

PROPIEDADES FUNCIONALES DE SISTEMAS LÁCTEOS CONGELADOS Y SU RELACIÓN CON LA TEXTURA DEL HELADO: UNA REVISIÓN

*Functional properties of
frozen dairy systems and
their relation to ice cream
texture: a review*

**María Aurora Pintor-Jardines y
Alfonso Totosa-Sánchez***

Laboratorio de Alimentos, Instituto Tecnológico
de Estudios Superiores de Ecatepec.
Av. Tecnológico esq. Av. Central s/n, Ecatepec,
Estado de México, México, C.P. 55210.

*Autor de correspondencia:
atotosa@tese.edu.mx

Fecha de Recepción: 21 de marzo de 2013.
Fecha de Aceptación: 24 de junio de 2013.

RESUMEN

El helado es una dispersión coloidal que consta de una fase dispersa, que se encuentra inmersa en una fase continua de alta viscosidad. La fase dispersa está compuesta por tres componentes principales que le dan su estructura: burbujas de aire, cristales de hielo y glóbulos de grasa emulsionados y dispersados. La fase líquida está compuesta a su vez por azúcares, proteínas de leche e hidrocoloides disueltos en agua no congelada. En este artículo se hace una revisión del efecto que tienen las propiedades funcionales de los diferentes ingredientes en la estabilidad de esta compleja mezcla, así como en la formación de la estructura tridimensional de la fase dispersa, influenciando en el tamaño microscópico y dispersión de las burbujas de aire, los glóbulos de grasa y los cristales de hielo, que macroscópicamente dan esa sensación cremosa al helado.

PALABRAS CLAVE: Propiedades funcionales, sistemas lácteos, helado, textura.

ABSTRACT

Ice cream is a colloidal dispersion that consists of one disperse phase, immersed in a continuous phase of high viscosity. The disperse phase has three main components that provide its structure: air bubbles, ice crystals and emulsified and dispersed fat globules. The liquid phase is, in turn, composed by sugar, milk protein and hydrocolloids dissolved in non-frozen water. This paper reviews the effect of the functional properties of the different ingredients on the stability of this complex mix, and on the formation of the tridimensional structure of the disperse phase, influencing the microscopic size and dispersion of the air bubbles, the fat globules and the ice crystals that macroscopically give the creamy taste of ice cream.

KEYWORDS: Functional properties, dairy systems, ice cream, texture.

INTRODUCCIÓN

El helado es una dispersión coloidal que consiste de una emulsión-espuma conge-

lada que se mantiene homogénea durante su almacenamiento. El helado consta de una fase dispersa (con tres principales componentes estructurales: burbujas de aire, cristales de hielo y glóbulos de grasa emulsionados y dispersados) que se encuentra inmersa en una fase continua (fase líquida de alta viscosidad con azúcares, proteínas de leche, e hidrocoloides disueltos en agua no congelada, fase denominada suero) (Marshall y col., 2003; Clarke, 2004). La estabilidad de la compleja mezcla de muchos ingredientes, con diferentes propiedades, depende de la funcionalidad de éstos, los cuales a su vez dependen de las condiciones del sistema (temperatura, fuerza iónica y pH) para su óptimo desempeño en la formulación del helado. Durante el proceso, la incorporación de aire y la congelación implican numerosos cambios físicos que son favorecidos por la acción de las proteínas y emulsificantes, que estabilizan las fases de emulsión y espuma. La capacidad de los componentes para interactuar es lo que mantiene las propiedades físicas y sensoriales del helado durante y después del proceso, almacenamiento, y hasta su consumo.

El objetivo de este trabajo fue hacer una revisión del papel que tienen los ingredientes del helado (proteínas e hidrocoloides) y sus propiedades funcionales en la estabilización de las fases presentes en este alimento, así como la relación que hay entre la estructura formada y la textura instrumental.

Función de los componentes en el helado

En México y varios países, debido a la falta de acceso a leche fresca fluida, los helados son elaborados a partir de leche en polvo rehidratada. El rubro más importante de las importaciones de México es la leche en polvo, mediante las cuales se cubren los requerimientos complementarios y de abasto de la industria de leche y derivados lácteos, así como del Programa de Abasto Social de Leche de LICONSA (Secretaría de Economía, 2012).

El agua se utiliza para la dispersión del resto de los ingredientes de la formulación (principal componente de la fase continua). Los primeros componentes en disolverse son los llamados sólidos lácteos no grasos. Estos son principalmente proteínas lácteas (leche en polvo descremada, caseinatos y/o suero

de leche), que tienen por objeto estabilizar y aumentar la viscosidad de la mezcla-base para helado. Otros ingredientes en la formulación son los azúcares que disminuyen el punto de congelación de la fase acuosa (Álvarez y col., 2005). Proporcionan el sabor dulce, influyen sobre el punto de congelación e incrementan la viscosidad, mejorando la textura y palatabilidad del helado. Los azúcares también disminuyen la dureza de los helados, al coadyuvar determinan el tamaño final de los cristales de hielo modificando el contenido de agua disponible en el sistema (Hagiwara y Hartel, 1996).

Otros ingredientes sólidos no grasos son los emulsificantes y estabilizantes. Los estabilizantes son un grupo de ingredientes usados en la elaboración de helados en bajas concentraciones y son usualmente polisacáridos o gomas como carrageninas, goma guar, goma de algarrobo, goma xantana, goma tara, goma de celulosa y/o celulosa microcristalina (Clarke, 2004). En conjunto, los emulsificantes y estabilizantes determinan las propiedades reológicas del producto (Clarke, 2004). Los emulsificantes ayudan a estabilizar la emulsión debido a su estructura molecular, disminuyendo la tensión interfacial, además de desestabilizar parcialmente la grasa (esto es, ayudan a que se produzca cierta coalescencia y agregación de las gotas de grasa para que pueda ser formada una red que estabilice las burbujas de aire y por lo tanto la estructura del helado). El objetivo de estos hidrocoloides es dar suavidad, cuerpo y textura en los helados, retardando o reduciendo el crecimiento de cristales de hielo durante el almacenamiento, especialmente durante los periodos de fluctuación, impartiendo uniformidad y resistencia al derretimiento. También incrementan la viscosidad de la mezcla, promueven la incorporación de aire y estabilizan al sistema contra la separación de fases, ligando el agua libre (Hagiwara y Hartel, 1996; Goff, 1997; Akesowan, 2008; Hernández y col., 2011; Philip y Laaman, 2011).

La estabilidad de la fase continua antes de la adición de la grasa y batido para incorporar aire, es importante para el correcto desarrollo de la textura deseada en el producto final. La solubilidad de las proteínas y su interacción con otros componentes de la mezcla (como polisacáridos o gomas) afec-

tan la capacidad de emulsionar y estabilizar los glóbulos de grasa que serán dispersos en esta fase, para posteriormente cristalizar durante el batido-congelamiento y estabilizar a su vez el aire incorporado.

Un componente importante en la fase dispersa es la grasa. La grasa que se incorpora en el helado puede ser de origen lácteo, vegetal, o bien, ambas. Utilizar diferentes tipos de grasa vegetal con diferente grado de insaturaciones (como aceite de girasol o de palma) puede resultar en diferentes agregados estructurales, mejorando la estabilidad al derretimiento del helado (Méndez-Velasco y Goff, 2012b). La grasa juega un papel esencial en el helado, ya que disminuye el derretimiento, estabiliza y promueve la incorporación y dispersión de aire, incrementa la viscosidad, imparte el aroma y favorece la formación de cristales de hielo (Bolliger y col., 2000; Chung y col., 2003; Clarke, 2004; Granger y col., 2005; Goff, 1997). Durante la agitación de los glóbulos de grasa se rompe la película proteica interfacial que se formó durante el mezclado y al aproximarse quedan enganchados por el contacto grasa/grasa. Esta grasa cristalizada impide que la coalescencia sea completa, formándose agregados de forma irregular que se unen entre sí, constituyendo una red continua en la matriz del producto (Chung y col., 2003). La capacidad de la grasa de promover y mantener la dispersión de aire en el helado es debido a que la grasa se coloca en la superficie de las burbujas de aire, proporcionándoles una fina capa que las estabiliza. Para ayudar a la formación de agregados en la grasa láctea, es importante añadir emulsificantes que ayuden a desplazar a las proteínas de leche de la superficie de las burbujas, ampliando así la superficie de contacto (Aykan y col., 2008). Recientemente se ha propuesto que los tipos de interacciones entre la grasa (como la coalescencia parcial de cristales de hielo, la floculación inducida por proteínas o puenteo, o bien la floculación, la coalescencia o combinaciones de estas) afectan la textura del helado (Méndez-Velasco y Goff, 2012a).

El aire es otro ingrediente básico que conforma la estructura del helado, formando un alimento que es una emulsión y una espuma a la vez. Cuanto, más alto es el contenido de sólidos en el helado, más cantidad de aire

es incorporado durante el batido-congelado. En helados el porcentaje de rendimiento u overrun, es la manera de medir el aire que se introdujo durante el batido.

Finalmente, la formación de cristales de hielo durante la congelación, es resultado de la fusión a 0 °C de las moléculas de agua que forman estructuras hexagonales (clatratos en solución por interacciones entre moléculas de agua). Debido a la pérdida del calor latente, la temperatura se mantiene constante hasta que el agua restante —libre, no químicamente unida a otras macromoléculas o componentes del sistema lácteo— se convierte en hielo. Aquí es importante la nucleación o crecimiento de los cristales de hielo. Debido al alto contenido de sólidos, la temperatura de super-enfriamiento es menor (en vez de los -40 °C necesarios se llega -2 °C) permitiendo la formación de cristales de hielo estables (Clarke, 2004). El efecto más marcado sobre la fase hielo de los helados es debido a los azúcares presentes en la formulación (tipo y concentración). Afectan la depresión del punto de congelación de la mezcla durante el congelamiento y el volumen de la fase hielo, donde una alta concentración de azúcares resulta en un bajo volumen de la fase hielo. En contraste, los estabilizantes no afectan las características de congelamiento del helado, y el efecto de depresión del punto de congelación no es importante en comparación al efecto de los azúcares (Flores y Goff, 1999).

Procesamiento del helado

El proceso de elaboración del helado consta de seis pasos. Cada uno de estos pasos influye en la calidad del producto final (Figura 1).

1. Mezclado de los ingredientes

El mezclado de los ingredientes tiene por objeto dispersar e hidratar los ingredientes que conforman la base para helado (leche en polvo, caseinatos, suero de leche, grasa butírica, grasa vegetal, emulsificantes, mezcla de estabilizantes y azúcares). Estos ingredientes son agregados con cierto orden, donde los componentes proteicos (leche en polvo, suero de leche, caseinatos), son primeramente disueltos. Posteriormente se agrega la grasa, emulsificantes, estabilizantes, y por último él o los azúcares. En el caso de los estabilizantes,

es necesario hacer un pre-mezclado a temperaturas donde los polímeros puedan ser hidratados con el fin de evitar la formación de grumos en la mezcla.

2. Homogenización

La homogenización, es el proceso responsable de la formación de la emulsión a través de movimientos mecánicos y temperaturas que tienen como objeto la adecuada distribución de los compuestos, disminuyendo el tamaño y dispersando los glóbulos de grasa rodeados con una película proteica interfacial, para obtener una emulsión estable. Los fosfolípidos y polipéptidos de bajo peso molecular compiten por la adsorción en la superficie de la burbuja de aire, desplazando a la proteína y por lo tanto desestabilizando la emulsión. A condiciones y cantidades ideales, las proteínas trabajan en conjunto con estabilizantes formando en este caso complejos que aumentan la viscosidad, confiriendo buenas propiedades al helado. Estabilizantes como las carrageninas (en concentraciones menores a 0.5 %) son ampliamente utilizados en productos lácteos debido a su interacción específica

con las proteínas lácteas y capacidad de interactuar con otros polisacáridos, induciendo zonas de interacción con el agua provocadas por los grupos sulfatos cargados positivamente (Pintor y Totosaus, 2012). Aunque las proteínas contribuyen en la estabilización de la base para helado, es necesario adicionar compuestos como mono y diglicéridos con la finalidad de mantener la dispersión uniforme.

3. Pasteurización

La pasteurización es el proceso posterior a la homogenización que mantiene el control biológico del helado, destruyendo bacterias patógenas que son adquiridas durante la manipulación de los ingredientes. Los tiempos y temperaturas de pasteurización dependen del tipo de componentes que conforman la mezcla. Una pasteurización lenta reduce el 99 % de los microorganismos patógenos a temperaturas de 62-72 °C, en tiempos de 8-40 minutos. La pasteurización rápida reduce la carga microbiana en un 95.5 %, a temperaturas de 71-74 °C en un tiempo de 40-45 segundos (Goff y Hartel, 2004). En este proceso se terminan de solubilizar proteínas y estabilizantes, inmersos en el sistema. Las moléculas como proteínas, emulsificantes y estabilizantes cambian su conformación durante la homogenización, afectando sus propiedades funcionales. Las proteínas son uno de los compuestos más sensibles ante el proceso, debido a que a temperaturas altas (cerca de 80 °C), tienden a desnaturarse, provocando precipitación y separación de fases (Schmidt y Smith, 1992; Clarke, 2004).

4. Maduración de la mezcla

Después de pasteurizar, la mezcla, es enfriada para su reposo por unas veinticuatro horas, con el fin de que se terminen de hidratar las proteínas de leche y estabilizantes. Esto permite el aumento de viscosidad de la base para helado, afectando positivamente la textura del helado y por lo tanto la calidad. Es importante que esta cristalización no sea total, sino que un núcleo de grasa líquida permanezca en los glóbulos. Estos fenómenos son muy importantes para el siguiente paso que es el batido, debido a que las burbujas de aire dependen de qué tan estable sea la emulsión para no colapsar durante el endurecimiento (Clarke, 2004). Después

Figura 1.

Diagrama de flujo de la elaboración de helado.

Figure 1. Flow chart of ice cream production.

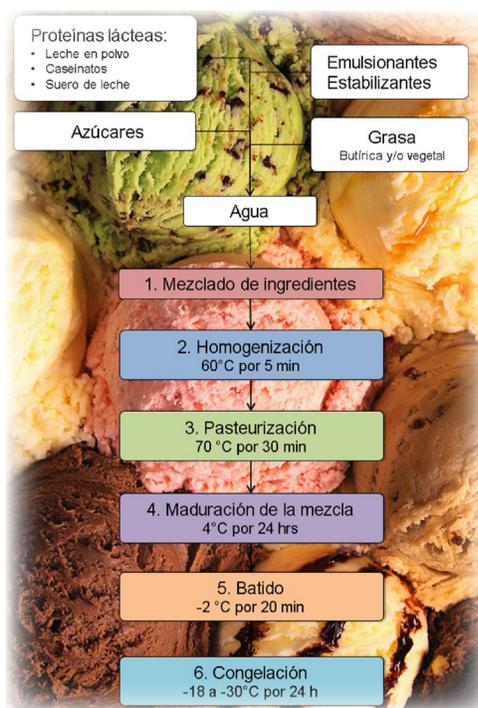
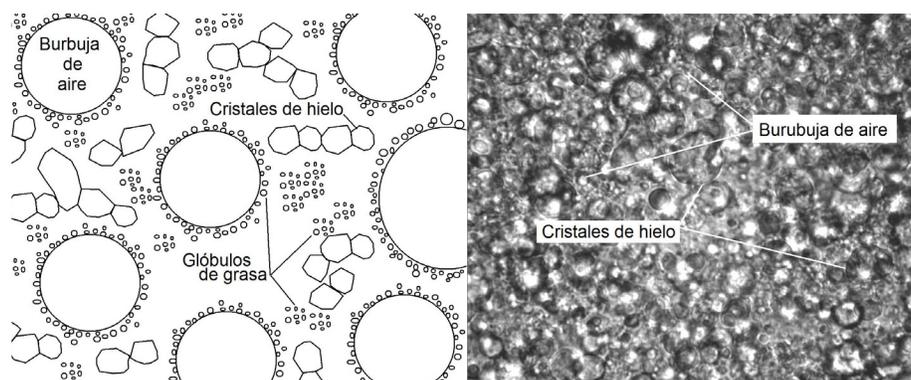


Figura 2.

Representación esquemática del helado. Izquierda: modelo estructural involucrando burbujas de aire, cristales de hielo y glóbulos de grasa (fase dispersa) (adaptado de Trgo, 2003). Derecha: micrografía de contraste de fases de helado (50 x).

Figure 2. Schematic representation of ice cream. Left: structural model involving air bubbles, ice crystals and fat globules (dispersed phase) (adapted from Trgo, 2003). Right: Contrast micrograph of ice cream phases (50 x).



de transcurrir el tiempo de maduración es oportuno hacer mediciones de viscosidad, cantidad de grasa, sólidos totales y análisis microbiológicos. En este punto pueden ser adicionados ingredientes que son sensibles al calor, como frutas, colores y sabores.

5. Batido

Después del proceso de maduración, la mezcla es aireada, batida y congelada. En este paso la cantidad de aire incorporado depende de la estabilidad e interacción de los componentes, así como de la cantidad y calidad de los mismos. Conforme la mezcla se bate, los glóbulos de grasa chocan y se fusionan ampliando aún más el contacto superficial. Las proteínas y los emulsificantes proporcionan estabilidad a las burbujas de aire contra la coalescencia. Después de la incorporación de aire, el helado adquiere una consistencia cremosa. La estabilidad de este sistema (aire-cristales de hielo-gotas de grasa-fase líquida) dependerá del grado de incorporación de aire que se introduzca al helado, del tamaño de la celdas de aire y, fundamentalmente, del espesor de la capa que rodea las células de aire. Esta capa está constituida por la grasa parcialmente desestabilizada, proteínas de la leche, estabilizantes y emulsificantes. Si las burbujas de aire se unen entre sí y se escapan de la matriz, el helado no podrá mantener su forma y colapsará. Los glóbulos sólidos de grasa contribuyen a la formación de la estructura y estabilidad, mientras que las proteínas estabilizan los glóbulos líquidos actuando como relleno inerte, produciendo un helado llamado de dos flujos (Méndez-Velasco y Goff, 2011).

6. Congelación

En este proceso se termina de congelar el agua que queda libre en la matriz del helado. La formación de grandes cristales de hielo es uno de los problemas que causan una textura indeseada. Por ello, después de que la base fue aireada y enfriada, se pasa a congeladores de -18 a -30 °C, con la finalidad de congelar la mezcla rápidamente, para evitar la formación de cristales grandes de hielo. En este punto del proceso, los hidrocoloides juegan el papel más importante de todos los compuestos por su habilidad para retener grandes cantidades de agua. Cuando la mezcla se congela lentamente se produce la nucleación, que es un fenómeno en el cual un cristal pequeño es rodeado por otras moléculas de agua hasta formar cristales de tamaño mayor y por lo tanto una textura defectuosa. Si existe una cantidad apropiada de sólidos totales, la cantidad de agua a congelar se reduce. El contenido de grasa reduce el tamaño de los cristales de hielo y produce un efecto lubricante, lo que provoca una sensación de suavidad en la boca (Goff, 2002).

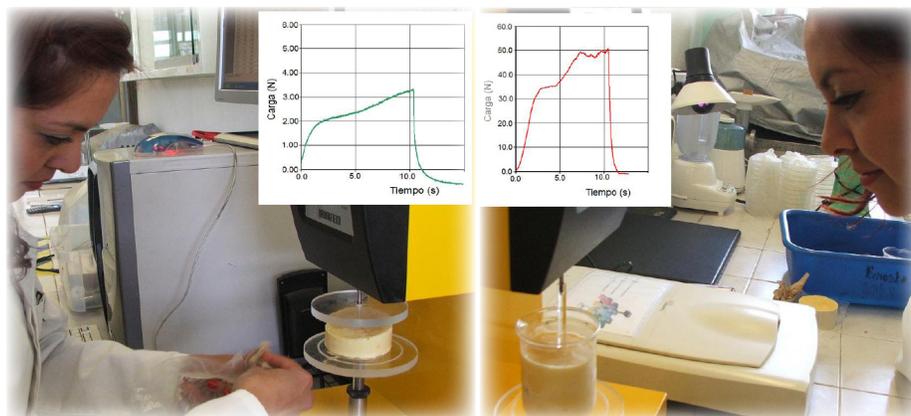
Los cristales de hielo se forman cerca de la superficie del equipo de congelamiento que bate la base para helado, dispersándolos hacia el centro donde estos cristales de hielo crecen. La nucleación (principalmente secundaria) y el comportamiento de crecimiento de los cristales resulta en la formación de pequeños cristales en el equipo (Hartel, 1996). La remoción de agua líquida como hielo del sistema, concentra la fase continua o suero e incrementa la depresión del punto de congelación de la mezcla. Solamente del 30 al 70 % del agua es congelada en este paso del proceso. Durante el congelamiento el agua continúa congelándose y

el crecimiento de los cristales de hielo predomina sobre la nucleación (Muhr y col., 1986; Flores y Goff, 1999). Actualmente, el estándar de la industria es conservar el helado a -28 °C, pero al disminuir a -26 o incluso -23 °C las fluctuaciones de temperatura en esta rango afectarán en menor medida la calidad del helado que por encima de -28 °C (Buyck y col., 2011).

La Figura 2 es la representación esquemática de la estructura del helado. En general, los helados son suaves debido a la cremosidad que imparten los componentes de la fase dispersa, es decir, cristales pequeños de agua, glóbulos de grasa y las burbujas de aire. Esta compleja composición determinará la textura del helado.

Textura de los helados

Instrumentalmente, la textura del helado es determinada por pruebas de compresión o penetración, utilizando un equipo analizador de textura. En las pruebas de compresión el vástago y la base del equipo analizador de textura deben ser mayores al de la muestra para una compresión real, ya que de otro modo sería una prueba de punción o penetración (Bourne, 2002). Las pruebas de compresión para determinar la textura del helado utilizan muestras cilíndricas, con una altura inicial y un área transversal que depende del diámetro de la muestra (menor al del vástago con que se comprime, obviamente). A una velocidad constante (1.00 mm/s) se obtienen deformaciones similares a las que ocurren en la boca cuando se come el helado (es decir, la compresión del helado entre la lengua y el paladar). El área seccional de la muestra se incrementa durante la compresión, pero el volumen se mantiene constante en una forma aproximadamente cilíndrica (Clarke, 2012). En las pruebas de pene-

Figura 3.**Determinación de la textura en helados por prueba de compresión (izquierda) y prueba de penetración (derecha).***Figure 3. Ice cream texture determination by compression test (left) and penetration test (right).*

tracción se determina la dureza del helado (fuerza máxima durante la penetración). El vástago utilizado es obviamente de un diámetro pequeño (8-10 mm), a fin de registrar la fuerza en función de la profundidad de penetración (usualmente 10 mm) (Clarke, 2012; Soukoulis y col. 2008). Es necesario considerar que el diámetro de la muestra debe ser al menos tres veces el diámetro del vástago para mantener una relación de geometrías semi-infinita (Bourne, 2002).

Durante la prueba de compresión de muestras de helado, al comprimir 25 % de la altura original a la muestra, la pendiente inicial indica la deformación resultante por la fuerza aplicada, para posteriormente alcanzar una meseta (compactación de las burbujas de aire) antes de registrar la fuerza máxima. Ya que en las pruebas de compresión, el área de la muestra es menor al área del vástago, las fuerzas registradas son relativamente pequeñas (Figura 3 izquierda). Se reporta generalmente, la fuerza máxima de compresión, así como el trabajo de compresión (integral de la curva). En las pruebas de penetración para determinar la textura del helado, al penetrar 10 mm la superficie del helado, la figura obtenida es claramente diferente a la de las pruebas de compresión, básicamente por qué la perforación de la muestra resulta en la ruptura de la estructura de cristales de hielo y burbujas de aire del helado. La

presencia de un primer pico significativo representa la fracturabilidad de la muestra, y a medida que el vástago avanza, las diferentes estructuras creadas por la formulación y durante el proceso, resultan en diferentes picos de fuerza, hasta llegar a la fuerza máxima detectada durante la penetración. Claramente al ser de menor diámetro el vástago utilizado, las fuerzas de penetración necesarias son hasta 10 veces mayores a las de la prueba de compresión (Figura 3 derecha).

La suavidad y calidad percibida de un helado depende en gran parte del tamaño pequeño de los cristales de hielo del producto (Cook y Hartel, 2010; Soukoulis y col., 2010; BahramParvar y col., 2010). La disponibilidad del agua libre influencia la formación de los cristales de hielo durante la manufactura del helado, y la dureza está determinada por el número y tamaño de los cristales de hielo durante la congelación y almacenamiento (Goff, 1997). En helados, la dureza está inversamente relacionada con el contenido de sólidos y grasa, afectando el rendimiento (Guinard y col., 1997; Goff, 1997; Roland y col., 1999; El-Nagar y col., 2002; Muse y Hartel, 2004; Sofjan y Hartel, 2004). La composición de los helados influye en sus propiedades, por ejemplo, una gran cantidad de sólidos dispersos produce una mayor resistencia al aplicar una fuerza, ya que a mayores cantidades de

sólidos dispersos en el helado, se produce una menor profundidad de penetración y, por lo tanto, se obtienen helados más duros (Muse y Hartel, 2004). Hidrocoloides como la goma de algarrobo tienen un efecto crioprotector, evitando la recrystalización del agua libre, provocada por la nucleación de los cristales de hielo, debido a las temperaturas de fluctuación durante la manufactura y almacenamiento del helado (Flores y Goff, 1999). Las interacciones entre hidrocoloides disminuyen la cantidad de agua libre, decreciendo el tamaño de los cristales de hielo y por lo tanto la dureza, actuando además como estabilizador durante el proceso de congelación-descongelación (Camacho y col., 2001). Por otro lado, la incorporación de aire durante el batido y congelación afecta la textura de los helados, donde el volumen de una fase dispersa comprimible permite una menor resistencia al aplicar una fuerza (Flores y Goff, 1999; Muse y Hartel, 2004; Sofjan y Hartel, 2004).

CONCLUSIONES

La textura del helado es inherente a la formulación y a los ingredientes utilizados en su manufactura. Las propiedades funcionales de estos ingredientes definen a su vez las características fisicoquímicas y sensoriales del producto. Este alimento es ampliamente consumido por la frescura y su textura característica, que a su vez depende de la estructura tridimensional formada por las burbujas de aire, los glóbulos de grasa y los cristales de hielo, que macroscópicamente dan esa sensación cremosa al helado. Cambios en la formulación o incorporación de otros ingredientes modificarán la textura del helado. ||

REFERENCIAS

- Akesowan, A. (2008). Effect of combined stabilizers containing konjac flour and k-carrageenan on ice cream. *Assumption University Journal Technology*. 12: 81-85.
- Álvarez, B., Wolters, C., Vodovotz, Y., and Ji, T. (2005). Physical properties of ice cream containing milk protein concentrates. *Journal of Dairy Science*. 88: 862-871.
- Aykan, V., Sezgin, E., and Guzel-Seydim, Z. B. (2008). Use of fat replacers in the production of reduced-calorie vanilla ice cream. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 110: 516-520.
- BahramParvar, M., Razavi, S. M., and Khodaparast, M. H. (2010). Rheological characterization and sensory evaluation of a typical soft ice cream made with selected food hydrocolloids. *Food Science and Technology International*. 16: 79-88.
- Bolliger, S., Goff, D., and Tharp, W. (2000). Correlation between colloidal properties of ice cream mix and ice cream. *International Dairy Journal*. 10: 303-309.
- Bourne, M. C. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement* (2^{da} Edición). Academic Press: San Diego.
- Buyck, J. R., Baer, R. J., and Choi, J. (2011). Effect of storage temperature on quality of light and full-fat ice cream. *Journal of Dairy Science*. 94: 2213-2219.
- Camacho, M., Mavarrete, M., and Chiralt, A. (2001). Stability of whipped dairy creams containing locust bean gum/l-carrageenan mixtures during freezing-thawing processes. *Food Research International*. 34: 887-894.
- Chung, S., Heymann, H., and Grun, I. (2003). Temporal release of flavor compounds from low-fat and high-fat ice cream during eating. *Journal of Food Science*. 68: 2150-2156.
- Clarke, C. (2004). *The science of ice cream*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Clarke, C. (2012). *The science of ice cream*. (2nd edition). Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Cook, K. L. K. and Hartel, R. W. (2010). Mechanisms of ice crystallization in ice cream production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 9: 213-222.
- El-Nagar, G., Clowes, G., Tudorică, C. M., Kuri, V., and Brennan, C. S. (2002). Rheological quality and stability of yog-ice cream with added inulin. *International Journal of Dairy Technology*. 55: 89-93.
- Flores, A. and Goff, D. (1999). Ice crystal size distributions in dynamically frozen model solutions and ice cream as affected by stabilizers. *Journal of Dairy Science*. 82: 1399-1407.
- Goff, D. (1997). Colloidal aspects of ice cream. *International Dairy Journal*. 7: 363-373.
- Goff, D. (2002). Formation and stabilization of structure in ice cream and related products. *Current Opinion in Colloids and Interface Science*. 7: 432-437.
- Goff, D. and Hartel, W. (2004). *Ice cream and frozen desserts*. (Ed) en: Handbook of Frozen Foods. Hui, Y. H., Cornillon, P., Guerrero Legarreta, I., Lim, M. H., Murrell, K. D., and Nip, W. -K. New York: Marcel Dekker.
- Granger, C., Leger, A., Barey, P., Langendorff, V., and Cansell, M. (2005). Influence of formulation on the structural networks in ice cream. *International Dairy Journal*. 15: 255-262.
- Guinard, X., Zoumas-Morse, C., Mori, L., Uatoni, B., Panyam, D., and Kilara, A. (1997). Sugar and fat effects on sensory properties of ice cream. *Journal of Food Science*. 62: 1087-1094.
- Hagiwara, T. and Hartel, R. W. (1996). Effect of sweeteners stabilizer and storage temperature on ice recrystallization in ice cream. *Journal of Dairy Science*. 79: 735-744.
- Hartel, R. W. (1996). Ice crystallization during the manufacture of ice cream. *Trends in Food Science and Technology*. 7: 315-321.
- Hernández, M., Dolz, M., Dolz, D., and Pellicer, J. (2011). Viscous synergism in carrageenans (k and l) and locust bean gum mixtures: Influence of adding sodium carboxymethylcellulose. *Food Science and Technology International*. 7: 383-391.
- Marshall, T., Goff, D., and Hartel, W. (2003). *Ice Cream*. Gaithersburgh: Aspen Publishers.
- Méndez-Velasco, C. and Goff, H. D. (2011). Enhancement of fat colloidal interactions for the preparation of ice cream high in unsaturated fat. *International Dairy Journal*. 21: 540-547.
- Méndez-Velasco, C. and Goff, H. D. (2012a). Fat structures as affected by unsaturated or saturated monoglyceride and their effect on ice cream structure, texture and stability. *International Dairy Journal*. 24: 33-39
- Méndez-Velasco, C. and Goff, H. D. (2012b). Fat structure in ice cream: A study on the types of fat interactions. *Food Hydrocolloids*. 29: 152-159.
- Muhr, A. H., Blanshard, J. M. V., and Sheard, S.J. (1986). Effect of polysaccharide stabilizers on the nucleation of ice. *International Journal of Food Science and Technology*. 21: 587-603.
- Muse, R. and Hartel, W. (2004). Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness. *Journal Dairy Science*. 87: 1-10.
- Philip, R. and Laaman, T. R. (2011). *Hydrocolloids in frozen desserts*. (Ed) Hydrocolloids in Food Processing. Laaman, T. R. (Editor). New York: Wiley-Blackwell.
- Pintor, A. and Totosaus, A. (2012). Ice cream properties affected by lambda-carrageenan or iota-carrageenan interactions with locust bean gum/carboxymethylcellulose mixture. *International Food Research Journal*. 19: 1409-1414.
- Roland, A., Phillips, G., and Boor, J. (1999). Effects of Fat replacers on the sensory properties, color, melting and hardness of ice cream. *Journal of Dairy Science*. 82: 2094-2100.
- Secretaría de Economía (2012). Análisis del sector lácteo en México. Dirección General de Industrias Básicas. [En línea]. Disponible en: http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/analisis_sector_lacteo.pdf. Fecha de consulta: 28 de abril de 2013.
- Schmidt, K. A. and Smith, D. E. (1992). Milk reactivity of gum and milk protein solutions. *Journal of Dairy Science*. 75: 3290-3295.
- Sofjan, P. and Hartel, W. (2004). Effects of overrun on structural and physical characteristics. *International Dairy Journal*. 14: 255-262.
- Soukoulis, C., Chandrinos, I., and Tzia, C. (2008). Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with κ-carrageenan on storage quality of vanilla ice cream. *LWT-Food Science and Technology*. 41: 1816-1837.
- Soukoulis, C., Lyroni, E., and Tzia, C. (2010). Sensory profiling and hedonic judgement of probiotic ice cream as a function of hydrocolloids, yogurt and milk fat content. *LWT-Food Science and Technology*. 43: 1351-1358.
- Trgo, C. (2003). *Factors affecting texture of ice cream*. (Ed). Texture in Food, Volume 1: Semi-solid foods. McKenna, B.M. (Editor). Boca Raton: CRC Press.