midiendo el cambio de temperatura en función del tiempo (Vélez y Torres, 1994; Góral y Kluza, 2002; Machado-Velasco y col., 2007), iniciando el monitoreo desde la temperatura ambiente. La nogada y el mamey se almacenaron en unos cilindros de acrílico con un volumen de 50 mL de producto. Para el resto de los productos se utilizaron placas de 0.12 m de largo y 0.015 m de ancho, el espesor de las placas (3 a 35 mm) fue diferente para cada alimento; dichas dimensiones se incluyen en la Tabla 1. Las mediciones de temperatura se realizaron por duplicado utilizando termopares (tipo T, 30 gauge) y un potenciómetro digital Digi-Sense (Cole-Parmer, Vernon Hills, Ill., EUA). El proceso se llevó a cabo dentro de un congelador horizontal a temperaturas menores a -40°C (Tabla 1), se graficaron los datos obtenidos, y mediante una análisis de las curvas se determinó el punto de congelación, siendo éste el punto donde la temperatura se mantiene constante, formando una meseta, u ocasionando un cambio de pendiente en la gráfica. Este punto es donde los cristales de hielo y el agua líquida coexisten.

La comparación de las temperaturas de congelación experimentales y teóricas se realizó utilizando algunas de las ecuaciones mencionadas por Machado-Velasco y col., (2007). También se realizó la comparación entre el tiempo de congelación experimental y el predicho por las ecuaciones de Plank (Heldman, 1983; Vélez, 2006) y el modelo desarrollado por Salvadori y Mascheroni

(Salvadori y Mascheroni, 1991; Salvadori y col., 1997; Vélez, 2006).

Tabla 1. Espesor de las muestras utilizadas en la determinación del punto de congelación

| Producto | Espesor (m) | Temperatura del congelador (°C) |
|-----------------------|-------------|---------------------------------|
| Chile poblano | 0.0030 | - 42 |
| Masa de tortilla | 0.0076 | - 42 |
| Nogada | 0.0350 | -43 |
| Nopal | 0.0085 | - 42 |
| Pan de hojaldra | 0.0080 | - 41 |
| Pasta de mole poblano | 0.0060 | - 41 |
| Pellizcada | 0.0050 | - 42 |
| Puré de mamey | 0.0350 | - 41 |
| Queso Oaxaca | 0.0200 | - 41 |
| Tamal | 0.0200 | - 45 |

2.2.2. Tiempos de Congelación

Se midió el tiempo de congelación experimental y se evaluó por medio de dos relaciones matemáticas. Las ecuaciones de Plank modificada, (Ec. (1)), así como la de Salvadori y Mascheroni (Ec. (2)) fueron utilizadas para el cálculo del tiempo de congelación, éstas son las siguientes:

$$t_c = \frac{\lambda_a \rho}{(T_{CA} - T_a)} \left[\frac{Pa'}{h} + \frac{Ra'^2}{k} \right] \quad (1)$$

$$t_c = X \left[\frac{1}{Bi} + C \right] \left[\frac{T_{CA} - T_i}{T_{CA}} \right]^n \left[\frac{T_f - T_{CA}}{T_{CA}} \right]^{-m} \frac{L^2}{\alpha} \quad (2)$$

donde λ_a es el calor latente de congelación del alimento (se puede obtener como λx_{ag}), λ es el calor latente de congelación del agua, x_{ag} es la fracción másica de agua, ρ es la densidad del alimento antes de congelar, P y R son las constantes de Plank (1/2 y 1/8 para placas infinitas; 1/16 y 1/24 para esferas; 1/4 y 1/16 para cilindros infinitas; Heldman, 1975), a' es la dimensión característica, (espesor de una placa, diámetro para una esfera y un cilindro, mitad espesor para una placa que se congela por ambos lados), T_{CA} es la temperatura de congelación del alimento, T_a es la temperatura del medio de enfriamiento, h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor para el fluido de enfriamiento, k es la conductividad térmica del alimento; X es una variable característica que se obtiene gráficamente en función de la temperatura T_a ; C , n y m son constantes de la Ec. (2) que dependen de la manera en que el aire incide sobre el alimento y la forma geométrica del alimento, T_f es la temperatura final del alimento, Bi es el número de Biot (igual a hL/k), T_i es la temperatura inicial del alimento; L dimensión del alimento (mitad del espesor para una placa, radio para esfera y cilindro,) y α es la difusividad térmica del alimento (Salvadori y col., 1987, 1991 y 1997; Singh y Heldman, 2001; Vélez, 2006).

2.2.3 Propiedades medidas.

Se obtuvieron la humedad y las propiedades físicas de los diez alimentos, tanto frescos como congelados. Entre las propiedades físicas se incluyeron el color, la densidad, la conductividad térmica, las propiedades reológicas y la textura.

Para el proceso de congelación, se utilizó un congelador convencional de aire estático. Los alimentos se almacenaron a lo largo de dos meses y cada semana se realizó una determinación de las propiedades físicas; registrando los cambios experimentados por las muestras a lo largo del tiempo de almacenamiento. El almacenamiento se realizó en un congelador horizontal a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Todos los productos fueron empacados en bolsas Ziploc®, eliminando de manera manual la mayor cantidad de aire posible.

La descongelación de los productos se llevó a cabo en un horno de microondas comercial (marca LG modelo MS-0942DP), siendo éste uno de los métodos recomendados para la descongelación sin causar daños significativos al producto (Rahman y Vélez, 2007).

Como parte del análisis previo al estudio, se probaron varios tiempos de descongelación, mismos que quedaron fijos para cada alimento y abarcando desde 1 hasta 10 minutos, así cuando se realizó el almacenamiento, el procedimiento y el tiempo de descongelación estaban estandarizados y se siguieron a lo largo del estudio.

2.2.4 Humedad.

La determinación de humedad de las muestras almacenadas se realizó cada semana a lo largo de los dos meses, por medio del método 930.15 AOAC (2000), basado en la evaporación de agua durante la noche en una estufa con vacío ($70^{\circ}\text{C} - 6\text{ h}$) para algunas muestras o sin vacío ($110^{\circ}\text{C} - 16\text{ h}$) para otras.

2.2.5 Color.

La evaluación de color para todos los alimentos se realizó con el colorímetro Gardner Colorgard System 05 (Colorgard System, BYK Gardner, Inc., Silver Spring, Maryland, EUA), midiéndose en el modo de reflectancia los parámetros Lab de la escala de Hunter. Un mosaico blanco se utilizó para la calibración del instrumento ($L = 92.90$, $a = -1.05$, $b = 0.82$). En el caso del pan se midieron los parámetros L , a y b tanto para la corteza como para la miga, según el procedimiento 14-22 de la AACC (1986). El cambio neto de color se calculó, con respecto al tiempo inicial o cero, por medio de la siguiente fórmula:

$$\Delta E = \sqrt{(L_i - L_0)^2 + (a_i - a_0)^2 + (b_i - b_0)^2} \quad (3)$$

donde, L_i , a_i y b_i son los valores para la muestra congelada a los diferentes tiempos de

almacenamiento y L_0 , a_0 y b_0 son los valores para la muestra fresca.

2.2.6 Densidad.

Debido a sus características semilíquidas, al mole, la nogada, y al puré de mamey se les determinó la densidad utilizando el picnómetro de Grease (Vélez y Torres, 1994). Al pan se le midió una densidad aparente (AACC, 1986), que también se conoce como índice de calidad (Palafox, 2005). Las muestras se cortaron en rebanadas triangulares y el índice de calidad fue obtenido al dividir la masa de la muestra entre su volumen. Como la geometría no es totalmente regular, no se le puede llamar densidad en un sentido estricto.

Para el resto de los productos, la densidad se obtuvo por la división de la masa de la muestra entre su volumen. La masa se obtuvo con una balanza analítica modelo Navigator TM (Ohaus Co., Suiza), mientras que el volumen se obtuvo por desplazamiento de agua destilada medido en una probeta. En el caso particular del tamal, se hizo una comparación entre el valor obtenido para la densidad en base al volumen obtenido por desplazamiento y por medición de dimensiones.

2.2.7 Propiedades termofísicas.

La determinación de las propiedades termofísicas se realizó utilizando el instrumento KD2 (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA). Con dicho instrumento se obtuvieron la conductividad y la resistividad (no reportada), así como la temperatura a la que se realizó la medición.

También se calculó la conductividad teórica de los productos utilizando las ecuaciones predictivas (Ecs. (4) y (5)) propuestas por Anderson en 1950 para contenidos de humedad de alimentos superiores al 50%, y por Spells en 1960 para alimentos líquidos (Okos, 1986), y posteriormente se compararon con los resultados experimentales.

$$k_{alim} = k_a X_a + k_s (1 - X_a) \quad (4)$$

$$k_{alim} = 0.056 + 0.57 X_a \quad (5)$$

donde el k_{alim} es la conductividad térmica del alimento ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$), k_a es la conductividad térmica del agua, k_s es la conductividad térmica de la fracción sólida del alimento ($k_s = 0.259\text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$), y X_a es la fracción de agua en el alimento.

Para el cálculo del calor específico de los alimentos, se utilizaron las correlaciones (Ecs. (6) y (7)) propuestas por Okos (1986) en base a los valores de humedad experimentales:

$$C_p = 0.200 + 0.008 X_{ap} \quad (6)$$

$$C_p = 0.200 + 0.003 X_{ap} \quad (7)$$

donde el C_p es el calor específico ($\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$) y X_{ap} es el porcentaje de agua en el alimento.

Finalmente, la difusividad térmica fue evaluada en base a los valores obtenidos de densidad, conductividad térmica, y calor específico.

$$\alpha = \frac{k}{\rho Cp} \quad (8)$$

2.2.8 Textura.

Se utilizó el texturómetro, Texture Analyzer modelo TA.TX2 (Texture Technologies, Corp., Scardale, NY) y el software Texture Expert (versión 1.22, 1999) para medir la fuerza de compresión, penetración y/o corte en las muestras alimenticias. En la Tabla 2 se muestra el tipo de prueba realizado para cada producto. Las muestras se cortaron en cuadros de 1 cm x 1 cm y el espesor dependió del producto alimenticio. Todas las pruebas se realizaron a una velocidad de descenso del cabezal de 1 mm/s, con excepción del pan, que se realizó a una velocidad de 1.7 mm/s (AACC, 1986). Los porcentajes de deformación, dimensiones de las muestras y émbolos utilizados se decidieron según el tipo de producto y empleando la información reportada por Bandyopadhyay y col. (2005), Bungler y col. (2004), Canet y col. (2005), Chun-Lung y col. (2005), Lee y Brennard (2005), Opiyo y Ying (2005), Si-quan y col. (2005), Tseng y col. (2005), y Uruakpa y Arntfield (2005).

2.2.9 Análisis estadístico

Para determinar la existencia o no de una diferencia significativa entre las muestras almacenadas por diferentes tiempos, se realizó un análisis estadístico, utilizando el programa MINITAB (versión 14, 2005, Minitab Inc. State College, PA). Se hicieron análisis de varianza de una vía, utilizando comparaciones de Tukey con un nivel de confianza de 95%. Dicho

análisis estadístico se realizó para todas las propiedades, con excepción del color.

3. Resultados y Discusión.

3.1. Características de los productos frescos

Se obtuvo el porcentaje de humedad y la densidad de los diez alimentos de estudio antes de congelar, mismos que se incluyen en la Tabla 3; en donde aparecen en orden decreciente de humedad, así como los datos de humedad reportados para estos alimentos. Los vegetales, chile y nopal, mostraron humedades mayores a 90%, mientras que el puré de mamey resultó ser un fruto con bajo contenido de humedad, con un valor apenas arriba de 70%. Por otro lado, y tal como se esperaba, los productos con menos del 50% de agua en su composición fueron el pan tipo hojaldra y el mole, con tan sólo 40% y 13% de humedad, respectivamente.

En cuanto a la densidad, sólo el pan y el chile poblano tuvieron una densidad menor a la del agua. La pellizcada, la nogada, el mamey y el tamal presentaron valores similares que variaron entre 1040 y 1070 kg/m³, y la mayor densidad le correspondió a la pasta de mole atribuido a su bajo contenido de agua, a pesar de ser rica en grasa.

3.2. Curvas y Puntos de Congelación

Las curvas de congelación se obtuvieron a partir del monitoreo de la temperatura en las placas de cada uno de los alimentos. Algunas curvas obtenidas se presentan en la Fig. 1, para nopal, nogada, puré de mamey y pasta de mole; en dichos perfiles se puede observar que el fenómeno de subenfriamiento solo se presentó en los primeros tres alimentos, y también en el queso; y no se observó para el mole ni para el resto de los alimentos.

Tabla 2. Condiciones utilizadas en las pruebas de textura

| Producto | Prueba | Deformación (%) | Embolo utilizado |
|------------------|---------------|-----------------|------------------------------------|
| Chile poblano | Penetración | 50 | Aguja de acero inox., D = 2 mm |
| | Corte | 75 | Hoja de acero inox., espesor: 2 mm |
| Masa de tortilla | Compresión | 30 | Plato de aluminio, D = 5 cm |
| | Compresión | 50 | Plato de aluminio, D = 5 cm |
| Nopal | Compresión | 10 | Plato de aluminio, D = 5 cm |
| | Penetración | 50 | Aguja de acero inox., D = 2 mm |
| | Corte | 75 | Hoja de acero inox., espesor: 2 mm |
| Pan de hojaldra | Compresión | 10 | Cilindro de acrílico, D = 1 cm |
| Pasta de mole | Compresión | 30 | Plato de aluminio, D = 5 cm |
| | Penetración | 15 | Cono de 60° |
| Pellizcada | Compresión | 25 | Plato de aluminio, D = 5 cm |
| | Penetración | 50 | Aguja de acero inox., D = 2 mm |
| | Corte | 75 | Hoja de acero inox., espesor: 2 mm |
| Queso Oaxaca | Compresión | 30 | Plato de aluminio, D = 5 cm |
| | Penetración | 50 | Aguja de acero inox., D = 2 mm |
| | Corte (L y C) | 75 | Hoja de acero inox., espesor: 2 mm |
| Tamal | Compresión | 30 | Plato de aluminio, D = 5 cm |
| | Penetración | 15 | Cono de 60° |

Tabla 3. Características de los alimentos frescos

| Producto | Humedad (%) | | Densidad (kg/m ³) |
|-----------------------|--------------|---------------------|-------------------------------|
| | Experimental | Reportado* | |
| Nopal | 97.79 | 92.40 | 1060 |
| Chile poblano | 94.77 | 94.50 | 960 |
| Puré de mamey | 71.30 | 81.50 ^a | 1070 |
| Nogada | 64.89 | ----- | 1050 |
| Masa de tortilla | 63.15 | 54.90 | 1110 |
| Tamal | 58.31 | ----- | 1060 |
| Queso Oaxaca | 52.68 | 48.80 | 1220 |
| Pellizcada | 51.71 | 44.80 ^b | 1040 |
| Pan de hojaldra | 39.74 | 37.30 ^c | 260 |
| Pasta de mole poblano | 13.47 | 4.9-15 ^d | 1250 |

* INN (1974), ^a Mamey (fruta), ^b Tortilla promedio, ^c Pan integral, ^d Carriles y Zaragoza (1988)

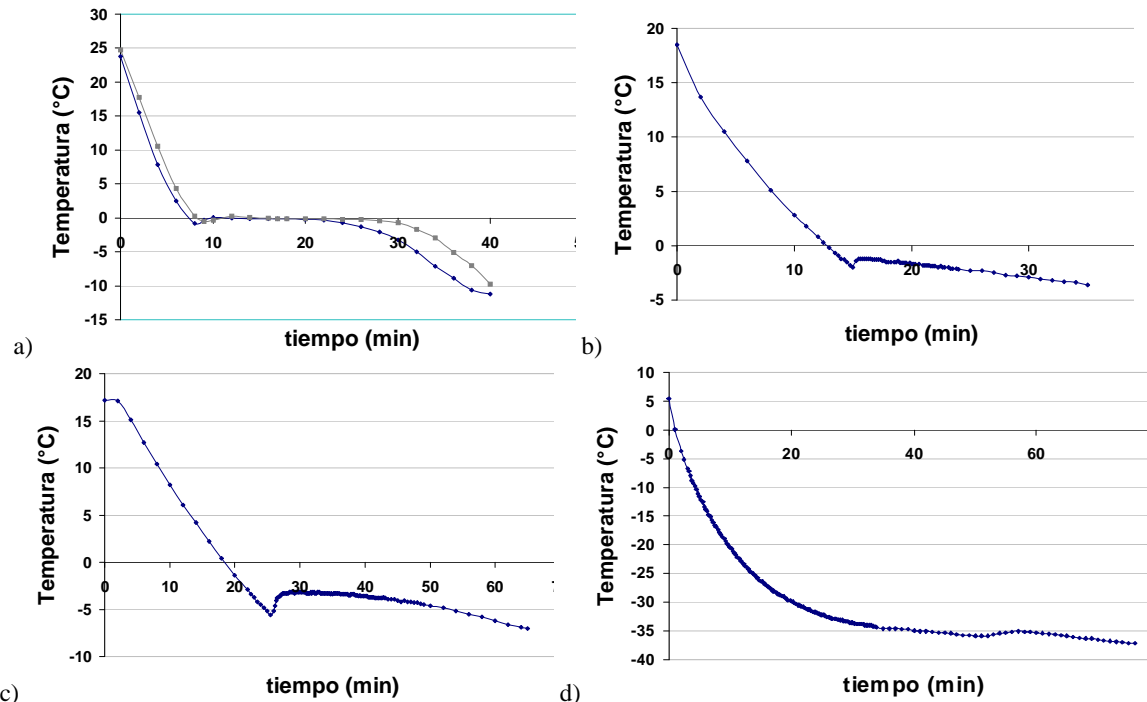


Fig. 1. Curvas de congelación para cuatro alimentos. a) Nopal, b) Nogada, c) Puré de mamey, d) Pasta de Mole.

Además dicho fenómeno se presentó a diferentes tiempos y temperaturas, aproximadamente a los 5 min y -4°C para el queso, a los 8 min y -2.1°C para el nopal, a los 15 min y -2.4°C para la nogada y a los 25 min y -6.0°C para el puré de mamey; es decir, hubo un decremento de entre 1 y 3°C durante el subenfriamiento para los cuatro alimentos que presentaron este fenómeno.

Utilizando las curvas de tiempo contra temperatura, se obtuvieron los puntos de congelación de cada uno de los alimentos como valores promedio de tres determinaciones (Tabla 4). El producto con el menor punto de congelación correspondió a la pasta de mole, con un valor de -35°C , en contraste con el nopal que mostró el punto de congelación más cercano al del agua (-0.1°C). La mayoría de los alimentos tienen un punto de congelación entre 0 y -3.9°C debido al alto contenido de humedad de éstos. Como se sabe, un mayor contenido de sólidos

solubles provoca una depresión mayor del punto de congelación, sin embargo, esto último no resultó válido para todos los alimentos, productos como el tamal tuvieron un punto de congelación más cercano a cero (-1.66°C), comparado con el puré de mamey (-3.25°C), a pesar de que el primero tiene un contenido de humedad menor, por lo que se infiere que el puré tiene mayor contenido de sólidos solubles. Lo anterior se atribuye a la presencia de otros componentes, como grasa, proteína y cenizas, los cuales influyen de manera distinta sobre la depresión del punto de congelación. Esto también explica la razón por la cual el mole, con un contenido de grasa alto y de humedad bajo, presentó un punto de congelación tan bajo. Varios factores han sido considerados como influyentes del proceso de congelación, Devine y *col.* mencionan factores biológicos como la especie, la edad y las tasas glicolíticas para alimentos de origen animal, mientras

que Skrede cita a la variedad y el grado de madurez en frutas; Jie y *col.* (2003) mencionan al agua libre y atada, así como los componentes insolubles;

Hamdami y *col.* consideran la microestructura, el tamaño de partícula y la porosidad de los alimentos en general (Machado-Velasco y *col.*, 2007).

Tabla 4. Puntos de congelación (PC) de los alimentos estudiados.

| Producto | PC ^a (°C) | | | Modelo predictivo ^d |
|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|---|
| | Experimental ^a | Reportado ^b | Calculado ^c | |
| Nopal | 0.10 (0.978) | | - 0.13 | Jie y <i>col.</i> (2003)* ~ |
| Col, coliflor, lechuga | | - 0.56 – 0.20 (0.91-0.95) | - 0.17 - 0.19 | Rahman (1994)* Sanz y <i>col.</i> (1989)* |
| Masa de tortilla | 0.14 (0.631) | | - 0.07 | Jie y <i>col.</i> (2003) |
| Churros fritos | | - 2.56 (0.62) | - 0.22 - 0.41 | Levy (1979)* ~ Levy (1984) |
| Yema de huevo | | - 0.12 (0.50) | | |
| Pellizcada | 1.10 (0.517) | | - 1.11 | Chang y Tao (1981)*~ |
| Lomo de res | | - 1.10 (0.45) | - 1.06 - 1.05 | Tao (1981) Jie y <i>col.</i> (2003) |
| Helado | | - 1.86 (0.62 – 0.64) | | |
| Nogada | - 1.24 (0.649) | | - 1.08 | Jie y <i>col.</i> (2003) ~ |
| Leche de vaca | | - 0.55 (0.88) | - 1.44 - 1.02 | Rahman (1994) Levy (1979) |
| Nuez de Castilla | | - 6.67 (0.04) | | |
| Tamal | - 1.66 (0.583) | | - 1.67 | Chang y Tao (1981) ~ |
| Melón | | - 1.70 (0.93) | - 1.62 - 1.11 | Tao (1981) Levy (1979) |
| Pulpa de mango | | - 1.62 (0.88) | | |
| Clara de huevo | | - 1.48 (0.60) | | |
| Chile poblano | - 1.75 (0.948) | | - 1.76 | Chang y Tao (1981) ~ |
| Maíz verde | | - 1.70 (0.739) - 2.05 | - 1.68 | Chen y Nagy (1987)* Wójcik (1997) |
| Carne de res | | - 1.77 (0.75) | | |
| Queso Oaxaca | 2.77 (0.527) | | - 2.90 | Lacey y Payne (1991) ~ |
| Leche descremada- liofilizada | | - 4.10 (0.40) | - 2.43 - 2.42 | Salvadori y Mascheroni (1991) Sanz y <i>col.</i> (1989) |
| Pavo, pollo | | - 2.80 (0.74) | | |
| Puré de mamey | - 3.25 (0.713) | | - 3.12 | Rahman y Driscoll (1991)* ~ |
| Aguacate | | - 2.70 (0.94) | - 3.00 - 4.05 | Chen y Nagy (1994) Riedel (1951) |
| Pan de hojaldra | - 13.10 (0.397) | | - 12.59 | Rahman y Driscoll (1991) ~ |
| Croissant crudos | | - 2.90 | - 16.96 (0.30) | Riedel (1951) |
| Galletas precocidas | | - 6.73 (0.24) | | |
| Masa de pastel esponjoso | | - 6.80 (0.31) | | |
| Pasta de mole | - 35.22 (0.135) | | - 41.05 | Riedel (1951) ~ |

^a Los valores entre paréntesis representan las fracciones máxicas de la humedad.

^b Los valores del PC y/o de la humedad fueron tomados de las siguientes referencias: Watt y Merrill. (1963); Desrosier (1970); Heldman (1975); Singh y Heldman (2001); Ibarz y Barbosa (2003); Telis y *col.* (2007); Machado-Velasco y *col.* (2007).

^c Los valores representan las predicciones de los modelos mencionados en la última columna, para el alimento en estudio, no para el de referencia.

^d Se citan a los autores del modelo y algunas referencias (*) aparecen en este trabajo; tanto los modelos como las referencias aparecen en Machado-Velasco y *col.* (2007)

~ Mejor modelo de ajuste para el punto de congelación.

Debido a la escasez de datos existentes para los alimentos en estudio, se realizó la comparación con valores reportados para algunos productos similares, considerando la similitud en el contenido de humedad y/o un punto de congelación cercano, así como cierta similitud física; los valores reportados se incluyen también en la Tabla 4. El punto de congelación del nopal está en el rango de puntos de congelación de hortalizas como la col y lechuga, que tienen un contenido de humedad mayor al 90%. El caso de la nogada resulta intermedio al de la leche y nuez, que son dos de sus principales componentes; es interesante notar que la nogada muestra valores cercanos, tanto de humedad como de punto de congelación, a los reportados para helado. El chile poblano se aproxima a los valores reportados para melón, tanto en humedad como en punto de congelación. El queso Oaxaca tiene un valor similar al de carne de ave, y al de una solución de leche descremada pero con una diferencia de 1.3°C. El puré de mamey es comparable con aguacate, que tiene un punto de congelación de -2.7°C contra -3.2°C del mamey; sin embargo el mamey posee un contenido de agua 23% menor y por otro lado, el aguacate es rico en grasa, lo cual puede explicar la diferencia entre las temperaturas.

Para completar lo referente a las temperaturas de congelación, se realizó una comparación de los puntos de congelación experimentales contra los obtenidos por medio de diferentes modelos predictivos (Machado-Velasco y col., 2007). Los resultados obtenidos también se presentan en la Tabla 4, mencionando únicamente aquellos tres modelos más cercanos al valor experimental. Se obtuvieron predicciones satisfactorias de los puntos de congelación con modelos matemáticos, siendo las mejores predicciones las obtenidas por la ecuación de Chang y Tao para el chile poblano, pellizcada y

tamal con desviaciones mínimas. La mayor diferencia fue dada por la ecuación de Riedel, para la predicción del punto de congelación de mole, con 6° abajo, a pesar de ello fue el modelo que mejor predijo la temperatura de congelación de este producto. No se encontró que ninguna de las ecuaciones fuera más general que otras, posiblemente por la diversidad de los alimentos estudiados. Con excepción del mole, todos los productos tuvieron diferencias menores a un grado centígrado, entre el valor experimental y el predicho (Machado, 2006).

3.3. Tiempo de Congelación

A partir de los datos de la curva experimental de congelación de cada alimento, se determinó el tiempo necesario para alcanzar la temperatura del medio de congelación y se contrastó contra los datos obtenidos de la aplicación de dos modelos matemáticos (Plank, Ec. (1) y Salvatori-Mascheroni, Ec. (2)). Para la predicción de los tiempos de congelación por medio de la ecuación general de Plank, se utilizaron las propiedades determinadas experimentalmente (Tablas 3, 4 y 6), así como el calor específico calculado; los valores obtenidos con dicho modelo, así como sus respectivos errores se muestran en la Tabla 5.

El modelo de Plank generó mejores predicciones que el de Salvatori y Mascheroni, por lo que no se incluyeron los valores obtenidos con este segundo modelo; un ejemplo de la aplicación de la ecuación de Plank, se muestra a continuación para el tamal, en que el coeficiente convectivo de transferencia de calor fue tomado de la literatura (5-10 W/m²K) para aire en convección natural (Vélez, 2007).

Tabla 5. Tiempos de congelación de los alimentos estudiados.

| Producto | Tiempos de congelación (min) | | |
|------------------|------------------------------|--------------------|------------------------|
| | Experimental ^a | Plank ^b | Error (%) ^c |
| Pellizcada | 11 | 12.34 | 12.19 |
| Queso Oaxaca | 20 | 65.18 | 225.88 |
| Pan de hojaldra | 22 | 6.08 | 72.36 |
| Chile poblano | 23 | 12.66 | 44.96 |
| Masa de tortilla | 26 | 24.01 | 7.64 |
| Nogada | 35 | 56.47 | 61.36 |
| Nopal | 40 | 39.63 | 0.92 |
| Tamal | 44 | 55.88 | 27.00 |
| Puré de mamey | 65 | 70.35 | 8.22 |
| Pasta de mole | 76 | 33.45 | 55.98 |

^a Tiempo transcurrido desde T_i hasta T_a

^b Aplicando la ecuación de Plank.

^c Los valores expresados se calcularon de la siguiente manera:

$$Error(\%) = \frac{Exp - Pred}{Exp} \times 100$$

donde, *Exp* se refiere al tiempo medido y *Pred* al tiempo calculado con la ecuación de Plank.

Tabla 6. Propiedades térmicas de los alimentos frescos y congelados.

| Producto | k exp ^a (W/m°C) Fco./Cong. | Cp ^b (kJ/kg°C) Fco./Cong. | α (m ² /s) Fco./Cong. | k calc. ^c (W/m°C) | Error ^d (%) |
|-------------------------|---|--|--|---------------------------------|---------------------------|
| Nopal | 0.48(20)/1.59(-2.2) | 3.91/0.85 | (1.2/5.0) x 10 ⁻⁷ | 0.58 ^A | 20.6 |
| Masa de tortilla | 0.40(18)/1.12(-1.5) | 2.64/0.85 | (1.4/5.0) x 10 ⁻⁷ | 0.42 ^S | 4.0 |
| Pellizcada | 0.37(20)/0.42(-4.3) | 2.17/0.84 | (1.7/2.0) x 10 ⁻⁷ | 0.35 ^S | 6.0 |
| Nogada | 0.49(20)/1.02(-4.1) | 2.72/0.86 | (1.7/4.0) x 10 ⁻⁷ | 0.48 ^A | 1.8 |
| Tamal | 0.33(20)/0.51(-7.3) | 2.44/0.85 | (1.3/2.0) x 10 ⁻⁷ | 0.39 ^S | 17.7 |
| Chile poblano | 0.40(23)/1.40(-2.2) | 3.84/0.85 | (1.1/4.0) x 10 ⁻⁷ | 0.57 ^A | 43.2 |
| Queso Oaxaca | 0.41(20)/0.37(-6.5) | 2.37/0.84 | (1.4/2.0) x 10 ⁻⁷ | 0.38 ^S | 7.7 |
| Puré de mamey | 0.45(25)/0.82(-11) | 2.99/0.85 | (1.4/3.0) x 10 ⁻⁷ | 0.46 ^S | 2.8 |
| Pan de hojaldra | 0.07(20)/0.06(-8.9) | 1.66/0.84 | (1.6/0.4) x 10 ⁻⁷ | 0.28 ^S | 303.6 |
| Pasta de mole | 0.17(22)/0.26(-12) | 0.56/0.84 | (2.5/5.0) x 10 ⁻⁷ | 0.13 ^S | 23.3 |

^a Los valores entre paréntesis representan las temperaturas de medición en °C.

^b Los valores del Cp fueron evaluados en base a la humedad de cada alimento.

^c Estos valores representan la mejor predicción de los dos modelos mencionados, indicando si el mejor fue el de Anderson (A) o de Spells (S).

^d Valor absoluto calculado de la misma manera que en la Tabla 5.

$$t_c = \frac{194.5 \frac{kJ}{kg} \times 1060 \frac{kg}{m^3}}{(-1.66 - (-45))^\circ C} \left[\frac{0.5(0.01m)}{7.5 \frac{J}{sm^2C}} + \frac{0.125(0.01m)^2}{0.33 \frac{J}{smC}} \right] = 3352s = 55.8 \text{ min (27\% de error)} \quad (9)$$

3.4. Propiedades Térmicas.

Las propiedades térmicas obtenidas tanto para el alimento fresco como para el congelado se incluyen en la Tabla 6, la difusividad térmica fue evaluada a partir de los datos experimentales de la conductividad térmica y de la densidad. Mientras que el calor específico se calculó a partir de la humedad (Ecs. (6) y (7)) Las propiedades térmicas medidas para los alimentos vegetales (nopal, nogada, chile poblano, y puré de mamey), son muy semejantes a los valores reportados por Martins y Silva (2004c) para frijoles verdes.

Como se esperaba, la conductividad de los productos congelados fue mayor a la de los productos frescos, con excepción del queso Oaxaca y del pan; lo que básicamente se debe a la relación directa entre las propiedades térmicas de productos alimenticios y el estado físico del agua (Heldman y Singh, 1986), el agua se encuentra en estado sólido en los alimentos congelados. El producto que mostró el mayor incremento en la conductividad térmica fue el nopal, con un aumento del 239% con respecto a su conductividad como producto fresco. En ambos casos, fresco y congelado, el producto con menor coeficiente de conductividad fue el pan, lo cual se atribuye al carácter poroso de este producto. No se puede hablar de una conductividad como tal, sino más bien de una "conductividad efectiva" que toma en cuenta la contribución de la miga así como del aire en la conductividad (Wallapapan y col., 1983). Esto también puede explicar el porqué la conductividad del pan congelado no varió con respecto al producto fresco.

Adicionalmente se evaluaron los valores de conductividad para los productos frescos, por medio de las Ecs. (4) y (5); dichos valores se compararon con los obtenidos experimentalmente (Tabla 6). Al comparar las conductividades experimentales con las predichas por la ecuación de Anderson o de Spells, se encontró que predicen adecuadamente la conductividad de los alimentos estudiados. En el caso del pan el error fue muy grande, atribuido nuevamente a la presencia de aire y heterogeneidad del mismo. Sin embargo para mole el error fue de 23%, a pesar de su alto contenido en humedad y en grasa. El producto con una mejor predicción correspondió a la nogada con un error del 1.8%. La ecuación de Spells resultó mejor modelo para la mayoría de las muestras analizadas: masa, pellizcada, tamal, queso Oaxaca, puré de mamey, y mole; mientras que la ecuación de Anderson resultó mejor modelo para los otros alimentos, particularmente para la nogada y el nopal. Tanto la conductividad predicha para el pan con la ecuación de Spells, como para el chile poblano, con la ecuación de Anderson, arrojaron altos errores.

3.5 Cambios durante el almacenamiento.

A continuación se muestra la evolución de algunas propiedades de los productos almacenados en congelación durante 2 meses. Entre los cambios que pueden resultar por la congelación, almacenamiento congelado y descongelación de un alimento, los más comunes están asociados con los fenómenos de deshidratación, quemado, y recristalización. Y de acuerdo a Hung y King (1996), cuando el

almacenamiento se hace por tiempo prolongado y a temperaturas extremadamente bajas, existe la posibilidad de daño por rompimiento o "freeze craking".

3.5.1. Color.

Se espera que un producto que se congela y almacena en las condiciones aplicadas en este estudio, sufra cambios en su color (Rahman y Vélez, 2007); sin embargo, los cambios registrados en los parámetros L , a , b para los diez alimentos no fueron de magnitud considerable. El cambio observado a lo largo del tiempo de almacenamiento de los productos estudiados fue cuantificado por medio del cambio neto de color (ΔE), tomando como referencia los parámetros registrados en la muestra fresca (L_0 , a_0 , b_0); dicho cambio neto de color resultó en general menor a 13, en función de la muestra y de la semana de almacenamiento.

La menor variación correspondió al mole con un valor medio de 1.21 (± 0.48) a lo largo de las 8 semanas, con un máximo de 1.783 en la 6ª semana. En contraparte, el nopal mostró un cambio notable en su color debido al proceso de congelación (cambio significativo entre el producto fresco y el congelado), ya que su ΔE a través de las 8 semanas de almacenamiento varió entre el 10.84 y 12.79. De acuerdo a Rahman y Vélez (2007), la pérdida del color en vegetales verdes, como el nopal, puede deberse a ruptura de cloroplastos y cromoplastos celulares, también asociado con la pérdida de vitaminas.

El mamey tampoco mostró mayor variación en los parámetros L , a , y b de medición de color, con un ΔE máximo de 3.73. La masa de tortilla manifestó un ΔE bajo, las primeras siete semanas de almacenamiento, entre 1.41 y 2.44, aparentemente la congelación y el almacenamiento no causaron un cambio significativo, pero en la última semana sí se registró un cambio importante (6.39).

El análisis de varianza ($\alpha = 0.05$) indicó que el tiempo de almacenamiento no causó variación significativa del cambio neto de color entre las muestras almacenadas en congelación de una hasta ocho semanas.

3.5.2. Densidad.

Durante el almacenamiento, no se registraron cambios notables en la densidad de los alimentos estudiados; la diferencia estadística entre la densidad de las muestras al inicio y después de un mes y dos meses de almacenamiento, no fue significativa, a un nivel de confianza del 95%, para la mayoría de los productos, con excepción del nopal y el queso Oaxaca. El tamal, la nogada y el mole mantuvieron prácticamente la misma densidad; mientras que otros productos como el chile poblano mostraron una pequeña disminución en densidad. La pellizcada y el

mamey, por el contrario, mostraron un aumento progresivo en su densidad, aunque como se mencionó previamente, no hubo diferencia significativa.

El queso Oaxaca tuvo una disminución de densidad estadísticamente significativa, con un valor inicial de 1217 que disminuyó a 1082.5 y 1068.3 kg/m^3 para el primer y segundo mes de almacenamiento congelado, respectivamente, por lo que se puede inferir que fue el proceso de congelación lo que causó el cambio, y no el almacenamiento, ya que entre las densidades registradas al primero y segundo mes no hubo diferencia significativa.

3.5.3. Humedad.

La deshidratación en productos congelados sin empacar, y por ende una pérdida de peso, es un parámetro de calidad importante que debe conocerse y evitarse. En los alimentos estudiados en este trabajo, se registró una pérdida de humedad durante el almacenamiento, lo cual coincide con lo reportado por Campañone y col. (2001), quienes mencionan que los productos congelados no empacados pierden humedad debido a que su superficie está expuesta al calor y existe un gradiente de humedad con el ambiente, dentro del mismo congelador. El análisis estadístico de los datos de humedad, muestra que sí se registró un efecto significativo del tiempo de almacenamiento en la mayoría de los alimentos de estudio, con excepción de la pellizcada, la masa, y el chile poblano.

De los productos con tendencia decreciente en su contenido de humedad, el nopal fue el material que mostró un cambio considerable en su humedad al comparar el material fresco (44%) con el congelado al cabo de una semana (18%); y posteriormente el tiempo de almacenamiento no causó un efecto significativo ($p > 0.05$). En el caso del queso Oaxaca la pérdida de humedad, se debió a que la muestra experimentó una pérdida de suero durante la descongelación.

3.5.4. Propiedades térmicas.

La determinación de la conductividad térmica se realizó en la muestra almacenada-descongelada, es decir, después de transcurrido el tiempo de almacenamiento se descongeló la muestra y se procedió a la determinación instrumental. Los valores registrados mostraron pequeñas variaciones atribuidas a la temperatura de medición (que osciló entre 18 y 25°C) en las muestras, y no al tiempo de almacenamiento, como lo indicó el análisis de varianza correspondiente ($\alpha = 0.05$). Por ejemplo la masa de tortilla estuvo en un rango de 0.39 a 0.43, el mole entre 0.16 y 0.20, el nopal varió de 0.48 a 0.62 $\text{W/m}^\circ\text{C}$. La Tabla 7 muestra los valores de

conductividad térmica y las temperaturas de medición para el caso del nopal.

Existe poca información en la literatura con respecto a las propiedades termofísicas de alimentos. Es importante seguir investigando y estudiando diversos productos alimenticios, para conocer mejor sobre el comportamiento de los mismos frente a determinadas condiciones de almacenamiento, que permita el diseño de procesos y equipos industriales. La temperatura, el contenido y el estado físico del agua en un alimento, así como su porosidad, son factores que influyen grandemente en la conductividad térmica de un alimento, así como en el calor específico y la difusividad.

Tabla 7. Conductividad térmica del nopal durante el almacenamiento*.

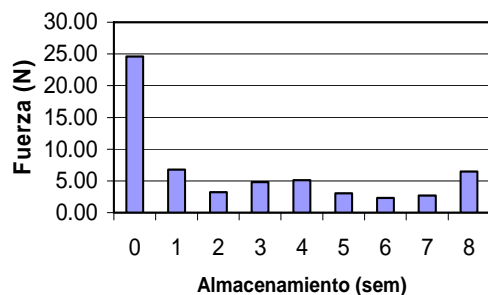
| Semana | Temperatura de medición (°C) | k (W/m°C) | d.e. |
|--------|------------------------------|--------------------|-------|
| 0 | 20.2 ^a | 0.48 ^a | 0.027 |
| 1 | 20.8 ^a | 0.58 ^{ab} | 0.020 |
| 2 | 20.6 ^a | 0.48 ^a | 0.012 |
| 3 | 21.1 ^a | 0.51 ^{ab} | 0.010 |
| 4 | 21.3 ^a | 0.54 ^{ab} | 0.067 |
| 5 | 20.2 ^b | 0.47 ^a | 0.021 |
| 6 | 25.8 ^b | 0.62 ^b | 0.133 |
| 7 | 25.2 ^b | 0.51 ^{ab} | 0.040 |
| 8 | 24.4 ^b | 0.55 ^{ab} | 0.072 |

* Los valores de la misma columna con diferente superíndice son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$)

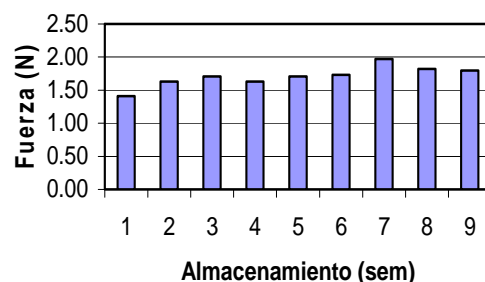
3.5.5. Textura.

Esta propiedad fue de las más afectadas por el proceso de congelación y el almacenamiento, por lo que los resultados y cambios observados permiten la separación de las muestras estudiadas en tres grupos. Algunos de los alimentos tuvieron un efecto significativo del cambio de fase y no del almacenamiento, tal es el caso del tamal y el pan; mientras que otros son afectados por el almacenamiento, como el mole y el nopal, el chile poblano, la masa y el queso Oaxaca; el resto de los alimentos (pellizcada, nogada y puré de mamey) fueron afectados tanto por la congelación como por el almacenamiento. En la Fig. 2 se muestran los resultados de la fuerza de compresión involucrada para el nopal y el pan de hojaldra en los diferentes periodos de análisis o tiempos de almacenamiento. Por un lado, el nopal mostró un cambio fuerte en su textura a la primera semana, de 25 a 6 N y que se mantuvo el resto del almacenamiento; mientras que la hojaldra y de manera contraria al nopal, mostró un pequeño incremento en la fuerza de compresión de 1.4 a 1.6 N que se mantuvo durante cinco semanas, para posteriormente aumentar a 1.7-2 N en las últimas tres semanas. Es interesante notar la semejanza en la reducción de la fuerza

(prácticamente un 80%) de la muestra fresca con respecto a la congelada, para el nopal en este estudio y para la fresa estudiada por Agnelli y Mascheroni, (2002), ambos de estructura suave y de alto contenido de humedad.



a)



b)

Fig. 2. Evolución de la fuerza de compresión para dos alimentos. a) Nopal, b) Pan de hojaldra.

Los cambios texturales se deben esencialmente a los cambios estructurales que suceden en los diferentes alimentos por el cambio de estado, la fracción de agua congelada, el rompimiento celular, y las características particulares de cada alimento. Por ejemplo, Singleton y Pattee (1992) citan que la madurez en cacahuates afectó el daño por congelación; Navaro y col. (1995) explican que los cambios por congelación son reducidos si se incorporan gomas en la formulación de alimentos líquidos. Anzaldúa-Morales y col. (1999) resumen que las velocidades de congelamiento y descongelación tuvieron más influencia en la textura de nueces, que la temperatura de almacenamiento; Graiver y col. (2004) mencionan una aceleración proteolítica y un ablandamiento de la matriz proteica como consecuencia de la congelación de queso Mozzarella; así en cada alimento hay una causa específica.

Es importante determinar el tiempo así como la temperatura óptimos de almacenamiento, para cada producto. En este caso se utilizó la temperatura comercial de almacenamiento de -18°C , pero se podría experimentar variando la temperatura hasta encontrar aquella que permita conservar mejor los atributos de calidad. También es importante considerar el uso final del producto congelado, si se usará como materia prima y se someterá a otro

proceso posterior, o se consumirá tal cual. Si un producto va a ser sometido a otro proceso, como cocción, probablemente los daños que éste haya experimentado en color o textura durante la congelación o descongelación no serán importantes. Productos como el pan o el tamal, que normalmente se calientan antes del consumo, también tendrían menos problemas de aceptación.

Conclusiones

En este trabajo se determinó el efecto de la congelación y el almacenamiento congelado sobre diez alimentos mexicanos.

El contenido de humedad de un producto es un factor determinante en el punto de congelación, sin embargo, el contenido de otros componentes puede resultar determinante en la depresión de la temperatura de congelación, lo cual aplica a productos como el mole, el mamey y el queso Oaxaca.

Mientras que algunos alimentos muestran curvas de congelación bien definidas, otros, como el pan, sólo experimentan un cambio en su pendiente al entrar en la zona de congelación. Los modelos de predicción de la depresión del punto de congelación pueden servir para determinar el punto de congelación de alimentos, que originalmente no fueron considerados cuando se desarrolló el modelo. Algunos vegetales, tuvieron una predicción más acertada con modelos para carne que con modelos para frutas y hortalizas; sin embargo no se encontró que alguno de los modelos utilizados fuese más universal que otro.

El tiempo de almacenamiento en congelación, por lo menos hasta los 2 meses, no influyó de manera perceptible en la conductividad térmica de los productos analizados. Las ecuaciones de Anderson y Spills fueron adecuadas para la predicción de las conductividades de los productos frescos. Esto muestra también la dependencia entre la conductividad y el contenido de humedad de un alimento, aunque no siempre se trate de alimentos de alta humedad, como en el caso del mole.

En el caso de los alimentos estudiados en este trabajo, para la predicción de tiempos de congelación, el modelo de Plank fue más acertado que el modelo de Salvadori y col.

La congelación como cambio de estado ocasiona cambios en el producto. Sin embargo, el tiempo que el producto permanezca almacenado, así como el método de descongelación también influyen en la calidad final del producto. Algunos productos fueron sensibles tan sólo al proceso, pero no al tiempo de almacenamiento, como el nopal, mientras que otros, como la masa, dieron muestras de deterioro después de un cierto tiempo.

La propiedad que menos cambios sufrió fue la densidad, en contraparte, se observaron cambios importantes en la textura. Los cambios de humedad

en un producto son responsables de los cambios texturales en gran medida. Se determinó que en la mayoría de los productos estudiados hubo cambios de humedad significativos. Los alimentos como el mole, la masa de tortilla o la nogada son rehidratados o diluidos a la hora de utilizarse, por lo que los efectos del proceso de congelación son reversibles.

Referencias

- AACC. (1986). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. St. Paul, MN.
- Agnelli, M.E. y Mascheroni, R.H. (2002). Quality evaluation of foodstuffs frozen in a cryomechanical freezer. *Journal of Food Engineering* 52, 257-263.
- Anzaldúa-Morales, A., Brusewitz G.H. y Anderson, J.A. (1999). Pecan texture as affected by freezing rates, storage temperature, and thawing rates. *Journal of Food Science*.64 (2), 332-335.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists. International. 17th Edition. Maryland, USA.
- Bandyopadhyay, M., Runu, C. y Utpal, R. (2005). The Effect of coagulants on the texture of chahna (an acid and heat coagulated product made from milk). *International Journal of Food Science and Technology* 40, 799-810.
- Bunger, A., Moyano, P.C., Vega, R.E., Guerrero, P. y Osorio, F. (2004). Osmotic dehydration and freezing as combined processes on apple preservation. *Food Science and Technology International* 10, 163-169.
- Campanone L.A., Salvadori V.O. y Masheroni R.H. (2001). Weight loss during freezing and storage of unpackaged foods. *Journal of Food Engineering* 35, 6-15.
- Canet, W., Álvarez, M.D., Fernández, C. y Tortosa, M.E. (2005). The effect of sample temperature on instrumental and sensorial properties of mashed potato products. *International Journal of Food Science and Tehcnology* 40, 481-493.
- Carriles, J.L. y Zaragoza, S. (1988). *Caracterización del proceso de elaboración de moles en pasta*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México.
- Chang, H.D. y Tao, L. (1981). Correlations of enthalpies of food systems. *Journal of Food Science* 46, 1493-1497.
- Chen, C.S. y Nagy, S. (1987). Prediction and correlation of freezing point depression of aqueous solutions. *Transactions ASAE* 30 (4), 1176-1180.
- Chun-Lung, G., Wei-Tang, L. y Jianhua, M. (2005). Individual wrapping of radishes with food packaging film. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 879-883.

- Desrosier, N.W. (1970). *The Technology of Food Preservation*, AVI Publishing Co. Inc., Westport Conn., EU. Pp. 91-119.
- Fikiin, K.A. y Fikiin, A.G. (1999). Predictive equations for thermophysical properties and enthalpy during cooling and freezing of food materials. *Journal of Food Engineering* 40, 1-6.
- Góral, D. y Kluza, F. (2002). Experimental and analytical determination of freezing point depression. *Journal of Polish Agricultural Universities, Agricultural Engineering* 5 (2), 14 hojas.
- Graiver, N.G., Zaritzky N.E. y Califano, A.N. (2004). Viscoelastic behavior of refrigerated and frozen low-moisture Mozzarella cheese. *Journal of Food Science* 69 (3), 123-128.
- Heldman D.R. (1975). *Food Process Engineering*. AVI Pub. Co. Inc, Westport, Connecticut, EU. Pp. 151-198.
- Heldman D.R. (1983). Factors influencing food freezing rates. *Food Technology* April, 103-109.
- Heldman, D. y Singh, P. (1986). Thermal properties of frozen foods. En: *Physical and Chemical Properties of Food*, (M.R. Okos, ed.), ASAE, Michigan, EU. Pp. 120-137.
- Hung, Y.C. y King, N.K. (1996). Fundamentals aspects of freeze-cracking. *Food Technology* Dec., 59-61.
- Ibarz, A. y Barbosa, G. (2003). *Unit Operations in Food Engineering*. CRC Press, Boca Raton FLO., EU. Pp. 535-551.
- INN. (1974). *Valor Nutritivo de los Alimentos Mexicanos. Tablas de Uso Práctico*. Instituto Nacional de la Nutrición, México.
- Jie, W., Lite, L. y Yang, D. (2003). The correlation between freezing point and soluble solids of fruits. *Journal of Food Engineering* 60, 481-484.
- Lee, K.A. y Brennan, Ch. (2005). Physico-chemical, textural and sensory properties of a fried-cookie system containing soy protein isolate. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 501-508.
- Levy, F.L. (1979). Enthalpy and specific heat of meat and fish in the freezing range. *Journal of Food Technology* 14, 549.
- Lim, M., Wu, H., Breckell, M. y Birch, J. (2006). Influence of the glass transition and storage temperature of frozen peas on the loss of quality attributes. *International Journal of Food Science and Technology* 41, 507-512.
- Machado, K. (2006). *Determinación de propiedades termofísicas de productos alimenticios mexicanos congelados*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México.
- Machado-Velasco, K., Sosa-Morales, M.E., Rahman, S. y Vélez-Ruiz, J.F. (2007). Freezing point: Measurement, data and prediction. En *Food Properties Handbook* (M.S. Rahman ed.), en revisión por CRC Press.
- Mallet, C.P. (1993). *Frozen Food Technology*. Blackie Academic and Profesional. Londres.
- Manual KD2. (2005). Decagon Devices, Inc. Pullman, WA. EUA.
- Martins, R.C y Silva, C.L.M. (2004a). Frozen green beans (*Phaseolus vulgaris*, L.) Quality profile evaluation during home storage. *Journal of Food Engineering* 64, 481-488.
- Martins, R.C y Silva, C.L.M. (2004b). Green beans (*Phaseolus vulgaris*, L.) Quality loss upon thawing. *Journal of Food Engineering* 65, 37-48.
- Martins, R.C y Silva, C.L.M. (2004c). Inverse problem methodology for thermal-physical properties estimation of frozen green beans. *Journal of Food Engineering* 63, 383-392.
- Navarro, A.S., Martino, M.N. y Zarinski, M.E. (1995). Effect of freezing rate on the rheological behavior of systems based on starch and lipid phase. *Journal of Food Engineering* 26, 481-495.
- Okos M. R. (1986). *Physical and Chemical Properties of Foods*. ASAE. American Society of Agricultural Engineers.
- Opiyo, A. y Ying, T.J. (2005). The effects of 1-methyl-cyclopropene treatment on the shelf-life and quality of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*) fruit. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 665-673.
- Palafox, L. (2005). *Desarrollo de masas panarias prefermentadas congeladas de bajo costo para la elaboración de pan danés*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México.
- Rahman, M. S. (1994). The accuracy of prediction of the freezing point of meat from general methods. *Journal of Food Engineering* 21, 127-136.
- Rahman, M.S. y Driscoll, R.H. (1991). Thermal conductivity of seafoods: calamari, octopus and prawn. *Food Australia* 43(8), 356.
- Rahman, M. S. and Vélez-Ruiz J.F. (2007). Food Preservation by Freezing. In *Handbook of Food Preservation* (M.S. Rahman Ed.). Second Edition, CRC Press, Boca Raton FL, USA. Pp. 635-665.
- Salvadori, V.O. y Mascheroni R.H. (1991). Prediction of freezing and thawing times of foods by means of a simplified analytical method. *Journal of Food Engineering* 13, 67-78.
- Salvadori, V.O., Reynoso R.O., de Michaelis, A. y Mascheroni, R. H. (1987). Freezing time predictions for regular shaped foods: a simplified graphical method. *International Journal of Refrigeration* 10, 357-361.

- Salvadori, V.O., de Michaelis, A. y Mascheroni, R. H. (1997). Prediction of freezing times for regular multi-dimensional foods using simple formulae. *Lebensmittel Wissenschaft und Technology* 30, 30-35.
- Sanz P.D., Dominguez M. y Mascheroni R.H. (1989). Equations for the prediction of thermophysical properties of meat products. *Latin American Applied Research* 19, 155.
- Simpson, R. y Cortés, C. (2004). Inverse method to estimate thermophysical properties of foods at freezing temperatures: Apparent volumetric specific heat. *Journal of Food Engineering*. 64, 5.
- Singleton, J.A. y Pattee, H.E. (1992). Maturity and storage affect freeze damage in peanuts. *Journal of Food Science*. 57 (6), 1382-1384, 1411.
- Singh, R.P. y Heldman, D.R. (2001). *Introduction to Food Engineering*. Academic Press, Glasgow, RU. Pp. 410-439.
- Si-quan, L., Howard, Q.Z., Toni, J. y Fu-hung, H. (2005). Textural modification of soya-bean/corn extrudates as affected by moisture content, screw speed and soya-bean concentration. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 731-741.
- Telis, V.R.N., Telis-Romero, J., Sobral, P.J.A. y Gabas, A.L. (2007). Freezing point and thermal conductivity of tropical fruit pulps: mango and papaya. *International Journal of Food Properties* 10 (1), 73-84.
- Tseng, Y.C., Youling, X. y Webster, C. (2005). The preservation of the quality of the muscle of red crayfish by pre-storage anti-oxidant dipping treatments in frozen Australian. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 841-848.
- Uruakpa, F. y Arntfield, S. (2005). The physico-chemical properties of commercial canola protein isolate and guar-gum gels. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 643-653.
- Vélez, J.F. (2006). *Apuntes de Ingeniería de Alimentos II*. Inéditos. Universidad de las Américas, Puebla, México.
- Velez, J.F. y Torres, M. (1994). Evaluación de propiedades físicas de frutas: Melón, papaya, plátano y sandía. *Revista Información Tecnológica* 5 (1), 39-42.
- Wallapapan, K., Sweat, V.E., Diehl, K.C. y Engler, C.R. (1983). Thermal properties of porous foods. En: *Physical and Chemical Properties of Food*, (M.R. Okos, ed.), ASAE, Michigan, EU. Pp. 78-119.
- Watt, B.K. y Merrill, A.L. (1963). *Composition of Foods*. USDA, Washington D.C., EU.