



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE BASES PARA HELADOS Y DE
HELADOS CONTENIENDO EMULSIONES MÚLTIPLES $W_1/O/W_2$**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIA Y TECNOLOGIA AGROALIMENTARIA**

**PRESENTA:
JORGE GUSTAVO DZUL CAUICH**



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

**Noviembre, 2009
Chapingo, Estado de México.**

**COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE BASES PARA HELADOS Y DE
HELADOS CONTENIENDO EMULSIONES MÚLTIPLES $W_1/O/W_2$**

Tesis realizada por **Jorge Gustavo Dzul Cauich** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
AGROALIMENTARIA**

DIRECTORA:

Consuelo Lobato Calleros

DRA. CONSUELO LOBATO CALLEROS

ASESOR:

[Signature]

DR. ELEAZAR AGUIRRE MANDUJANO

ASESOR:

[Signature]

DR. ARTURO HERNÁNDEZ MONTES

AGRADECIMIENTOS

A dios como yo lo concibo.

A la familia Dzul Cauich y a la Familia Crispin Isidro por todo el apoyo brindado a lo largo de mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo financiero otorgado a través de la beca en la Maestría en Ciencia y tecnología Agroalimentaria de la Universidad Autónoma Chapingo la cual forma parte del Padrón Nacional de Posgrado del CONACyT.

A la Dra. Consuelo Lobato Calleros por su valioso apoyo y por haber creído en el trabajo, además de su acertada dirección en la presente investigación.

A mis compañeros de Maestría por su apoyo moral en los tiempos difíciles, en especial a Gerardo Mendez, Emanuel Flores, Antonio Torres y Cesar Sánchez.

A la M.C Ofelia Sandoval y al M.C Cesar Ramírez por su valiosa ayuda y asesoría en la parte de esta investigación.

Al M.C Fredy Morales por sus consejos en la realización de esta investigación.

Sinceramente:

Jorge G. Dzul

DEDICATORIA

A mis padres Rosa Cauich y José Dzul.

En especial a mi princesa Angelica Nichte-Há y a mi esposa Guadalupe Crispin,
los principales motores de mi vida.

A la familia Crispín Isidro y Dzul Cauich.

A toda la Familia Sendero de Luz de 4° y 5° Paso por su apoyo en los
momentos más difíciles de mi vida.

Sinceramente:
Jorge G. Dzul

DATOS BIOGRÁFICOS

Jorge Gustavo Dzul Cauich, realizó sus estudios de licenciatura en el Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo, ha trabajado de manera profesional en el ramo de alimentos, principalmente en la industria cárnica y de lácteos.

COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE BASES PARA HELADOS Y DE HELADOS CONTENIENDO EMULSIONES MÚLTIPLES $W_1/O/W_2$

RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF ICE CREAM MIXES AND ICE CREAM CONTAINING $W_1/O/W_2$ MULTIPLE EMULSIONS

Jorge Gustavo Dzúl Cauich

Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria

Universidad Autónoma Chapingo

Bajo la dirección de la Dra. Consuelo Lobato

RESUMEN

Se investigó la composición química proximal, overrun, propiedades reológicas y aceptabilidad de los atributos sensoriales de helados bajos en grasa incorporados con emulsiones múltiples agua-en-aceite-en-agua ($W_1/O/W_2$) E, estabilizadas con pectina de alto (PAM) o bajo (PBM) metoxilo, en sustitución parcial o total de su contenido en grasa láctea (GL). El helado bajo en grasa conteniendo 5 % de GL y 5 % de E estabilizada con PBM, mostró valores de overrun y de módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G''), similares a los correspondientes al helado control completo en GL (H_{CG}). Por su parte, el helado bajo en grasa conteniendo 5 % de GL y 5 % de E estabilizada con PAM, obtuvo calificaciones en los atributos sensoriales evaluados, comparables a los asignados al H_{CG} , a pesar de que el primero contuvo 40 % menos grasa que este último.

Palabras claves:

Helado, emulsión, reología, grasa láctea.

ABSTRACT

This study analyzed the proximal chemical composition, overrun, rheological properties and acceptability of the sensory attributes of low-fat ice cream mixed with water-in-oil-in-water multiple emulsions ($W_1/O/W_2$) (E) stabilized with high or low methoxil pectin (HMP) (LMP) in partial or total substitution of its milk fat (MF) content. The low-fat ice cream containing 5% MF and 5% E stabilized with LMP showed overrun, storage modulus (G') and loss modulus (G'') values similar to the ice cream control with full milk fat (H_{CG}). On the other hand, the low-fat ice cream containing 5% MF and 5% E stabilized with HMP obtained marks in the evaluated sensory attributes comparable to those assigned to the H_{CG} , although the first contained 40% less fat than the last one.

Key words:

ice cream, emulsion, rheology, milk fat.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. HIPÓTESIS	4
4. OBJETIVOS	4
4.1. Objetivo general	4
4.2. Objetivos particulares	5
5. ANTECEDENTES	6
5.1. Reología	6
5.2. Emulsiones	9
5.2.1. Emulsiones múltiples	10
5.2.2 Estabilidad de las emulsiones.	11
5.2.3. Inestabilidad de las emulsiones	12
5.3. Bases para helado	14
5.4. Helado	15
5.5. Grasa láctea	17
5.6. Sustitutos de grasa	17
6. MATERIALES Y MÉTODOS	19
6.1. Formulación y preparación de las emulsiones múltiples	19
6.2. Evaluación de las emulsiones.	20
6.3. Formulación y preparación de las bases para helados	22

6.4. Análisis químico proximal de las bases para helados .	24
6.5. Determinaciones reológicas de las bases para helados .	24
6.6. Preparación de las variaciones de helado .	25
6.7. Determinación de overrun y velocidad de fundido de los helados .	25
6.8. Determinaciones reológicas de las variaciones de helados .	26
6.9. Análisis sensorial de los helados .	27
6.10. Análisis de datos .	27
7. RESULTADOS .	28
7.1. Morfología y tamaño de las gotas de las emulsiones múltiples.	28
7.2. Composición química proximal de las bases para helados.	32
7.3. Comportamiento reológico de las bases para helados .	35
7.3.1 Comportamiento de flujo .	39
7.4. Overrun y velocidad de fundido de los helados .	44
7.4.1. Overrun .	44
7.4.2. Velocidad de fundido .	47
7.5. Comportamiento reológico de los helados .	49
7.6. Aceptabilidad de los atributos sensoriales de los helados .	55
8. CONCLUSIONES .	61
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .	62

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores medios ($\pm$ DE) del diámetro volumétrico-superficial ($D_{3,2}$), después de 1 y 24 horas de almacenamiento, y tasa de coalescencia de las gotas de aceite de las emulsiones múltiples.	31
Cuadro 2. composición química de las bases para helados	34
Cuadro 3. Valores medios ($\pm$ DE) del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y $\tan \delta$ de las bases para helados, en la zona de comportamiento viscoelástico lineal.	39
Cuadro 4. Valores medios ($\pm$ DE) de los términos del modelo de Herschel-Bulkley que obedecieron las bases para helados	44
Cuadro 5. Valores medios de overrun y velocidad de fundido ($\pm$ DE) de los helados.....	45
Cuadro 6. Valores medios ($\pm$ DE) del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y $\tan \delta$ de los helados.....	55
Cuadro 7. Valores de la prueba de aceptabilidad global de los helados.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Microfotografía de glóbulos de emulsión interna (W_1/O).....	29
Figura 2. Microfotografías de los glóbulos de aceite de las emulsiones múltiples conteniendo numerosas gotas de agua muy pequeñas en su interior: (a) E_{PAM} , emulsión conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa y (b) E_{PBM} , emulsión conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa. (Amplificación 100 x)...	31
Figura 3. Variación del módulo de almacenamiento (G') de las diferentes bases para helados, en función de la deformación.....	37
Figura 4. Variación del módulo de almacenamiento (G'') de las diferentes bases para helados, en función de la deformación	38
Figura 5. Comportamiento de la viscosidad aparente de las bases para helados en función de la velocidad de cizalla	41
Figura 6. Porcentaje de overrun de los helados.....	45
Figura 7. Velocidad de fundido de los helados.....	48
Figura 8. Variación del módulo de almacenamiento (G') de los helados, en función de la deformación	53
Figura 9. Variación del módulo de pérdida (G'') de los helados, en función de la deformación.....	54
Figura 10. Análisis de componentes principales de la aceptabilidad de los atributos sensoriales y la composición de la fracción grasa de los helados.....	60

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha observado una preocupación creciente en los seres humanos en relación a su salud y calidad de vida; la cual ha generado gran interés por cambiar sus hábitos alimenticios hacia la disminución en el consumo de alimentos ricos en azúcares, sales y grasas. Además se ha impulsado el desarrollo de alimentos como medio de promoción de bienestar y salud y reducción de riesgos a enfermedades (Matsubara, 2001); así, Las formulaciones de diversos alimentos se han modificado para la obtención de productos más saludables, destacando la reducción de su fracción grasa.

El helado es considerado como una excelente fuente de energía y de nutrimentos; sin embargo, contiene cantidades importantes de grasa láctea de tipo saturado o de grasas vegetales hidrogenadas; ambas consideradas como “no saludables”. No obstante, la grasa láctea influye en el desarrollo de la textura, sensación bucal, cremosidad y lubricidad asociadas a los helados (Akoh, 1998). El tipo y la cantidad de grasa usados en la formulación de las bases, determina las características de los helados resultantes, por afectar sus propiedades reológicas (Adapa *et al.*, 2000). Típicamente el helado contiene de 10 a 16 % de grasa, pero en los últimos años algunos manufactureros han

reducido la cantidad de grasa y la han reemplazado con carbohidratos o proteínas (Giese, 1996).

Durante la congelación del helado, el batido y la cristalización del hielo desestabilizan la emulsión grasa en la mezcla. La grasa desestabilizada actúa como un agente cementante y proporciona soporte a las burbujas de aire principalmente atrapadas por proteínas. La combinación de proteínas lácteas y grasa parcialmente agregada proporciona fuerza y estructura al helado (Marshall y Arbuckle, 1996). Crear y estabilizar la estructura deseada en postres congelados bajos en grasa es difícil, debido a que la fracción grasa se disminuye, mientras que la fracción proteínica en general se incrementa. La estructura del helado determina varios parámetros importantes en el producto final (Granger *et al.*, 2005), por lo que cambios estructurales en el helado pueden ser detectados mediante la evaluación de sus propiedades físicas y sensoriales (Adapa *et al.*, 2000).

El uso de sustitutos de grasa de base proteínica y sacárida para el desarrollo de helados bajos en grasa no ha rendido productos con los atributos de calidad deseables (Schmidt *et al.*, 1993; Specter y Setser, 1994). Al considerar por una parte, que el balance de grasa de tipo saturada/insaturada es aún más importante para la salud que la cantidad total de grasa ingerida (Yu y Hammond, 2000), y por otra parte, que el helado es un producto conformado por una estructura de lactoproteínas, en combinación con una estructura de emulsión aceite-en-agua, resulta interesante explorar el efecto de la sustitución de los

glóbulos de grasa láctea por gotas de emulsiones agua-en-aceite-en-agua ($W_1/O/W_2$) (Lobato-Calleros *et al.*, 2008) sobre las propiedades reológicas y estructurales de helado. El uso de emulsiones $W_1/O/W_2$ permite una reducción adicional del contenido graso del helado a aquella que pudiera ser lograda con emulsiones aceite-en-agua (O/W), puesto que parte de la fase dispersa está constituida por gotas de agua (W_1).

Con base en lo antes expuesto, el objetivo de este proyecto fue investigar las propiedades reológicas y sensoriales de helado reducido en grasa incorporado con emulsiones múltiples agua-en-aceite-en-agua, en sustitución de la grasa láctea.

2. JUSTIFICACIÓN

El helado es considerado como una excelente fuente de energía y de nutrimentos, lo cual lo convierte en un alimento deseable para el crecimiento y para ganar peso en personas que así lo requieran. Sin embargo, la ingesta de helado debe ser controlada en aquellas personas que presentan disturbios metabólicos, tales como sobrepeso, obesidad e hipercolesterolemia, entre otros. Al considerar que existen graves problemas de sobrepeso y de obesidad en la población mexicana, que afectan al 72 % de las mujeres y al 67 % de los hombres mayores de 30 años, y que estos problemas son factores de riesgo para el desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas como la diabetes y la hipertensión, es necesario reflexionar sobre las causas que las originan, destacando entre ellas una alimentación no equilibrada, predisposición genética

y falta de ejercicio. En relación al rubro de la alimentación se requiere de la formulación y el desarrollo de alimentos nutritivos, pero de bajos contenidos en grasas saturadas y densidad energética. Para la realización de la tarea antes expuesta, se requiere desarrollar opciones de sustitutos de grasa que contribuyan a la salud del consumidor y a la vez impartan propiedades mecánicas deseables al helado, tal puede ser el caso de emulsiones múltiples de aceites vegetales poliinsaturados. Asimismo es imprescindible investigar los efectos de estos componentes alternativos a la grasa láctea sobre las propiedades mecánico-sensoriales del producto, para que de esta forma este último cumpla con las expectativas sensoriales del consumidor.

3. HIPÓTESIS

La incorporación de emulsiones múltiples ($W_1/O/W_2$), en sustitución de la grasa láctea, resultará en helados reducidos en grasa y en densidad energética, con propiedades mecánico-sensoriales comparables a aquellas presentadas por un helado tradicional, completo en grasa láctea.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Investigar las propiedades reológicas y sensoriales de helado reducido en grasa incorporado con emulsiones múltiples agua-en-aceite-en-agua, en sustitución de la grasa láctea.

4.2 Objetivos particulares

Preparar emulsiones múltiples agua-en-aceite-en-agua, usando, como agentes emulsificantes/estabilizantes, en la fase acuosa externa (W_2): pectina de alto metoxilo o pectina de bajo metoxilo.

Caracterizar la morfología, el tamaño de gota y la estabilidad de las emulsiones múltiples.

Determinar la composición química proximal y propiedades reológicas de seis variaciones de bases para helados, formuladas con distintos contenidos de grasa láctea y emulsiones múltiples.

Determinar la composición química proximal, overrun, velocidad de fundido, propiedades reológicas y atributos sensoriales de los helados producidos a partir de las distintas variaciones de bases para helados mencionadas.

Relacionar las propiedades reológicas de las variaciones de helado con el contenido y naturaleza de su fracción grasa, así como con sus atributos sensoriales.

5. ANTECEDENTES

5.1 Reología

La reología es definida como la ciencia de la deformación y del flujo de la materia (Steffe, 1996; Tunick, 2000; Tabilo-Munizaga y Barbosa-Cánovas, 2005) y estudia la manera en la cual los materiales responden a la aplicación de una fuerza. Existen numerosas áreas de la industria alimenticia para las que los datos reológicos son necesarios en áreas como: determinación de la funcionalidad de ingredientes para el desarrollo de nuevos productos, control de calidad de productos finales y vida de anaquel de productos, entre otras (Steffe, 1996).

Las propiedades reológicas son determinadas midiendo la fuerza y la deformación como función del tiempo; por lo tanto, mediante la reología es posible determinar la forma como un material responde a una fuerza y/o deformación aplicada. Los conceptos básicos de *esfuerzo* (fuerza por unidad de área) y *deformación* (deformación por longitud) son importantes para todas las evaluaciones reológicas (Tabilo-Munizaga y Barbosa-Cánovas, 2005).

Esfuerzo. Medida de fuerza por unidad de área superficial, expresada en Pascales (Pa). La dirección de la fuerza con respecto a la incidencia sobre el área superficial determina el tipo de esfuerzo. El esfuerzo normal (σ) ocurre cuando la fuerza es directamente perpendicular a la superficie y puede realizarse durante tensión o compresión. El esfuerzo de corte (τ) ocurre cuando la fuerza actúa en paralelo a la superficie.

Deformación. Representa la cantidad dimensional de la deformación relativa de un material; la dirección del esfuerzo aplicado con respecto a la superficie del material determina el tipo de deformación; así la deformación normal (ϵ) ocurre cuando el esfuerzo es normal a la superficie de la muestra (Tabilo-Munizaga y Barbosa-Cánovas, 2005).

Pruebas de esfuerzo-deformación son usadas para el estudio del comportamiento de los alimentos y generalmente pueden ser categorizadas en pruebas de pequeños y grandes esfuerzos. Esfuerzos pequeños se usan cuando solamente un pequeño porcentaje de la deformación es requerida para romper la muestra y son usados comúnmente en pruebas fundamentales. Esfuerzos grandes se usan para deformar la muestra hasta el punto de cambio estructural permanente. Entre las pruebas en las que se aplican esfuerzos pequeños se encuentran las oscilatorias, de relajación y de determinación del rendimiento del esfuerzo (Tabilo-Munizaga y Barbosa-Cánovas, 2005).

Las pruebas oscilatorias constituyen el método dinámico más común para el estudio del comportamiento viscoelástico de los alimentos. Los resultados son

muy sensibles a la composición química y a la estructura de los alimentos y su aplicación es muy variada (Steffe, 1996). Las pruebas dinámicas de oscilación son muy útiles para revelar la microestructura de un material viscoelástico, y por ende son muy útiles desde un punto de vista práctico (Colo *et al.*, 2004).

Un barrido de amplitud es utilizado para determinar la región viscoelástica lineal de un material (Colo *et al.*, 2004); esta región es la zona en donde los módulos de esfuerzo y deformación son constantes y generalmente en esta región es donde se realizan las mediciones de las propiedades viscoelásticas (Adapa *et al.*, 2000). Los valores de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G''), así como del factor de cedencia $\tan \delta$ (G''/G') correspondientes a esta región son obtenidos. El valor de G' es la medida de la energía almacenada en la muestra durante el proceso de corte y representa el comportamiento elástico del material. Por su parte, G'' es una medida de la habilidad del alimento para disipar energía, es indicativo de la ruptura de la estructura y representa el comportamiento viscoso del alimento (Tunick *et al.*, 1993). Si G' es mucho más grande que G'' , el material se comporta predominantemente como un sólido; esto es, el material es esencialmente elástico o recuperable. Sin embargo, si G'' es mucho más grande que G' , la energía es disipada y el comportamiento del material es predominantemente el de un líquido; es decir, su comportamiento es viscoso. El factor de cedencia $\tan \delta$ (G''/G') revela la proporción del comportamiento viscoso al elástico ante la deformación. Valor de $\tan \delta = 0$ corresponde a una respuesta elástica; si $\tan \delta = \infty$ se trata de una respuesta viscosa y si $0 < \tan \delta < \infty$ el material muestra respuesta viscoelástica (Tabilo-

Munizaga y Barbosa-Cánovas, 2005; Adapa *et al.*, 2000). La viscoelasticidad se refiere a la existencia simultánea de los comportamientos sólido y líquido (Adapa *et al.*, 2000).

5.2 Emulsiones

Una emulsión es un sistema que consiste en dos líquidos inmiscibles, en el cual uno de los líquidos se encuentra disperso en forma de pequeñas gotas en el otro. Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables y se pueden romper a través de una variedad de diferentes procesos fisicoquímicos, dependiendo de su composición, microestructura, etc. (Garti, 1996; McClements *et al.*, 2004; McClements y Guzey, 2006; Perrier-Cornet, 2004). Aunque se traten de dispersiones termodinámicamente inestables, las emulsiones pueden convertirse en cinéticamente estables en presencia de agentes tensoactivos que se adsorben en las superficies de las gotas. En la mayoría de las emulsiones una de las fases es acuosa y la otra un aceite (Aranberri, 2006).

Un sistema que consiste en gotas de aceite dispersas en una fase acuosa, es llamado emulsión aceite -en- agua (O/W); mientras que un sistema que consiste en gotas de agua dispersas en una fase oleosa es llamado emulsión agua-en-aceite (W/O). Tradicionalmente una emulsión aceite-en-agua (O/W) es elaborada mediante homegenización de una fase oleosa y una fase acuosa en la presencia de uno o más emulsificantes. Durante la homogenización, los emulsificantes se adsorben en la superficie de la gotas recién formadas y

reducen la tensión interfacial formando una capa protectora alrededor de las gotas, lo cual ayuda a protegerlas de la agregación mediante fuerzas repulsivas (McClements y Guzey, 2006; McClements *et al.*, 2007).

5.2.1 Emulsiones Múltiples

Las emulsiones múltiples o dobles son sistemas más complejos, llamados emulsión de emulsiones, en los que las gotas de la fase dispersa contienen a su vez pequeñas gotas dispersas. Cada glóbulo disperso en la emulsión doble forma una estructura vesicular con algunos o múltiples compartimentos separados de la fase acuosa por una capa de la fase oleosa (Garti, 1996).

A partir de las emulsiones sencillas descritas anteriormente, se pueden elaborar emulsiones múltiples; como por ejemplo, emulsiones aceite-en-agua-en-aceite (O/W/O) o agua-en-aceite-en-agua (W/O/W) (McClements *et al.*, 2007). Para la preparación de una emulsión $W_1/O/W_2$, primero se forma una emulsión primaria o interna (W_1/O), mediante el uso de emulsificantes de bajo peso molecular, en cuya fase acuosa u oleosa puede encontrarse solubilizado un principio activo. Posteriormente, la emulsión primaria es re-emulsificada en una dispersión acuosa de biopolímeros con actividad superficial, obteniéndose así una emulsión múltiple $W_1/O/W_2$ (Musashino *et al.*, 2001; Adachi *et al.*, 2001; Allouche *et al.*, 2003). Estabilizantes, tales como polisacáridos o surfactantes, usualmente son añadidos a la fase acuosa externa (W_2) de emulsiones alimenticias para mejorar la estabilidad al cremado y evitar la separación de fases (Knight y Caruana, 2007). La eficiencia para estabilizar las emulsiones, depende de la

concentración del polímero en la fase acuosa, así como también de las características estructurales de éste en el sistema acuoso. La formación de una estructura de gel débil del polímero en la fase continua, causa altas viscosidades en el rango de bajo estrés e imparte propiedades elásticas adicionales al sistema completo, así el cremado de la emulsión es fuertemente inhibido (McClements, 2000).

5.2.2 Estabilidad de las emulsiones

Una emulsión estable es aquella que no muestra cambios notables en el tamaño y la forma de sus gotas, en su estado de agregación o en el arreglo espacial a través de un tiempo de almacenamiento determinado (Dickinson, 2003). La estabilidad de las emulsiones depende de las propiedades fisicoquímicas de los compuestos que la integran, en especial de los emulsificantes. La amplia variedad de emulsificantes permite una gran diversificación de sus usos en emulsiones (Muguet *et al.*, 2001).

A continuación se mencionan los factores que intervienen en la estabilidad de emulsiones:

Estabilización por sólidos finamente divididos: Partículas pequeñas de sólidos (sales básicas de metales y fragmentos celulares de plantas) pueden estabilizar una emulsión. Estas partículas estabilizarán la emulsión si se localizan en la interfase de los dos líquidos, donde actuarán como barrera mecánica para

prevenir la coalescencia de las gotas. La distribución de las partículas sólidas en una emulsión depende de las tensiones de interfase del sistema, principalmente de la tensión entre sólido y agua (γ_{SW}); la tensión entre agua y aceite (γ_{WO}) y la tensión entre sólido y aceite (γ_{SO}) (Fennema, 2000). *Estabilización por macromoléculas:* Sustancias de elevado peso molecular (gomas y proteínas), son capaces de formar películas relativamente gruesas alrededor de las gotas de una emulsión, formando una barrera física contra la coalescencia. Cuando estas macromoléculas son proteínas, las moléculas se extienden y adsorben en la interfase, de forma que sus grupos no polares se orienten hacia la fase oleosa y los grupos polares lo hagan hacia la fase acuosa. El efecto estabilizante sobre la emulsión depende de las características reológicas o viscoelásticas y del grosor de la película proteínica (Fennema, 2000). Otro efecto de algunas macromoléculas consiste en el aumento de viscosidad de la fase continua, lo cual retarda los procesos de floculación y coalescencia. Para este último caso existe una amplia gama de polisacáridos que pueden ser utilizados (Fennema, 2000).

5.2.3 Inestabilidad de las emulsiones

El proceso de ruptura de las emulsiones puede ocurrir mediante cuatro mecanismos de inestabilidad diferentes:

Cremado. Se trata de un proceso causado por la acción de la gravedad y produce un gradiente vertical de concentración de las gotas, sin variar la distribución del tamaño de las mismas.

Floculación. Consiste en la adhesión de las gotas sin fusionarse y una vez más no existe una variación en la distribución de tamaño de gotas. El proceso de la floculación está controlado por un equilibrio global entre las fuerzas de atracción electrostáticas, de van der Waals, repulsivas, de tipo estérico y de hidratación.

Coalescencia. Involucra la fusión de gotas para crear gotas más grandes con la eliminación de parte de la interfase líquido/líquido. Este cambio irreversible requeriría un aporte extra de energía para restablecer la distribución de tamaño de partícula original.

Engrosamiento de gotas (Ostwald ripening). Se debe al crecimiento de las gotas más grandes a costa de las más pequeñas, hasta que estas últimas prácticamente desaparecen. Este proceso ocurre a una velocidad que es función de la solubilidad de la fase dispersa en la fase continua y se debe a que la presión interna de las gotas (presión de Laplace) es mayor en las gotas más pequeñas.

En general, el complejo proceso de la inestabilidad de las emulsiones suele ocurrir mediante la combinación de los cuatro posibles procesos de inestabilidad, los cuales pueden suceder simultáneamente a diferentes velocidades. De hecho, la mayoría de las veces, dos de los procesos anteriormente citados se suelen acoplar. Por ejemplo, las velocidades de flotación en las emulsiones diluidas son más rápidas en sistemas floculados que

en los no-floculados, debido al aumento del tamaño de partícula flotante en el primer caso (Aranberri, 2006).

5.3 Bases para helados

Una base para helados es una combinación de los ingredientes usados para su elaboración, a excepción del aire y de los saborizantes. La formulación de la mezcla es definida como los porcentajes de los constituyentes del helado; por ejemplo, porcentaje de grasa láctea, sólidos lácteos no grasos, estabilizantes/emulsificantes y sólidos totales. Todos estos ingredientes o componentes del helado pueden ser combinados en varias proporciones dentro de rangos aceptables; además una amplia variedad de ingredientes pueden ser seleccionados para suplir otros constituyentes de la mezcla; sin embargo, el porcentaje y el origen de un constituyente puede afectar la calidad de la mezcla (Marshall *et al.*, 2003).

La base para helado contiene principalmente grasa, proteínas, azúcares y agua; una formulación tradicional contiene 10% de grasa de leche o de origen vegetal; 10% de sólidos no grasos de leche, los cuales son principalmente proteínas lácteas o suero en polvo y 15% de edulcorantes. Dependiendo de su origen, la grasa muestra rangos de temperatura de cristalización y de hidrofobicidad muy diferentes. Una grasa láctea típica funde entre -15 y 35 °C y por lo tanto contiene fracciones líquidas durante el proceso de elaboración del helado. Las proteínas interactúan con la grasa en la mezcla y con el aire incorporado

durante la elaboración del helado; estas interacciones pueden ser afectadas por la selección de las proteínas y sus grados de desnaturalización. Como edulcorantes se usan azúcar y jarabe de maíz, los cuales son usualmente combinados para obtener el grado de dulzor deseable y ajustar el punto de congelación de la mezcla (Eisner *et al.*, 2005).

La mezcla para helado es pasteurizada y homogenizada a temperaturas de alrededor de 75-80 °C, bajo las cuales toda la grasa se encuentra en estado líquido, y es subsecuentemente enfriada a 4 °C. La emulsificación rinde gotas pequeñas de grasa dispersas, con diámetros promedio de 2 µm, como resultado de aumentos en la superficie de las gotas de grasa y la subsecuente adsorción de los surfactantes en su superficie. Durante las primeras 4 h de almacenamiento de la mezcla a 4 °C, la grasa se cristaliza, ocurriendo simultáneamente rearreglos de las proteínas y de los emulsificantes en la superficie de los glóbulos de grasa mediante mecanismos de competencia a través de los cuales las proteínas son reemplazadas por emulsificantes de bajo peso molecular (Goff, 1997; Eisner *et al.*, 2005).

5.4 Helado

El helado es definido como un sistema alimenticio polifásico que incluye cristales de hielo; burbujas de aire; glóbulos de grasa aislados, parcialmente coalescidos; grasa cristalizada y una fase acuosa crioconcentrada conteniendo azúcares, proteínas y polisacáridos (Goff, 1997; Goff *et al.*, 1999; Goff, 2002; Granger *et*

al., 2004; Eisner, 2005). La elaboración del helado comienza con la formulación de la mezcla, pasteurización, homogenización y enfriamiento de la misma, seguido por el batido y congelamiento (Marshall *et al.*, 2003). El batido y el proceso de congelación, involucran numerosos cambios físicos, incluyendo la acción de proteínas y surfactantes para formar la fase espumosa; la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa en la emulsión, causa la adsorción de la grasa en la interface del aire y la formación de agregados de glóbulos de grasa que estabilizan a las burbujas de aire (Bollinger *et al.*, 2000; Goff, 2002). La estructura y la textura del helado se forma principalmente durante el congelamiento y endurecimiento, pero también es afectado por el almacenamiento (Wildmoser *et al.*, 2004).

La estructura desarrollada en el helado, es atribuida a las macromoléculas presentes en la mezcla, tales como la grasa láctea y carbohidratos complejos (Adapa, *et al.*, 2000). La grasa láctea interactúa con los otros ingredientes para desarrollar la textura, la cremosidad y la sensación global de lubricidad (Giese, 1996; Akoh, 1998). El tipo y la cantidad de grasa influyen sobre las características de los helados resultantes por afectar sus propiedades reológicas. Típicamente el helado contiene de 10 a 16 % de grasa, pero en los últimos años algunos manufactureros han reducido la cantidad de grasa y la han reemplazado con carbohidratos o proteínas (Giese, 1996).

5.5 Grasa láctea

Los lípidos están presentes en la leche en forma de glóbulos microscópicos formando una emulsión aceite-en-agua (MacGibbon y Taylor, 2006). El glóbulo de grasa de la leche, consiste de cadenas de triglicéridos rodeadas por una delgada membrana llamada membrana del glóbulo de grasa de la leche (MFGM, por sus siglas en inglés). Esta membrana actúa como emulsificante y protege a los glóbulos de la coalescencia y de la degradación enzimática. La membrana del glóbulo de grasa está altamente estructurada y contiene lípidos polares y una membrana proteínica específica, principalmente constituida por glicoproteínas, fosfolípidos y esfingolípidos. Estos últimos son moléculas anfifílicas con una cola hidrofóbica y una cabeza hidrofílica (Dewettinck *et al.*, 2008). Se ha establecido que la grasa contribuye fuertemente a las características texturales de muchos productos lácteos, incluyendo el helado (Michalski *et al.*, 2002).

5.6 Sustitutos de grasa

Existen varias definiciones para sustituto de grasa, tal como la siguiente: un sustituto de grasa es una sustancia que presenta propiedades funcionales semejantes a las de las grasas. Los sustitutos de grasa se clasifican en dos grupos: sustitutos de grasa e imitadores de grasa. Entre los primeros se encuentran macromoléculas que física y químicamente semejan triglicéridos y

teóricamente reemplazan a la grasa en los alimentos; son estables a temperaturas de cocción y a temperaturas de freído (grasas convencionales y aceites). A la segunda clase, imitadores de grasa, pertenecen las sustancias que imitan sensorial y físicamente las propiedades de los triglicéridos, pero que no pueden reemplazar a la grasa en relaciones de masa 1:1; en esta categoría se encuentran los sustitutos de grasa de base proteínica o sácarida (Akoh, 1998).

Crear y estabilizar la estructura deseada en postres congelados bajos en grasa es difícil, debido a que la fracción grasa agregada es disminuida, mientras que la fracción proteínica puede ser incrementada. En el helado se han usado combinaciones de ingredientes para reemplazar la textura y sabor de la grasa; estos ingredientes pueden ser, carbohidratos, proteínas, combinación de emulsificantes, maltodextrinas, etc. El uso de estos ingredientes como sustitutos de grasa aumenta el componente viscoso, afectando o no al componente elástico; asimismo estos ingredientes influyen en la capacidad de batido de la mezcla, ocasionando la obtención de un porcentaje de overrun relativamente bajo (Marshall *et al.* 2003; Adapa *et al.* 2000).

La aplicación de emulsiones múltiples como sustitutos de la grasa láctea en productos lácteos como quesos y en productos lácteos en general, es promisorio y constituye una alternativa para la sustitución de la grasa en dichos productos, sin menoscabo de sus propiedades mecánico-sensoriales (Lobato-Calleros *et al.*, 2006).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Formulación y preparación de las emulsiones múltiples

Se formularon dos variaciones de emulsiones múltiples del tipo $W_1/O/W_2$ (E), que variaron en la composición de su fase acuosa externa (W_2): E_{PBM} , dispersión acuosa de pectina de bajo metoxilo (Genu® pectin LM-104 AS, 27 % de grado de esterificación, Cp Kelco, S.A. de C.V., México) (2 g/100 g de emulsión múltiple) y E_{PAM} , pectina de alto metoxilo (67 % de grado de esterificación) (Quimica Laitz, S.A. de C.V., México) (2 g/100 g de emulsión múltiple). La fase acuosa interna (W_1) de ambas variaciones de emulsiones, estuvo constituida por agua destilada conteniendo carboximetilcelulosa (CMC) (0.1g/100 g de emulsión sencilla) (CMC® CEROL 50 000, Grupo Dermat, S.A. de C.V. México). La fase oleosa (O) a su vez, estuvo constituida por aceite de canola (AC) (Capullo®, Unilever de México, S.A. de C.V.).

Las emulsiones múltiples se prepararon a temperatura ambiente (20 ± 2 °C), usando un procedimiento de emulsificación en dos etapas (Musashino *et al.*, 2001). En la primera etapa se preparó la emulsión interna o primaria (W_1/O), utilizando para ello un emulsificante de bajo peso molecular hidrofílico (EH; mono y diglicéridos esterificados con ácido diacetiltartárico, Panodan® SDK Datem, Danisco, S.A. de C.V., México) (1.6 g/ 100 g de emulsión sencilla) y un emulsificante lipofílico (EL; ricinoleato de propilénglicol, Grinsted® PGPR 90,

Danisco, S.A. de C.V., México) (6.4 g/ 100 g de emulsión sencilla). La emulsión W_1/O estuvo constituida por 30 % (p/p) de fase acuosa interna (W_1) (agua destilada + CMC + EH) y 70 % (p/p) de fase oleosa (O) (AC + EL). En todos los casos la fase acuosa interna (W_1) se adicionó gota a gota a la fase oleosa (O) mantenida en baño de hielo, mediante un homogenizador (Ultra-turrax® T50 basic IKA Works, Inc., Wilmington, EUA) operado a 6400 rpm por 5 min. En la segunda etapa, la emulsión interna (W_1/O) fue re-emulsificada en la dispersión acuosa de pectinas respectiva (W_2); estas últimas se prepararon previamente a temperatura ambiente (20 ± 2 °C), aplicando agitación hasta dispersión completa de la pectina en particular. La emulsión interna se incorporó gota a gota a la dispersión acuosa de pectina, mediante el homogenizador, operado a 5200 rpm durante 3 min. Las emulsiones múltiples contuvieron 30 % (p/p) de fase dispersa o emulsión interna (W_1/O) y 70 % (p/p) de dispersión acuosa de pectina, resultando en una concentración final de AC igual a 21 % (p/p). Las emulsiones E_{PBM} y E_{PAM} , se prepararon por triplicado, usando un diseño completamente al azar.

6.2 Evaluación de las emulsiones

Se tomaron 2 mL de emulsión interna, se diluyeron adicionando 20 mL de aceite vegetal (Lobato-Calleros *et al.*, 2006) y se observaron bajo el microscopio óptico usando un dispositivo de microfotografía U-TV1 X. Mediante el procedimiento antes descrito se verificó visualmente la formación de las emulsiones y se

tomaron fotografías de las mismas en distintas zonas de manera aleatoria con una cámara digital Camedia C-3030 (Olympus Optical Co. LTD).

Se midió el diámetro volumétrico-superficial medio ($D_{3,2}$) de las gotas de las emulsiones múltiples, por triplicado, usando un equipo analizador de tamaño de partícula y gota Malvern serie 2600 (Malvern Instruments, Malvern, Worcs., Reino Unido).

Para la evaluación de la morfología y el diámetro volumétrico-superficial medio ($D_{3,2}$) de las gotas de aceite de las emulsiones múltiples se siguió un procedimiento similar al usado en las emulsiones internas, usando agua destilada como medio de dilución (Garti, 1997). Adicionalmente se determinó la tasa de coalescencia de las emulsiones múltiples, para lo cual se mantuvieron bajo refrigeración (4 ± 1 °C) y analizaron variaciones en el $D_{3,2}$ de sus gotas de aceite cada hora, durante 24 h.

La tasa de coalescencia se define como el tiempo que tarda la fase dispersa en aumentar su tamaño al unirse unas gotas con otras y permite conocer el grado de estabilidad de la emulsión. La constante de coalescencia (C), se calculó a partir de la tasa de cambio en el número de gotas de aceite/mL de la emulsión con el tiempo (N_t), utilizando las siguientes ecuaciones:

$$N_t = N_0 e^{(-Ct)}$$

$$N_t = 6\phi 10^{12} / \pi (D_{3,2} t)^3$$

Donde: N_0 , es el número de gotas inicial (1 h después de elaboradas las emulsiones)

ϕ , es la fracción volumétrica de la fase oleosa (0.3 para este caso).

$D_{3,2}(t)$, es el diámetro volumétrico superficial medio (μm) en el tiempo

t , es el tiempo (s) de prueba

C , es la constante de coalescencia (s^{-1})

Para cada emulsión se graficó $\ln N_t$ contra tiempo (s), obteniéndose rectas, cuyas pendientes correspondieron a los valores de la constante de coalescencia C (s^{-1}) de las emulsiones; a partir de estos valores, las emulsiones se clasificaron en: muy estables ($<10^{-11}$), estables (10^{-6} - 10^{-11}) e inestables ($>10^{-6}$) (Sherman, 1968).

6.3 Formulación y preparación de las bases para helado

Se formularon 6 variaciones de base para helado (BH), que difirieron en la naturaleza y el contenido de su fracción grasa: BH_{CG} , completa en grasa, usada como control (10 % grasa butírica, GL) (99.95 % de grasa, Cytec, S.A de C.V., México D.F); BH_{BG} , baja en grasa, usada como control (5 % grasa butírica); $\text{BH}_{5.0\text{GL}+5.0\text{EPBM}}$ (5 % de grasa butírica + 5 % de EM_{PBM}); $\text{BH}_{0\text{GL}+10\text{EPBM}}$ (0 % GL + 10 % EM_{PBM}); $\text{BH}_{5.0\text{GL}+5.0\text{EPAM}}$ (5 % de grasa butírica + 5 % de EM_{PAM}) y $\text{BH}_{0\text{GL}+10\text{EPAM}}$ (0 % GL + 10 % EM_{PAM}). Todas las BH, estuvieron constituidas por 10 % de sólidos no grasos de leche (SNGL) (8 % leche descremada en polvo y 2 % suero de leche en polvo) (Lactomix®, DILAC, S.A. de C.V. México), 14 % de azúcar, 2.5 % de sólidos de jarabe de maíz (36 DE) (CT-B1 AH1, Cytec, S.A

de C.V., México D.F) y 0.32 % de una mezcla de estabilizante-emulsificante (46.87 % de carboximetilcelulosa, 46.88 % de glicepol y 6.25 % de k-carragenina). La cantidad de agua para las bases fue de 63.2 %, a excepción de la base BH_{BG}, a la que se incorporó 68.2 % de agua.

Unidades experimentales de 10 L de base para helados de cada variación se elaboraron por triplicado, usando un diseño completamente al azar. El proceso de elaboración de las BH, consistió en: calentamiento de la cantidad de agua correspondiente, a una temperatura de $45 \pm 1^\circ \text{C}$; adición de los sólidos no grasos y mezclado mediante un agitador caframo a 880 rpm (CAFRAMO modelo RZR1, Cole-Parmer, Vernon Hills, IL, EUA); incorporación de la grasa butírica mediante el agitador caframo a 880 rpm; calentamiento de la mezcla a $70 \pm 1^\circ \text{C}$, por 20 min; enfriamiento de la mezcla a $50 \pm 1^\circ \text{C}$; homogenización a 12.260 MPa (homogenizador Gaulin modelo 15M8TBASMD, Gaulin Corporation Everett, Massachusetts, EUA); enfriamiento a $35 \pm 1^\circ \text{C}$ y almacenamiento a 4°C durante 24 h.

Las cantidades correspondientes de emulsión múltiple se adicionaron a las bases después de su maduración (24 h) mediante agitación continua usando un agitador caframo a 880 rpm durante 2 minutos.

6.4 Análisis químico proximal de las bases para helados

A los dos días de elaboradas, las BH se sometieron a determinaciones de proteína (método Kjeldahl), grasa (método de Gerber para crema) y humedad (método de secado a la estufa) (AOAC, 1995). El contenido de proteína fue obtenido multiplicando el nitrógeno total por un factor de 6.38. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

6.5 Determinaciones reológicas de las bases para helado

Las BH se sometieron a pruebas oscilatorias dinámicas en un reómetro Physica MCR 301 Dynamic Shear Rheometer (Antón Paar Messtechnik, Stuttgart, Alemania). La geometría usada fue una de cono-plato, en la cual el cono rotatorio tuvo 50 mm de diámetro y un ángulo de 1° (CP50-1-SN5550). La distancia entre cono y plato se fijó en 0.051 mm. Muestras de las bases (3.8 mL) se colocaron cuidadosamente en el plato, dejándose reposar por 3 min para que la estructura se recuperara; posteriormente se sometieron a barridos de amplitud para determinar la región viscoelástica lineal, manteniendo una temperatura de $4 \pm 0.1^\circ\text{C}$ (control de temperatura Physica TEK 150P (Physica Messtechnik, Stuttgart, Alemania) y aplicando una deformación de 0.02 a 100 % a una frecuencia de 1 Hz. Mediante el software RheoPlus/32 V2.62, se obtuvieron los valores del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) de las bases para helado.

Además se realizaron pruebas rotatorias de flujo a las BH, en las cuales se aplicaron velocidades de cizalla de 0.01 hasta 300 s⁻¹. Los datos generados de las curvas de flujo (velocidad de cizalla contra viscosidad) de las BH, se analizaron con el paquete Rheoplus. Todas las mediciones se llevarán a cabo por triplicado a 3 días de elaboradas las BH.

6.6 Preparación de las variaciones de helado

Se elaboraron lotes de helado, a partir de las distintas variaciones de bases (5 L) a una temperatura de -10 °C con incorporación de aire, usando una máquina automática elaboradora de helados con batidora e integración de frío Taylor (modelo B733-32, Tekni-Craft, Rockton, IL). Una vez obtenido el producto, se procedió a su congelamiento a temperaturas de -20 °C durante 24 h en un congelador Torrey (Torrey modelo CH25, Comercializadora Internacional Torrey, S.A de C.V, Guadalupe Nuevo León, México). Los códigos asignados a los helados fueron los mismos usados para las bases, cambiando únicamente BH por H. Las variaciones de helado se prepararon por triplicado, usando un diseño completamente al azar.

6.7 Determinación de overrun y velocidad de fundido de los helados

El porcentaje de overrun en los helados se calculó de acuerdo a la fórmula descrita por Marshall *et al.* (2003).

Para la determinación de la velocidad de fundido de los helados, muestras de cada variación se endurecieron durante 24 h a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; después de lo cual se atemperaron a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante toda la noche. Se colocaron 100 mL de cada muestra de helado sobre mallas de acero inoxidable con perforaciones de 2 mm; la fase fundida fue colectada en pequeños vasos de precipitados de 100 mL y su volumen fue medido usando un tubo graduado de 10 mL, cada 10 min durante una hora (Ohmes *et al.*, 1998; Sofjan y Hartel, 2004).

6.8 Determinaciones reológicas de las variaciones de helado

Las variaciones de helado se sometieron a pruebas oscilatorias dinámicas en un reómetro Physica MCR 301 Dynamic Shear Rheometer (Antón Paar Messtechnik, Stuttgart, Alemania). La geometría usada fue una de cono-plato, en la cual el cono rotatorio tuvo un diámetro de 50 mm y un ángulo de 1° (CP50-1-SN5550). La distancia entre cono y plato se fijó en 2 mm. Muestras de cada variación de helado (alrededor de 9 mL), se sometieron a barridos de amplitud para determinar la región viscoelástica lineal, manteniendo una temperatura de $-10 \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (control de temperatura Physica TEK 150P (Physica Messtechnik, Stuttgart, Alemania) y aplicando una deformación de 0.001 a 50 %, a una frecuencia de 1 Hz. Mediante el software RheoPlus/32 V2.62, se obtuvieron los valores del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) de los helados. Todas las mediciones se llevaron a cabo por triplicado a los seis días de elaborados los helados.

6.9 Análisis sensorial de los helados

Se aplicó una prueba de aceptabilidad global y por atributos a las variaciones de los helados, en la que participaron 60 personas no entrenadas (36 hombres y 24 mujeres, de edades entre 15 y 25 años), todos estudiantes de la Universidad Autónoma Chapingo. A las personas participantes, se les proporcionaron, en orden aleatorio, muestras de 15 mL de las diferentes variaciones de helado (-15 °C) en pequeños vasos de plástico, codificadas con números aleatorios de tres dígitos, en orden aleatorio, y se les solicitó que indicaran el grado de aceptabilidad de cada una de ellas; para ello se utilizó una escala hedónica de 9 puntos en donde: 1= me disgusta extremadamente, 2= me disgusta mucho, 3= me disgusta moderadamente, 4=me disgusta poco, 5= ni me disgusta ni me gusta, 6= me gusta poco, 7= me gusta moderadamente, 8= me gusta mucho y 9 = me gusta extremadamente (Patel *et al.*, 2006).

6.10 Análisis de datos

Los datos relativos a composición química, overrun, velocidad de fundido, comportamiento reológico y aceptabilidad de los atributos sensoriales de las bases y/o helados, se sometieron a Análisis de Varianza de Clasificación Simple ($p \leq 0.05$) y se aplicó prueba de Tukey de comparación de medias ($p \leq 0.05$) en los casos pertinentes. Los datos de la evaluación sensorial se analizaron mediante Análisis de Varianza, aplicando un diseño de bloques completamente aleatorizados. El paquete estadístico usado para los análisis de varianza fue el paquete SAS versión 9 en español (Instituto SAS, 2002). Un Análisis de

Componentes Principales (ACP) se efectuó sobre los valores de aceptación de los atributos sensoriales de los helados y la composición porcentual de su fracción grasa (grasa láctea y/o emulsión múltiple estabilizada por pectina de alto o bajo metoxilo). El ACP se realizó mediante el paquete estadístico Statgraphics Plus software (Statistical Graphics Corp., Manugistics, Inc., Cambridge, MA, EUA).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Morfología y tamaño de las gotas de las emulsiones múltiples

La emulsión interna (W_1/O) $\phi_{1=0.3}$ (Fig. 1) estuvo constituida por pequeñas gotas de agua distribuidas individualmente en la fase oleosa continua. La estabilidad de las emulsiones depende de la distribución de los tamaños de las gotas, el estado de agregación de las mismas y de la reología de la fase continua. La distribución de las gotas es determinada principalmente por la energía aplicada durante la emulsificación y por la naturaleza y la cantidad del agente emulsificante (Dickinson, 1992). Para el caso específico de emulsiones W/O, la acción del emulsificante lipofílico es muy importante, ya que la fase continua es de carácter oleoso. Los emulsificantes, debido a su carácter amfifílico, migran rápidamente a la interfase y cubren la superficie de las gotas, proporcionando una barrera que reduce la oportunidad de que dos gotas sufran coalescencia al chocar (Pomeranz, 1991). Durante la preparación de las emulsiones internas

W_1/O , las moléculas del emulsificante lipofílico usado, ricinoleato de propiléniglicol, debieron difundirse rápidamente a la interfase agua-aceite, disminuyendo la tensión interfacial y confiriendo estabilidad a las gotas recién formadas. En emulsiones W/O , las cadenas lipofílicas de los emulsificantes lipofílicos adsorbidos a la superficie de las gotas de agua, penetran en la fase oleosa continua, ocurriendo interacciones hidrofóbicas emulsificante-fase oleosa; i.e., fuerzas de atracción de van der Waals. El proceso descrito, resulta en la formación de una película superficial que confiere estabilidad a la emulsión. La película del emulsificante lipofílico se extiende sobre el lado oleoso y la fase acuosa queda encerrada en forma de pequeñas gotas. En contraste, las moléculas del emulsificante hidrofílico usado, mono y diglicéridos esterificados con ácido diacetiltartárico, debieron difundirse lentamente a la interfase, penetrando preferentemente la fase acuosa mediante interacciones dipolo-dipolo (Pomeranz, 1991; Dickinson, 1992; Owusu y Zhu, 1996).

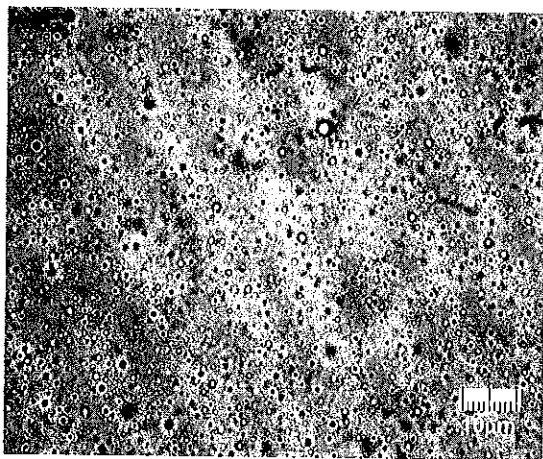


Figura 1. Microfotografía de glóbulos de emulsión interna (W_1/O). (Amplificación 100×).

Las emulsiones múltiples ($W_1/O/W_2$) consistieron de gotas de aceite de emulsión interna W_1/O ($\phi_1, 0.3$) conteniendo numerosas gotas pequeñas de agua,

dispersas en una fase acuosa externa W_2 ($\phi_{2, 0.3}$) (Fig. 2). La presencia de numerosas gotas de agua en las gotas de aceite, fue la característica morfológica que permitió clasificar a las emulsiones múltiples, como del tipo C. Cuando las gotas de emulsión interna contienen una sola gota de fase dispersa, la emulsión múltiple se clasifica como tipo A; cuando la emulsión interna contiene pocas gotas de fase dispersa, la emulsión múltiple se consideran de tipo B y cuando la emulsión interna contienen numerosas gotas de fase dispersa, la emulsión múltiple se clasifica como tipo C (Garti, 1997).

El uso de pectina de alto metoxilo (PAM) en la fase acuosa externa, en una concentración de 2 % (p/p), rindió la formación de gotas de emulsiones múltiples con un diámetro volumétrico-superficial medio ($D_{3,2}$) de $2.61 \pm 0.2 \mu\text{m}$ (Cuadro 1); mientras que la incorporación de pectina de bajo metoxilo (PBM) en la fase W_2 (2 % (p/p)) rindió gotas de emulsión múltiple $W_1/O/W_2$ con un diámetro $D_{3,2}$ de $2.37 \pm 0.0 \mu\text{m}$.

Kawakatsu *et al.* (2001) encontraron que a concentraciones de 0, 0.5 y 1 % de pectina de bajo metoxilo, el tamaño de las gotas de las emulsiones aceite-en-agua fue uniforme; sin embargo, a concentraciones de 2 % de pectina, el tamaño de las gotas fue irregular. Estos mismos autores, informaron que el tamaño medio de las gotas de una emulsión aceite-en-agua aumentó con incrementos en la viscosidad de la fase continua en la cual se usó una combinación de pectina de bajo metoxilo con un surfactante (Tween 20).

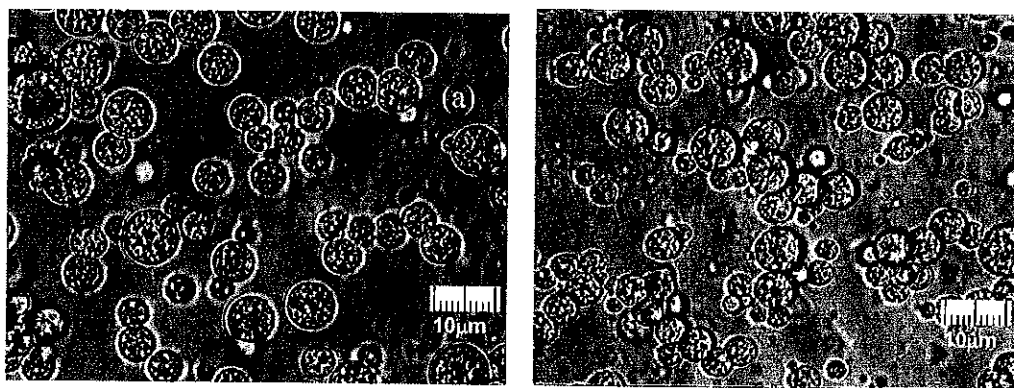


Figura 2. Microfotografías de los glóbulos de aceite de las emulsiones múltiples, conteniendo numerosas gotas de agua muy pequeñas en su interior: (a) E_{PAM} , emulsión conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa y (b) E_{PBM} , emulsión conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa. (Amplificación 100 x).

Los valores de tasa de coalescencia de las emulsiones (Cuadro 1) revelaron su carácter estable, de acuerdo con Sherman (1968). La emulsión E_{PBM} , presentó una tasa de coalescencia más baja (1.59×10^{-7}), que aquella exhibida por la emulsión E_{PAM} (4.32×10^{-6}); sin embargo, estadísticamente no presentaron diferencia significativa ($p > 0.05$) entre ellas.

Cuadro 1. Valores medios ($\pm$ DE) del diámetro volumétrico-superficial ($D_{3,2}$), después de 1 y 24 horas de almacenamiento, y tasa de coalescencia de las gotas de aceite de las emulsiones múltiples.

Código de la emulsión	$D_{3,2}$ inicial (1 h) (μm)	$D_{3,2}$ final (24 h) (μm)	Tasa de coalescencia (s^{-1})
E_{PAM}	$2.73 \pm 0.03^{a,A}$	$2.40 \pm 0.2^{b,A}$	$4.32E^{-06B}$
E_{PBM}	$2.38 \pm 0.2^{a,B}$	$2.38 \pm 0.1^{a,A}$	$1.59E^{-07B}$

PAM, pectina de alto metoxilo; PBM, pectina de bajo metoxilo.

^{a,b}Superíndices distintos en la misma fila, indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$).

^{A,B}Superíndices distintos en la misma columna, indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$).

7.2 Composición química proximal de las bases para helados

Variaciones en la naturaleza y contenido de la fracción grasa de las bases para helados, resultaron en diferencias ($p \leq 0.05$) en sus contenidos de grasa, sólidos totales y humedad y sólidos no grasos, pero no mostraron diferencias en proteína ($p > 0.05$) (Cuadro 2). El contenido graso de las bases para helado disminuyó en el siguiente orden: $BH_{CG} > BH_{5.0GL+5.0EPBM}$, $BH_{5.0GL+5.0EPAM} > BH_{BG} > BH_{0GL+10EPBM}$, $BH_{0GL+10EPAM}$ (Cuadro 2). Los contenidos grasos de las bases, fueron acordes a las cantidades de grasa láctea y/o aceite de canola emulsionado, incorporadas en sus formulaciones. La base BH_{CG} mostró un contenido de sólidos totales significativamente mayor y un contenido de humedad significativamente menor, que el resto de las bases, como consecuencia de su mayor contenido graso (Cuadro 2). La base BH_{CG} exhibió un contenido de sólidos no grasos comparable ($p > 0.05$) a aquellos observados en las bases $BH_{0GL+10EPBM}$ y $BH_{0GL+10EPAM}$, incorporadas con emulsiones múltiples en sustitución total de la grasa láctea. Cabe señalar que las emulsiones múltiples contuvieron 2 g de pectina de alto metoxilo o de bajo metoxilo/100 g. El resto de las bases para helado presentaron contenidos de sólidos no grasos menores ($p \leq 0.05$) al exhibido por la base BH_{CG} (Cuadro 2). No se observaron diferencias significativas en el contenido de proteína de las bases para helado (Cuadro 2).

Patel *et al.* (2006), mencionaron que cuando se endurecen helados a la misma temperatura de almacenamiento, aquellos con menor contenido de sólidos totales contienen más agua para ser congelada, en comparación con aquellos

con un contenido elevado de sólidos totales. Flores y Goff (1999) informaron que el tamaño y la distribución de los cristales de hielo en los helados, están relacionados con el contenido de sólidos totales; a menor contenido de sólidos, cristales de hielo más grandes son formados.. Donhowe *et al.* (1991) encontraron que los helados con menos sólidos totales tienen cristales de hielo mayores.

Cuadro 2. Composición química de las bases para helados

Código de la base para helados	Grasa (% b.h.)	Sólidos totales (%)	Humedad (%)	Sólidos no grasos (% b.h.)	Proteína (% b.h.)
BH _{CG}	10.0 ± 0.0 ^a	37.4 ± 0.2 ^a	62.6 ± 0.2 ^d	27.4 ± 0.2 ^{ab}	3.5 ± 0.3 ^a
BH _{BG}	5.0 ± 0.0 ^c	31.9 ± 0.0 ^c	68.1 ± 0.0 ^b	26.9 ± 0.0 ^b	3.5 ± 0.1 ^a
BH _{5.0GL+5.0EPBM}	6.0 ± 0.1 ^b	32.9 ± 0.3 ^b	67.1 ± 0.3 ^c	26.9 ± 0.3 ^b	3.6 ± 0.5 ^a
BH _{0GL+10EPBM}	2.0 ± 0.3 ^d	29.7 ± 0.2 ^d	70.3 ± 0.2 ^a	27.7 ± 0.2 ^{ab}	3.6 ± 0.3 ^a
BH _{5.0GL+5.0EPAM}	6.0 ± 0.2 ^b	32.9 ± 0.2 ^b	67.1 ± 0.2 ^c	26.9 ± 0.1 ^b	3.5 ± 0.5 ^a
BH _{0GL+10EPAM}	2.0 ± 0.1 ^d	29.8 ± 0.1 ^d	70.2 ± 0.1 ^a	27.8 ± 0.1 ^a	3.7 ± 0.2 ^a

EPBM, emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; EPAM, emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; BH_{CG}, completa en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); BH_{BG}, baja en grasa control, (5 % GL); BH_{5.0GL+5.0EPBM} (5 % GL + 5 % EPBM); BH_{0GL+10EPBM} (0 % GL + 10 % EPBM); BH_{5.0GL+5.0EPAM} (5 % GL + 5 % de EPAM) y BH_{0GL+10EPAM} (0 % GL + 10 % EPAM).

^{a,b,c,d} Superíndices distintos en la misma columna, indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$).

7.3 Comportamiento reológico de las bases para helados

En las figuras 3 y 4 se presenta la variación de los valores de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') de las bases para helados, en función de la deformación. En estas figuras, puede observarse que los módulos G' y G'' mostraron dos tipos de comportamiento, de acuerdo a la composición de las bases (BH): (a) valores relativamente elevados y estables a bajas deformaciones (menores del 1 %), seguidos por una disminución pronunciada de los mismos, a deformaciones mayores del 1% y (b) valores relativamente bajos y estables en todo el rango de deformación estudiado. Las bases que mostraron el comportamiento (a), fueron: BH_{CG} , BH_{BG} y $BH_{5.0GL+5.0EPAM}$; mientras que las bases que presentaron el comportamiento (b) fueron: $BH_{0GL+10EPBM}$, $BH_{0GL+10EPAM}$ y $BH_{5.0GL+5.0EPBM}$ (Figs. 3 y 4). Los valores de G' y G'' más elevados de las bases conteniendo solo GL y aquella conteniendo 5 % de GL y 5 % de $EPAM$, en comparación con aquellos del resto de las BH, parecen indicar que la presencia de GL desempeñó un papel importante en las propiedades reológicas de las BH. La GL se encontraba en estado sólido a la temperatura de prueba; por el contrario, el aceite de canola emulsionado se encontró en estado líquido. Lo anterior, pudo estar relacionado con valores más elevados de G' y G'' y la necesidad de aplicar cierta deformación para que las bases conteniendo GL comenzarán a comportarse predominantemente como fluidos. En contraste, las bases exentas de GL y aquella conteniendo 5 % de GL y 5 % de la emulsión $EPBM$, presentaron comportamiento fluido en el rango de deformación estudiado. Lobato-Calleros *et al.* (2002), informaron que la sustitución de la grasa láctea

por aceites vegetales poliinsaturados emulsionados, resulta en quesos con características mecánicas menores que aquellas exhibidas por su contraparte completa en grasa, probablemente debido al estado líquido y menor punto de fusión de los aceites vegetales.

La base BH_{CG} , completa en grasa láctea, mostró valores de G' mayores que los de G'' hasta una deformación menor del 3 %; en este punto las curvas de ambos módulos se cruzaron y a valores de deformación mayores del 3 %, los valores de G'' fueron mayores que aquellos de G' (Figs. 3 y 4). El punto de cruce de G' y G'' , indica el cambio de comportamiento de la base de predominantemente elástico a predominantemente viscoso, debido a la conversión de la estructura en una dispersión viscosa de partículas (Lee y Lucey, 2006). Los módulos G' y G'' de la base BH_{BG} , conteniendo 5 % de GL, presentaron el mismo comportamiento que aquellos de la base BH_{CG} (Figs. 3 y 4). Por su parte, la base $BH_{5.0GL+5.0EPAM}$, presentó valores de G' mayores a G'' hasta una deformación de 7 %, después de este valor exhibió comportamiento predominantemente viscoso ($G'' > G'$). En el resto de las bases, se identificó un comportamiento predominantemente viscoso en todo el rango de deformación estudiada; resultados que parecen concordar con el efecto mencionado del estado físico de la fracción grasa de las bases. La excepción a este comportamiento lo presentó la base $BH_{5.0GL+5.0EPBM}$, indicando ello una menor funcionalidad de la emulsión E_{PBM} en este sistema, debido probablemente a alteraciones en el estado de dispersión de las gotas de la emulsión, causadas

por la capacidad de interacción entre iones calcio de la leche y la pectina de bajo metoxilo usada para su estabilización.

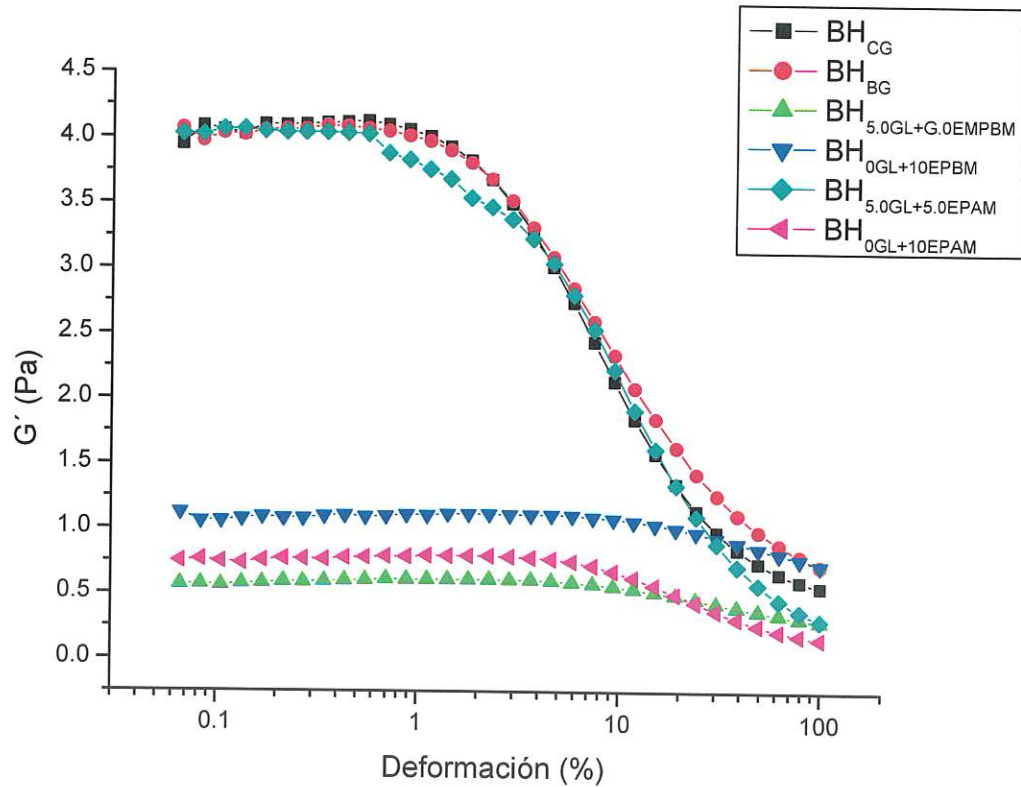


Figura 3. Variación del módulo de almacenamiento (G') de las diferentes bases para helados, en función de la deformación. E_{PBM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; BH_{CG} , completa en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); BH_{BG} , baja en grasa control, (5 % GL); $BH_{5.0GL+5.0EPBM}$ (5 % GL + 5 % E_{PBM}); $BH_{0GL+10EPBM}$ (0 % GL + 10 % E_{PBM}); $BH_{5.0GL+5.0EPAM}$ (5 % GL + 5% de E_{PAM}) y $BH_{0GL+10EPAM}$ (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

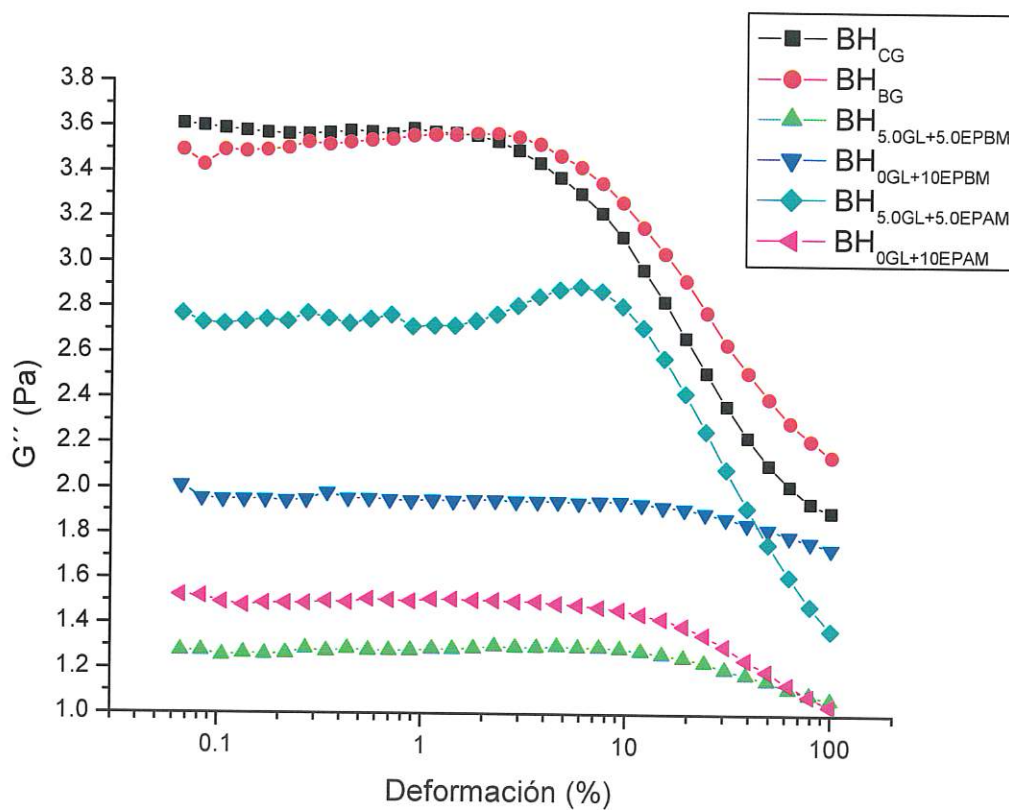


Figura 4. Variación del módulo de pérdida (G'') de las diferentes bases para helados, en función de la deformación. E_{PBM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; BH_{CG} , completa en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); BH_{BG} , baja en grasa control, (5 % GL); $BH_{5.0GL+5.0EPBM}$ (5 % GL + 5 % E_{PBM}); $BH_{0GL+10EPBM}$ (0 % GL + 10 % E_{PBM}); $BH_{5.0GL+5.0EPAM}$ (5 % GL + 5 % de E_{PAM}) y $BH_{0GL+10EPAM}$ (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

En el cuadro 3, se encuentran los valores de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G''), así como los del factor de cedencia $\tan \delta$ (G''/G') de las BH, correspondientes a la zona viscoelástica lineal. Las bases para helados BH_{CG} , BH_{BG} y $BH_{5.0GL+5.0EPAM}$, mostraron en general valores de G' y G'' significativamente mayores que aquellos del resto de las BH. En lo que se refiere a los valores de $\tan \delta$, estos tendieron a incrementar conforme el contenido de GL disminuyó en las bases, verificando de esta manera que la

mezcla con mayor contenido de GL, resultó en un sistema que responde más elásticamente, que las mezclas que contienen bajos contenidos de GL. Adapa *et al.* (2000) encontraron un comportamiento similar de los valores de Tan δ en mezclas para helados a las que se sustituyó la GL por sustitutos de base proteínica y sacárida (Dairy-Lo, celulosa microcristalina y goma guar).

Cuadro 3. Valores medios ($\pm$ DE) del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y tan δ de las bases para helados, en la zona de comportamiento viscoelástico lineal.

Código de la base para helado	G' (Pa)	G'' (Pa)	Tan δ (relación)
BH _{CG}	4.15 $\pm$ 0.0 ^a	3.57 $\pm$ 0.1 ^a	0.87 $\pm$ 0.0 ^{bc}
BH _{BG}	4.06 $\pm$ 0.4 ^a	3.52 $\pm$ 0.2 ^a	0.86 $\pm$ 0.0 ^{bc}
BH _{5.0GL+5.0EPBM}	0.59 $\pm$ 0.2 ^b	1.27 $\pm$ 0.0 ^c	2.24 $\pm$ 0.6 ^a
BH _{0GL+10EPBM}	1.09 $\pm$ 0.1 ^b	1.96 $\pm$ 0.1 ^{bc}	1.80 $\pm$ 0.0 ^{ab}
BH _{5.0GL+5.0EPAM}	4.14 $\pm$ 1.4 ^a	2.81 $\pm$ 0.6 ^{ab}	0.69 $\pm$ 0.1 ^c
BH _{0GL+10EPAM}	0.76 $\pm$ 0.0 ^b	1.49 $\pm$ 0.0 ^c	1.96 $\pm$ 0.1 ^a

EPBM, emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; EPAM, emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; BH_{CG}, completa en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); BH_{BG}, baja en grasa control, (5 % GL); BH_{5.0GL+5.0EPBM} (5 % GL + 5 % EPBM); BH_{0GL+10EPBM} (0 % GL + 10 % EPBM); BH_{5.0GL+5.0EPAM} (5 % GL + 5% de EPAM) y BH_{0GL+10EPAM} (0 % GL + 10 % EPAM).

^{a,b,c}Superíndices distintos en la misma columna, indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$).

7.3.1 Comportamiento de flujo

La viscosidad de las bases para helados es un parámetro importante en la determinación del comportamiento de flujo. Muchos factores contribuyen a la viscosidad de la base para helados; los hidrocoloides presentes en estos

sistemas interactúan con el agua y los otros solutos y juegan un papel muy importante en su viscosidad. La viscosidad es crítica para la determinación del comportamiento de flujo durante el paso de la base a través de un tubo durante la pasteurización continua, el cual es un paso intermedio durante el procesamiento de la base para helados (Goff *et al.*, 1994). Asimismo, la viscosidad es considerada como una característica importante de las BH y es acompañada por un cuerpo y textura deseables del helado. Los valores de viscosidad de una base están influenciados principalmente por la grasa y los estabilizantes (Marshall y Arbuckle, 1996).

En esta investigación el modelo usado para caracterizar la viscosidad de las diferentes bases fue el de Herschel-Bulkley, ya que los datos de comportamiento de flujo de todas ellas se ajustaron con valores de R^2 de 0.99 a dicho modelo. La ecuación del modelo de Herschel-Bulkley de acuerdo a Steffe (1996) es:

$$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n$$

Donde: σ es el esfuerzo cortante (Pa); $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla (s^{-1}); K es un índice de consistencia ($Pa \cdot s^n$); n es un número adimensional que indica la cercanía al flujo Newtoniano ($n=1$), también llamado índice de comportamiento de flujo y σ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa).

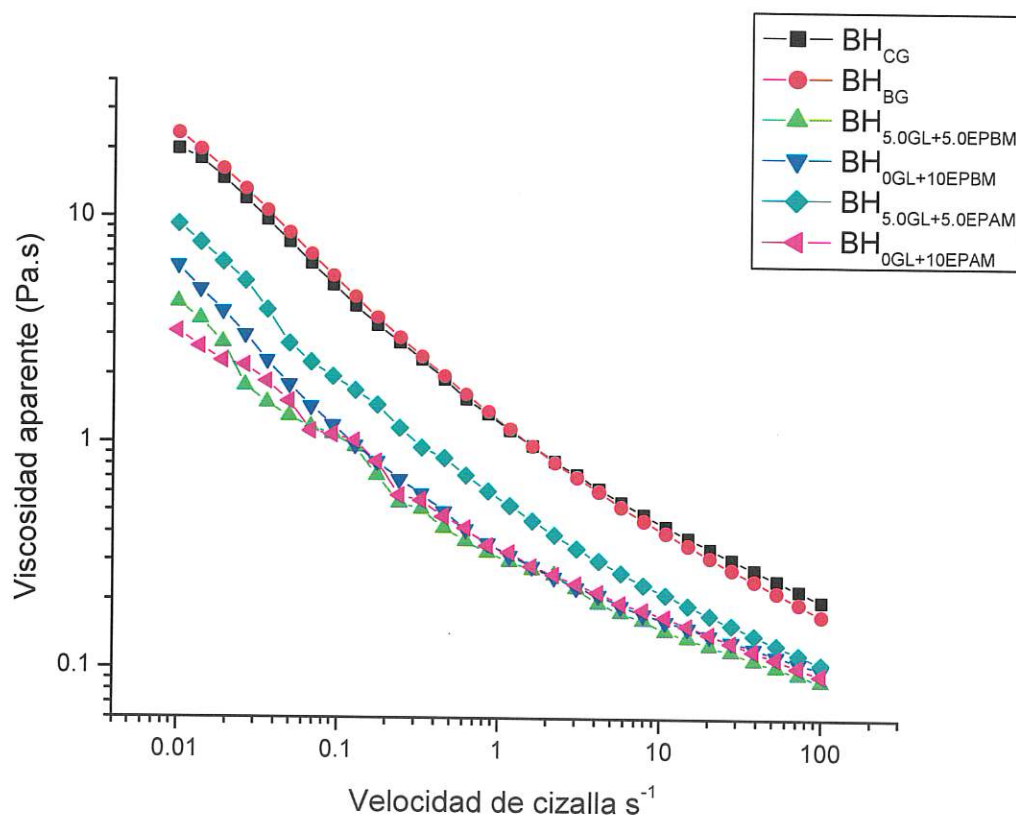


Figura 5. Comportamiento de la viscosidad aparente de las bases para helados, en función de la tasa de deformación. E_{PBM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; BH_{CG} , completa en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); BH_{BG} , baja en grasa control, (5 % GL); $BH_{5.0GL+5.0EPBM}$ (5 % GL + 5 % E_{PBM}); $BH_{0GL+10EPBM}$ (0 % GL + 10 % E_{PBM}); $BH_{5.0GL+5.0EPAM}$ (5 % GL + 5 % de E_{PAM}) y $BH_{0GL+10EPAM}$ (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

En la figura 5 se muestran las variaciones de la viscosidad aparente de las bases en función de la tasa de deformación. Asimismo los valores de los términos del modelo de Herschel-Bulkley correspondientes a las BH, se presentan en el cuadro 4.

En la figura 5, se puede observar que conforme aumentó la tasa de corte, la viscosidad aparente de todas las bases disminuyó, comportamiento indicativo de un carácter pseudoplástico de las BH. Los fluidos pseudoplásticos presentan

aumentos en el esfuerzo cortante y disminución en la viscosidad aparente con la tasa de corte (Steffe, 1996). A pesar de que todas las BH mostraron disminución en su viscosidad aparente, al aumentar la tasa de corte, exhibieron diferencias en los parámetros que definieron su comportamiento de flujo. La sustitución parcial o total de la GL por emulsiones múltiples conteniendo pectinas de bajo o alto metoxilo, causó modificaciones en el comportamiento de flujo de las BH (Cuadro 4). Las bases control, completa (BH_{CG}) y reducida (BH_{BG}) en grasa láctea, no mostraron diferencias significativas en los parámetros que definieron su comportamiento de flujo (Cuadro 4) y fueron más viscosas (mayor valor de K) y menos newtonianas (menor valor de n) que las bases conteniendo emulsiones múltiples. Lim *et al.*, (2008) mencionaron que valores mayores de K y valores pequeños de n, predicen un comportamiento más viscoso de las bases para helados. Smith *et al.* (2004), informaron que bases para helados con 10 % de grasa, 37 % de sólidos totales y 0.3 % de estabilizantes, presentaron valores de n entre 0.48 y 0.55. Estos valores están ligeramente por debajo de los encontrados en este estudio para las BH control (BH_{CG}, 0.61 y BH_{BG}, 0.58); sin embargo, cabe mencionar que las pruebas reológicas aplicadas por los autores mencionados, fueron realizadas a 2 °C, comparado con 4 °C en este estudio.

El carácter más viscoso (Fig. 5) y menos newtoniano de las BH control, confirma el importante papel estructural que desempeña la GL en estos sistemas, el cual es reflejado en su mayor resistencia a fluir, en comparación con las bases formuladas solo con emulsiones múltiples como fracción grasa. Aime *et al.* (2001), observaron valores de índice de comportamiento de flujo (n) elevados

(0.66) para una base para helados sin grasa, asimismo mencionan que esta base no fue tan viscosa como la completa en grasa.

Los valores de esfuerzo de fluencia (σ_0) de las bases BH_{CG} y BH_{BG} , significativamente más elevados que los correspondientes al resto de las BH, son acordes al reforzamiento de la estructura de las BH por parte de la GL. El esfuerzo de fluencia se considera como el esfuerzo debajo del cual no ocurre deformación observable en el material bajo estudio, durante el tiempo disponible para tal efecto (Prentice, 1992).

Los valores bajos de índice de consistencia y de índice de comportamiento de flujo, así como los valores relativamente elevados de índice de comportamiento de flujo de las bases $BH_{5.0GL+5.0EPBM}$ y $BH_{5.0GL+5.0EPAM}$ (Cuadro 4), a pesar de contener 5 % de GL, como la BH_{BG} , parecen indicar que la presencia de aceite de canola emulsionado disminuyó la funcionalidad estructural de la GL en estos sistemas. Goff *et al.*, (1994) encontraron que las bases para helado bajas en grasa pueden ser caracterizadas como fluidos no newtonianos, cuyo flujo resulta del rompimiento de la estructura del fluido durante la aplicación de una deformación.

Cuadro 4. Valores medios ($\pm$ DE) de los términos del modelo de Herschel – Bulkley que obedecieron las bases para helados.

Código de la base para helado	K (Pa s ⁿ)	n (adim)	σ_0 (Pa)
BH _{CG}	1.10 $\pm$ 0.1 ^a	0.61 $\pm$ 0.0 ^c	0.17 $\pm$ 0.0 ^a
BH _{BG}	1.09 $\pm$ 0.1 ^a	0.58 $\pm$ 0.0 ^c	0.20 $\pm$ 0.0 ^a
BH _{5.0GL+5.0EPBM}	0.28 $\pm$ 0.0 ^b	0.73 $\pm$ 0.0 ^{ab}	0.03 $\pm$ 0.0 ^b
BH _{0GL+10EPBM}	0.38 $\pm$ 0.0 ^b	0.65 $\pm$ 0.0 ^{bc}	0.08 $\pm$ 0.0 ^b
BH _{5.0GL+5.0EPAM}	0.29 $\pm$ 0.0 ^b	0.76 $\pm$ 0.0 ^a	0.06 $\pm$ 0.0 ^b
BH _{0GL+10EPAM}	0.34 $\pm$ 0.1 ^b	0.70 $\pm$ 0.0 ^{ab}	0.02 $\pm$ 0.0 ^b

K , índice de consistencia; n , índice de comportamiento de flujo; σ_0 , esfuerzo de fluencia.

EPBM, emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; EPAM, emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; BH_{CG}, completa en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); BH_{BG}, baja en grasa control, (5 % GL); BH_{5.0GL+5.0EPBM} (5 % GL + 5 % EPBM); BH_{0GL+10EPBM} (0 % GL + 10 % EPBM); BH_{5.0GL+5.0EPAM} (5 % GL + 5 % de EPAM) y BH_{0GL+10EPAM} (0 % GL + 10 % EPAM).

^{a,b,c} Superíndices distintos en la misma columna, indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$).

7.4 Overrun y velocidad de fundido de los helados

7.4.1 Overrun

El overrun es definido como el volumen de helado que excede al volumen de la base, como resultado de la adición de aire (Baer *et al.*, 1999) y es expresado como concentración porcentual (Marshall y Arbuckle, 1996).

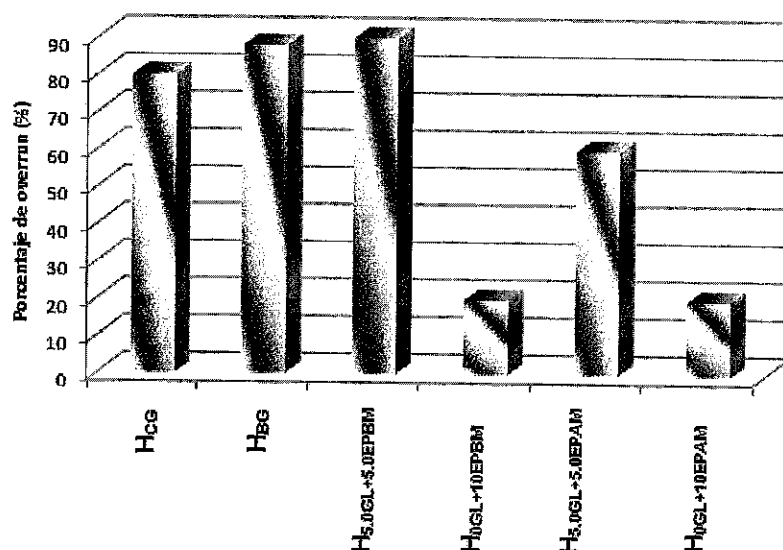


Figura 6. Porcentaje de overrun de los helados. E_{PBM}, emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM}, emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; H_{CG}, completo en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); H_{BG}, bajo en grasa control, (5 % GL); H_{5.0GL+5.0EPBM} (5 % GL + 5 % E_{PBM}); H_{0GL+10EPBM} (0 % GL + 10 % E_{PBM}); H_{5.0GL+5.0EPAM} (5 % GL + 5 % de E_{PAM}) y H_{0GL+10EPAM} (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

Cuadro 5. Valores medios de overrun y velocidad de fundido ($\pm$ DE) de los helados

Tratamiento	% de overrun	Vel. de fundido (mL/h)
H _{CG}	80.5 $\pm$ 0.7 ^b	80.0 $\pm$ 0.0 ^a
H _{BG}	89.0 $\pm$ 1.4 ^a	60.0 $\pm$ 0.0 ^e
H _{5.0GL+5.0EPBM}	90.0 $\pm$ 0.0 ^a	65.0 $\pm$ 0.0 ^c
H _{0GL+10EPBM}	21.0 $\pm$ 1.4 ^d	61.2 $\pm$ 0.3 ^d
H _{5.0GL+5.0EPAM}	62.0 $\pm$ 3.5 ^c	78.0 $\pm$ 0.0 ^b
H _{0GL+10EPAM}	21.0 $\pm$ 1.4 ^d	60.2 $\pm$ 0.3 ^e

E_{PBM}, emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM}, emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; H_{CG}, completo en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); H_{BG}, bajo en grasa control, (5 % GL); H_{5.0GL+5.0EPBM} (5 % GL + 5 % E_{PBM}); H_{0GL+10EPBM} (0 % GL + 10 % E_{PBM}); H_{5.0GL+5.0EPAM} (5 % GL + 5 % de E_{PAM}) y H_{0GL+10EPAM} (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

^{a,b,c,d,e} Superíndices distintos en la misma columna, indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$).

El porcentaje de overrun de las variaciones de helado difirió significativamente, dependiendo de la concentración y naturaleza de su fracción grasa. Los valores de overrun variaron de 21 a 90 % (Fig. 6) (Cuadro 5). Los helados que presentaron mayor porcentaje de overrun fueron el H_{BG} y el H_{5.0GL+5.0EPBM}, seguidos por el helado H_{CG}. En contraste, los helados H_{0GL+10EPBM} y H_{0GL+10EPAM}, exentos de grasa láctea y conteniendo 10 % de emulsión múltiple estabilizada con pectina de bajo o alto metoxilo, exhibieron los valores más bajos de overrun ($p \leq 0.05$). El helado H_{5.0GL+5.0EPAM} presentó un valor de overrun intermedio. Adapa *et al.* (2000), encontraron que un helado con 6 % de grasa presentó un porcentaje más elevado de overrun, que uno conteniendo 12 % de grasa; asimismo, mencionan que un valor elevado en el componente viscoso, previene la incorporación de aire en la base. Los resultados obtenidos en esta investigación parecen indicar que el overrun fue afectado por la composición de la fracción grasa de las BH, más que por su viscosidad; así, los helados con mayor overrun fueron tanto los de mayor viscosidad (H_{CG} y H_{BG}), como uno de baja viscosidad H_{5.0GL+5.0EPBM} (Cuadro 5).

La grasa láctea tiene la propiedad de permitir el batido en productos como el helado, así como también la de proporcionar estabilidad a las burbujas de aire incorporadas durante el batido (Koxholt *et al.*, 2001). Durante la congelación del helado, la acción de batido y la cristalización del hielo desestabilizan la emulsión grasa en la base. La grasa desestabilizada actúa como agente cementante y provee soporte a las burbujas de aire. La combinación de las proteínas lácteas y la grasa parcialmente coalecida proporcionan estructura al helado (Adapa *et al.*,

2000). Marshall *et al.* (2003), mencionan que el uso excesivo de grasa láctea en la base para helados, obstaculiza la capacidad de batido de las mismas. La grasa láctea emulsionada, proporciona cierta viscosidad a la base para helados, por lo que entre mayor sea su cantidad, el overrun de la base es menor; así entonces, es importante la presencia de grasa láctea en concentraciones adecuadas, para la obtención de un determinado porcentaje de overrun.

Al observar el porcentaje de overrun del helado $H_{5.0GL+5.0EPBM}$, significativamente mayor que los correspondientes al resto de los helados conteniendo emulsiones múltiples en combinación o no con GL (Cuadro 5), puede inferirse que ocurrió un efecto sinérgico entre las gotas de GL (emulsionadas por lactoproteínas durante el proceso de homogenización de la base) y las gotas de la emulsión E_{PBM} , estabilizadas con pectina de bajo metoxilo (PBM) durante el batido y congelamiento de la base. Este fenómeno pudiera estar relacionado con la capacidad de formación de estructuras de gel de la PBM en presencia de iones calcio (Leroux *et al.*, 2003), las cuales en turno probablemente funcionaron como soporte de las burbujas de aire.

7.4.2 Velocidad de fundido

Los helados presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en su velocidad de fundido (Cuadro 5). El helado H_{CG} , con mayor contenido graso (Cuadro 2), presentó la mayor velocidad de fundido ($p \leq 0.05$). En contraste, los helados H_{BG} , $H_{0GL+10EPAM}$ y $H_{0GL+10EPBM}$, con menores contenidos grasos (Cuadro 2), exhibieron las velocidades de fundido menores, independientemente de la naturaleza de su fracción grasa. Por su parte, los helados $H_{5.0GL+5.0EPBM}$ y

$H_{5.0GL+5.0EPAM}$, con contenidos intermedios de grasa, mostraron también velocidades de fundido intermedias. Con base en lo expuesto, puede inferirse que la cantidad de fracción grasa en el helado, influyó sobre su velocidad de fundido; en general, a mayor contenido graso, mayor velocidad de fundido. Muse y Hartel (2004) indicaron que la desestabilización de la grasa tuvo el mayor efecto sobre la velocidad de fundido de helado. La grasa desestabilizada en el helado toma la forma de grumos de glóbulos de grasa que cubren y soportan las células de aire y también las cadenas de glóbulos de grasa que construyen una red grasa en el helado (Marshall *et al.*, 2003). Bolliger *et al.* (2000), informaron que helados con niveles más bajos de grasa desestabilizada exhibieron velocidades de fundido menores.

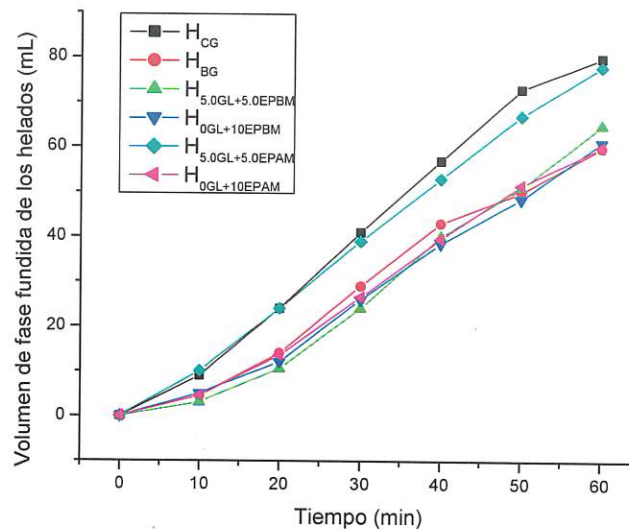


Figura 7. Velocidad de fundido de los helados. E_{PBM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; H_{CG} , completo en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); H_{BG} , bajo en grasa control, (5 % GL); $H_{5.0GL+5.0EPBM}$ (5 % GL + 5 % E_{PBM}); $H_{0GL+10EPBM}$ (0 % GL + 10 % E_{PBM}); $H_{5.0GL+5.0EPAM}$ (5 % GL + 5 % de E_{PAM}) y $H_{0GL+10EPAM}$ (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

La figura 7 muestra el comportamiento de fundido de los helados en función del tiempo, pudiendo observarse que el helado con mayor velocidad de fundido fue el completo en grasa láctea (H_{CG}), seguido por el helado $H_{5.0GL+5.0EPAM}$.

7.5 Comportamiento reológico de los helados

Las variaciones de los valores de G' y G'' de los helados en función de la deformación (Figs. 8 y 9) mostraron tendencias similares, pudiendo apreciarse de manera general, tres zonas de comportamiento:

Zona I, a deformaciones de 0.003 hasta menos de 0.011 %, en la que los valores de ambos módulos permanecieron prácticamente constantes en la gran mayoría de las variaciones de helado; la excepción la constituyeron los helados en los que sustituyó totalmente la GL por emulsiones múltiples ($H_{0GL+10EPAM}$ y $H_{0GL+10EPBM}$), cuya zona de comportamiento viscoelástico lineal se encontró a deformaciones hasta de alrededor de 0.005 %, para el módulo G' en particular. La zona I fue identificada como zona viscoelástica lineal y en ésta, los valores de ambos módulos fueron independientes de la deformación.

Zona II, a deformaciones en el rango de 0.011 % hasta aproximadamente 0.086 %, en la que los valores de ambos módulos disminuyeron considerablemente aunque el punto de inflexión (% de deformación) y la pendiente de disminución de los valores de G' y G'' mostraron diferencias entre los helados (Figuras 8 y 9). Puede observarse que a partir de una deformación cercana a 0.011 %, los helados $H_{5.0GL+5.0EPAM}$ y H_{BG} presentaron una disminución muy pronunciada en sus valores de G' y G'' . En contraste, el helado H_{CG} , presentó una disminución muy poco pronunciada en sus valores de G' y G'' hasta una deformación

aproximada de 0.054 %. Los valores de G' y G'' del helado $H_{5.0GL+5.0EPBM}$, disminuyeron paulatinamente en esta zona, por lo que su comportamiento fue el más cercano a los mostrados por G' y G'' en el helado H_{CG} . Los helados $H_{0GL+10EPAM}$ y $H_{0GL+10EPBM}$, exhibieron caídas en los valores de G' y G'' intermedias a las de los helados mencionados.

Zona III, a valores de deformación mayores de 1.17 % en los cuales los valores de G' y G'' fueron muy bajos para todos los helados. En esta zona, los helados H_{CG} , H_{BG} , $H_{BG+5EMPBM}$ y $H_{BG+5EMPAM}$, mostraron valores de G'' mayores que los de G' , por lo que exhibieron el comportamiento típico de un fluido viscoelástico. Lo anterior, debido a la destrucción de gran parte de la estructura de los helados. Por su parte, los helados $H_{0GL+10EPBM}$ y $H_{0GL+10EPAM}$, tuvieron valores de G'' mayores que G' desde el inicio del barrido de amplitud, lo que indica que su comportamiento, independientemente de la deformación aplicada, fue predominantemente viscoso.

En el cuadro 6, se presentan los valores de los parámetros reológicos de los helados, determinados en la zona viscoelastica lineal. Lo más importante a señalar es que el helado H_{CG} , presentó los valores más bajos de G' y G'' ($p \leq 0.05$), comparables ($p > 0.05$) solo con los exhibidos por el helado $H_{5.0GL+5.0EPBM}$; sin embargo, ambos helados fueron los que mostraron mayor resistencia a la deformación, evidenciada por una disminución menos pronunciada en los valores de sus módulos G' y G'' (Figs. 8 y 9). Estos resultados confirman lo ya mencionado, acerca de la contribución primordial de la GL a la estructura del helado. En el caso del helado $H_{5.0GL+5.0EPBM}$, conteniendo solo el 50 % de grasa

láctea en comparación con el helado H_{CG} , se observa un reforzamiento de la estructura atribuido a la emulsión múltiple incorporada, debido probablemente a la habilidad de la PBM, usada como estabilizante de esta emulsión, para formar estructuras de gel en presencia de iones calcio. La mayoría de los polisacáridos son adicionados a las emulsiones para modificar las propiedades de la fase continua (Lobato-Calleros *et al.*, 2008), aunque pocos tienen la habilidad para formar estructuras de gel insolubles. La PBM forma complejos insolubles con iones calcio presentes en la leche, mediante la formación de puentes salinos entre grupos carboxilo de cadenas de pectina adyacentes, originando la formación de una estructura de gel tridimensional en solución (Leroux *et al.*, 2003).

Por su parte, los helados H_{BG} y aquellos en los que se sustituyó la GL parcialmente por emulsiones múltiples estabilizadas con PAM, mostraron valores de G' y G'' elevados, pero éstos disminuyeron pronunciadamente a deformaciones relativamente pequeñas. Lo anterior, indica que la estructura de estos helados fue "frágil" y poco resistente a la deformación. La PAM, al contrario de la PBM, no tiene la capacidad de formar estructuras de gel de pectato de calcio en leche.

También es relevante señalar que los helados presentaron valores de G' mayores que los de G'' en la zona viscoelástica lineal, rindiendo valores de $\tan \delta$ menores a la unidad, por lo que se puede establecer que su comportamiento reológico fue predominantemente elástico. La excepción, la constituyeron los helados en los que la GL fue totalmente sustituida por emulsiones múltiples, presentando valores de G'' mayores que los de G' en la zona viscoelástica lineal,

indicando ello que estos helados presentaron comportamiento reológico predominantemente viscoso. La ausencia de GL fue la causa de que en estos sistemas predominara el comportamiento viscoso sobre el elástico. La desestabilización de la grasa durante el proceso de congelación del helado puede jugar un papel muy importante en la determinación de la elasticidad del helado, de tal manera que los helados que tienen un mayor grado de desestabilización de la grasa pueden presentar valores más altos en el componente elástico (Adapa *et al.*, 2000).

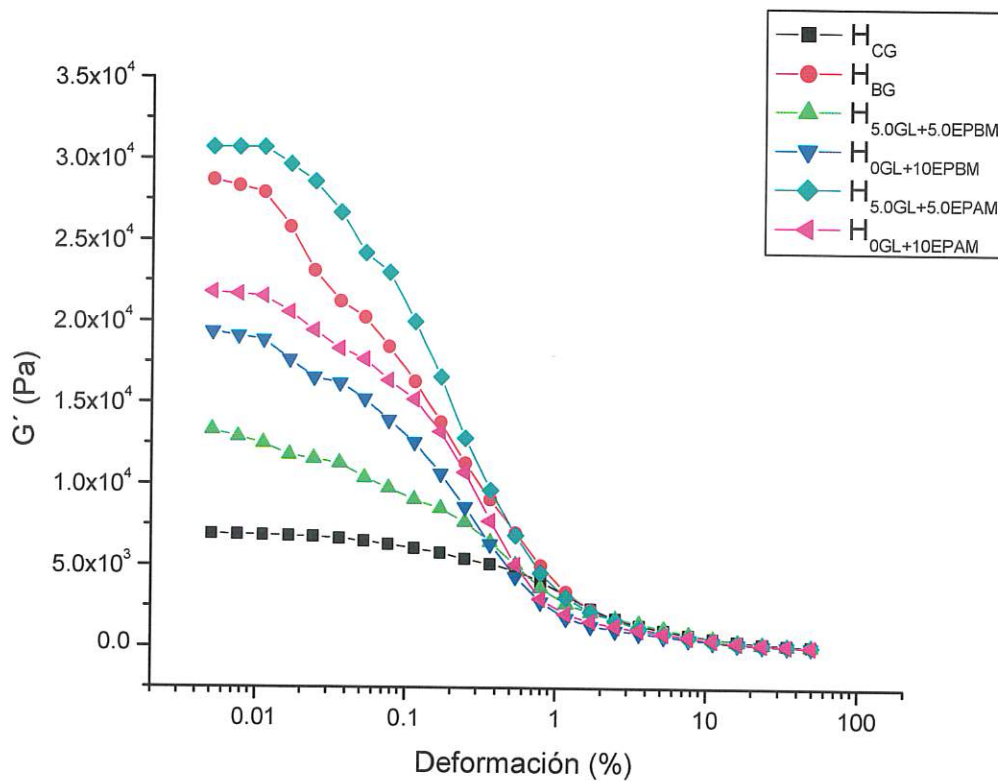


Figura 8. Variación del módulo de almacenamiento (G') de los helados, en función de la deformación. E_{PBM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; H_{CG} , completo en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); H_{BG} , bajo en grasa control, (5 % GL); $H_{5.0GL+5.0EPBM}$ (5 % GL + 5 % E_{PBM}); $H_{0GL+10EPBM}$ (0 % GL + 10 % E_{PBM}); $H_{5.0GL+5.0EPAM}$ (5 % GL + 5% de E_{PAM}) y $H_{0GL+10EPAM}$ (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

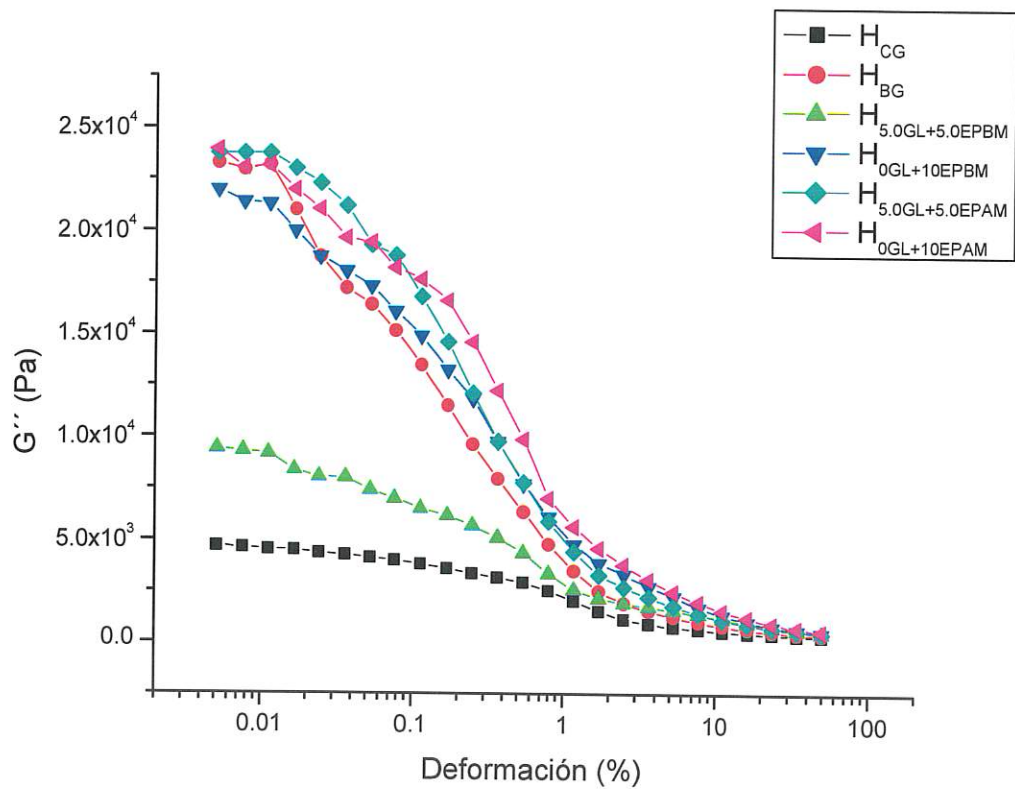


Figura 9. Variación del módulo de pérdida (G'') de los helados, en función de la deformación. E_{PBM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM} , emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; H_{CG} , completo en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); H_{BG} , bajo en grasa control, (5 % GL); $H_{5.0GL+5.0EPBM}$ (5 % GL + 5 % E_{PBM}); $H_{0GL+10EPBM}$ (0 % GL + 10 % E_{PBM}); $H_{5.0GL+5.0EPAM}$ (5 % GL + 5% de E_{PAM}) y $H_{0GL+10EPAM}$ (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

Cuadro 6. Valores medios ($\pm$ DE) del módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y $\tan \delta$ de los helados

Código del helado	G' (KPa)	G'' (KPa)	$\tan \delta$ (relación)
H _{CG}	6.84 $\pm$ 3.5 ^d	4.60 $\pm$ 1.3 ^b	0.73 $\pm$ 0.1 ^b
H _{BG}	26.40 $\pm$ 4.1 ^{ab}	22.21 $\pm$ 4.8 ^a	0.83 $\pm$ 0.1 ^b
H _{5.0GL+5.0EPBM}	14.04 $\pm$ 1.4 ^{cd}	11.57 $\pm$ 2.1 ^b	0.82 $\pm$ 0.1 ^b
H _{0GL+10EPBM}	18.78 $\pm$ 1.9 ^{bc}	21.33 $\pm$ 1.4 ^a	1.14 $\pm$ 0.0 ^a
H _{5.0GL+5.0EPAM}	30.88 $\pm$ 4.7 ^a	23.93 $\pm$ 3.5 ^a	0.77 $\pm$ 0.0 ^b
H _{0GL+10EPAM}	22.19 $\pm$ 6.0 ^{abc}	23.65 $\pm$ 4.6 ^a	1.09 $\pm$ 0.1 ^a

E_{PBM}, emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; E_{PAM}, emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; H_{CG}, completo en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); H_{BG}, bajo en grasa control, (5 % GL); H_{5.0GL+5.0EPBM} (5 % GL + 5 % E_{PBM}); H_{0GL+10EPBM} (0 % GL + 10 % E_{PBM}); H_{5.0GL+5.0EPAM} (5 % GL + 5% de E_{PAM} y H_{0GL+10EPAM} (0 % GL + 10 % E_{PAM}).

^{a,b,c,d} Superíndices distintos en la misma columna, indican que las medias difieren significativamente ($p \leq 0.05$).

7.6 Aceptabilidad de los atributos sensoriales de los helados

Las variaciones de helado presentaron diferencias significativas en la aceptación de los atributos sensoriales evaluados (Cuadro 7). Las calificaciones asignadas a los atributos sensoriales de los helados mostraron un rango amplio de variación, desde 4.7 hasta 7.7 (5= ni me disgusta ni me gusta y 8= me gusta mucho), debido al carácter de la prueba aplicada; esto es, los evaluadores calificaron, de acuerdo a sus gustos muy particulares, la aceptación que les causó cada atributo de los helados. El atributo de cremosidad de los helados fue el más afectado al remover la GL y sustituirla por emulsiones múltiples; de esta

manera, a los helados $H_{0GL+10EPBM}$, $H_{0GL+10EPAM}$ y $H_{5.0GL+5.0EPBM}$, les fueron asignadas calificaciones de aceptación de cremosidad, menores a la otorgada al helado control H_{CG} (Cuadro 7). En contraste, al helado H_{BG} , en el cual se redujo el contenido de GL, pero no se sustituyó con emulsiones múltiples, presentó una calificación de aceptación de cremosidad comparable a la del helado H_{CG} . El único helado conteniendo emulsiones múltiples al que le fue asignada una calificación de cremosidad similar a la del helado H_{CG} , fue el formulado con 5 % de GL y 5 % de emulsión múltiple estabilizada con PAM ($H_{5.0GL+5.0EPAM}$). Los resultados expuestos indican que la cremosidad impartida a los helados por la GL, no pudo ser emulada por el uso de emulsiones múltiples en sustitución total de la GL; y que en el caso de reducir parcialmente el contenido de GL, es mejor usar emulsiones múltiples estabilizadas con PAM, que con PBM. En esto último, probablemente influyó la habilidad de la PBM para formar una estructura de gel de pectato de calcio, la cual afectó negativamente la cremosidad del helado $H_{5.0GL+5.0EPBM}$.

Las calificaciones de aceptación asignadas a los helados en relación al resto de los atributos sensoriales evaluados, variaron de acuerdo al atributo en particular. Así, solo el helado $H_{0GL+10EPAM}$, obtuvo menor calificación ($p \leq 0.05$) en sensación de cristales de hielo y sabor a nuez, que el helado H_{CG} (Cuadro 7). Por su parte, solo el helado $H_{5.0GL+5.0EPBM}$, obtuvo calificaciones de aceptación en sus atributos de dulzor y sabor a leche, significativamente menores a las asignadas al resto de los helados, los cuales presentaron calificaciones que no difirieron ($p > 0.05$) (Cuadro 7). Finalmente, el tiempo de fundido del helado

H_{0GL+10EPBM}, tuvo mayor aceptación ($p > 0.05$) que aquellos correspondientes al resto de los helados (Cuadro 7).

Los helados H_{BG} y H_{5.0GL+5.0EPAM}, obtuvieron calificaciones en los atributos sensoriales evaluados comparables a las asignadas al helado H_{CG}.

En relación a la aceptación global de los helados, el helado H_{BG} control y aquellos bajos en grasa incorporados con emulsiones múltiples, presentaron una aceptación global comparable ($p > 0.05$) a la del helado control completo en grasa H_{CG} (Cuadro 7), siendo la única excepción el helado H_{5.0GL+5.0EPBM}, que obtuvo una calificación de aceptación significativamente menor a la del helado control completo en grasa. No obstante a que la aceptación global de la gran mayoría de los helados fue comparable a la del helado H_{CG}, éstos presentaron diferencias significativas en la aceptación de los atributos sensoriales evaluados (Cuadro 7).

El primer componente obtenido del ACP explicó el 51.4 % de la varianza total y en éste la grasa láctea estuvo correlacionada positivamente con el sabor a leche, el sabor a nuez y la sensación de cristales de hielo de los helados; en contraste, la emulsión múltiple estabilizada con PAM, estuvo correlacionada de manera negativa con los atributos sensoriales de los helados mencionados (Fig. 10). El segundo componente principal explicó el 24.4 % de la varianza total y en éste la emulsión múltiple estabilizada con PBM, estuvo correlacionada de manera positiva con la aceptación global, el dulzor y el tiempo de fundido. La posición guardada por los helados en el espacio bidimensional, permitió establecer sus atributos sensoriales de acuerdo a la naturaleza y cantidades de sus fracciones grasas. De esta manera, los helados conteniendo únicamente

grasa láctea (H_{CG} y H_{BG}) mostraron valores relativamente altos en aceptación de su sabor, cremosidad y sensación de cristales de hielo (Fig. 10). El helado conteniendo únicamente emulsión estabilizada con PBM ($H_{0GL+10EPBM}$), presentó un valor de tiempo de fundido elevado y valores relativamente altos de dulzor y aceptación global. Por su parte, los helados conteniendo emulsiones múltiples estabilizadas con PAM, en sustitución parcial o total de la GL, no destacaron en alguno de los atributos sensoriales evaluados (Fig. 10).

A partir de los resultados mencionados, es posible inferir que modificaciones en la cantidad y naturaleza de la fracción grasa del helado, afectó la aceptación de los atributos sensoriales evaluados.

Cuadro 7. Valores de la prueba de aceptabilidad global de los helados

Trat	Atributos					
	Sensación de cris. hielo	Tiempo derretido	Dulzor	Sabor leche	Sabor nuez	Cremoso
H _{CG}	6.61±1.91 ^a	5.81±2.09 ^b	6.53±2.18 ^a	7.11±1.55 ^a	6.91±1.67 ^{ab}	7.31±1.65 ^a
H _{BG}	6.81±1.88 ^a	6.13±1.23 ^{ab}	6.93±2.05 ^a	6.65±1.89 ^{ab}	7.06±1.66 ^a	7.65±1.36 ^a
H _{5.0GL+5.0EPBM}	6.11±1.84 ^a	5.68±2.33 ^b	5.10±2.18 ^b	5.81±2.33 ^b	6.53±1.90 ^{ab}	6.30±1.84 ^{bc}
H _{0GL+10EPBM}	6.06±1.78 ^a	7.05±1.55 ^a	6.61±1.91 ^a	6.10±1.89 ^{ab}	6.33±1.71 ^{abc}	6.00±1.97 ^{bc}
H _{5.0GL+5.0EPAM}	5.90±2.23 ^a	6.13±2.00 ^{ab}	6.36±2.02 ^a	6.13±2.16 ^{ab}	6.08±2.17 ^{bc}	6.73±2.19 ^{ab}
H _{0GL+10EPAM}	4.73±1.73 ^b	5.98±1.76 ^b	5.90±2.42 ^{ab}	6.13±2.41 ^{ab}	5.45±2.12 ^c	5.58±2.48 ^c

H_{CG}, completa en grasa, usada como control (10% grasa butírica, GL) (99.95 % de grasa, Cyteca, S.A de C.V., México D.F); H_{BG}, baja en grasa, usada como control (5% grasa butírica); H_{5.0GL+5.0EPBM} (5% de grasa butírica + 5% de EM_{PBM}); H_{0GL+10EPBM} (0% GL + 10% EM_{PBM}); H_{5.0GL+5.0EPAM} (5% de grasa butírica + 5% de EM_{PAM} y H_{0GL+10EPAM} (0% GL + 10% EM_{PAM})).
^{a,b,c}Superíndices distintos en la misma columna, indican que las medias difieren significativamente (p ≤ 0.05)..

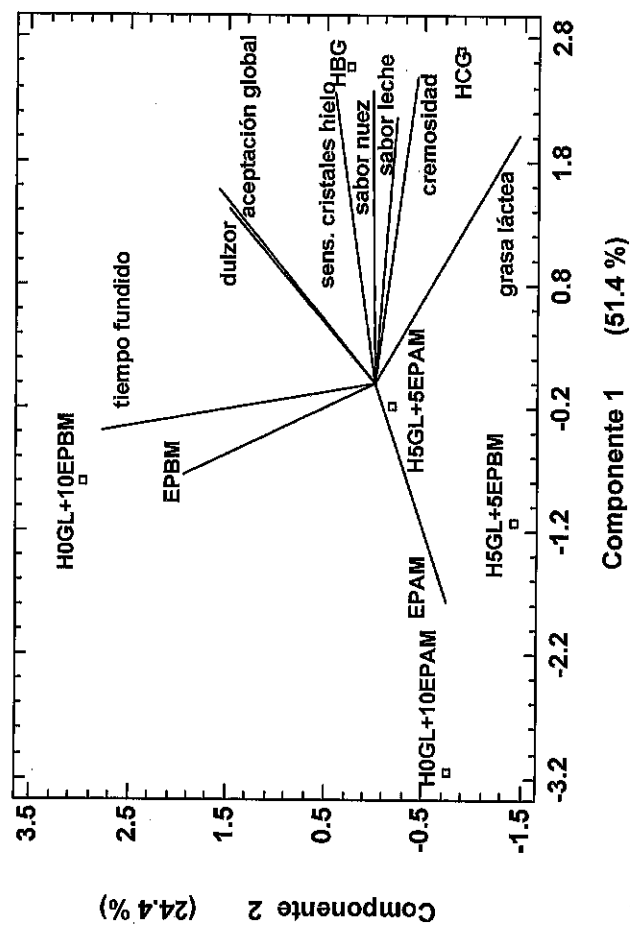


Fig. 10. Análisis de Componentes Principales de la aceptabilidad de los atributos sensoriales y la composición de la fracción grasa de los helados. EPBM, emulsión múltiple conteniendo pectina de bajo metoxilo en la fase acuosa externa; EPAM, emulsión múltiple conteniendo pectina de alto metoxilo en la fase acuosa externa; HCG, completo en grasa control, (10 % grasa butírica, GL); HBG, bajo en grasa control, (5 % GL); H5.0GL+5.0EPBM (5 % GL + 5 % EPBM); H0GL+10EPBM (0 % GL + 10 % EPBM); H5.0GL+5.0EPAM (5 % GL + 5 % de EPAM y H0GL+10EPAM (0 % GL + 10 % EPAM).

8. CONCLUSIONES

La sustitución parcial o total de la grasa láctea de bases para helado, por emulsiones múltiples estabilizadas con pectina de alto metoxilo o bajo metoxilo, causó variaciones en su composición química proximal y comportamiento reológico, las cuales en turno afectaron las propiedades reológicas, overrun, velocidad de fundido y atributos sensoriales de los helados obtenidos a partir de estas bases.

En general el overrun y la velocidad de fundido de los helados conteniendo emulsiones múltiples fueron menores que aquellos mostrados por el helado control completo en grasa láctea.

El helado conteniendo 5 % de grasa láctea y 5 % de emulsión múltiple estabilizada con pectina de bajo metoxilo, presentó valores de módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') similares a los correspondientes al helado control completo en grasa láctea.

Los helados bajo en grasa sin emulsión múltiple y aquél conteniendo 5 % de grasa láctea y 5 % de emulsión múltiple estabilizada con pectina de alto metoxilo, obtuvieron calificaciones en los atributos sensoriales evaluados comparables a las asignadas al helado H_{CG}.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adachi S., Hasegawa Y., Imaoka H., Matsuno R. (2001). Preparation of W/O/W emulsions at low emulsifier concentrations. *Food Science and Technology Research*, 7: 300-302.
2. Adapa, S., Dingeldein, H., Schmidt, K. A., Herald, T. J. (2000). Rheological properties of ice cream mixes and frozen ice creams containing fat and fat replacers. *Journal of Dairy Science*, 83: 2224-2229.
3. Aime, D. B., Arntfield, S. D., Malcolmson, L. J., Ryland, D. (2001). Textural analysis of fat reduced vanilla ice cream products. *Food Research International*. 34:237-246.
4. Akoh, C. C. (1998). Fat replacers. *Food Technology*, 52(3): 47-53.
5. Allouche, J., Tyrode, E., Sadtler, V., Choplin, L., Salager, J. L. (2003). Single- and two-step emulsification to prepare a persistent multiple emulsion with a surfactant-polymer mixture. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42: 3982-3988.
6. AOAC. (1995). *Official Methods of Analysis* (16th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
7. Baer, R. J., Krishnaswamy, N. y Kasperson, K. M. (1999). Effect of emulsifiers and food gum on nonfat ice cream. *Journal of Dairy Science*. 82:1416-1424

8. Bollinger, H., Goff, H. D., Tharp, B. W. (2000). Correlation between colloidal properties of ice cream mix and ice cream. *International Dairy Journal*, 10: 303-309.
9. Colo, S. M., Herh, P., Roye, N., Larsson, M. (2004). Rheology and the texture of pharmaceutical and cosmetic semisolids. Application note.
10. Dewettink, K., Rombaut, R., Thienpont, N., Le, T., Messens, K., Van Camp, J. (2008). Nutritional and technological aspects of milk fat globule membrane material. *International Dairy Journal*, 18: 436-457.
11. Dickinson, E. (1992). Interfacial interactions and the stability of oil-in-water emulsions. *Pure and Application Chemistry*, 64(11): 1721-1724.
12. Dickinson, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17: 25-39.
13. Donhowe, D. P., Hartel, R. W., Bradley Jr. R. L. (1991). Determination of ice crystal size distributions in frozen desserts. *Journal of Dairy Science*, 74: 3334-3344.
14. Eisner M. D., Wildmoser H., Windhab E. J. (2005). Air cell microstructuring in a high viscous ice cream matrix. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 263: 390-399.
15. Fennema O. R. (2000). *Química de Alimentos*. 2a Ed. Acribia. Zaragoza, España.
16. Flores, A. A., Goff, H. 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.

17. Garti, N. (1997). Progress in stabilization and transport phenomena of double emulsions in food applications. *Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie*, 30: 222-235.
18. Garti, N., Aserin, A. (1996). Double emulsions stabilized by macromolecular surfactants. *Advances in Colloids and Interface Science*, 65: 37-69.
19. Giese, J. (1996). Fats, oils, and fat replacers. *Food Technology*, 50(4): 78-83.
20. Goff H. D. (1997). Colloidal aspects of ice cream * a review. *International Dairy Journal*, 7: 363-373.
21. Goff, H. D. 2002. Formation and stabilization of structure in ice cream and related products. *Current Opinion Colloid Interface Science*, 7:432-437.
22. Goff, H. D., Davidson, V. J., Cappi, E. (1994). Viscosity of ice cream mix at pasteurization temperatures. *Journal of Dairy Science*, 77: 2207-2213.
23. Goff, H. D., Verespej, R., Smith, A. K. (1999). A study of fat and air structures in ice cream. *International Dairy Journal*, 9: 817-829.
24. Granger, C., Langendorff, V., Renouf, N., Cansell, M. (2004). Short communication: impact of formulation on ice cream microstructures: an oscillation thermo-rheometry study. *Journal of Dairy Science*, 87:810-812.
25. Granger, C., Leger, A., Barey, P., Langendorff, V., Cansell, M. (2005). Influence of formulation on the structural networks in ice cream. *International Dairy Journal*, 15:255-262.
26. Kawakatsu, T., Trägårdh, G., Trägårdh, C. (2001). The formation of oil droplets in a pectin solution and the viscosity of the oil-in-pectin solution emulsion. *Journal of Food Engineering*, 50: 247:254.

27. Knight K. M., Caruana, D. J. (2007). Formation and characterization of surfactantless oil-in-water and water-in-oil emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 301: 352-360.
28. Lee, W.J., Lucey, J.A. (2006). Impact of gelation conditions and structure breakdown on the physical and sensory properties of stirred yogurts. *Journal of Dairy Science*, 89: 2374-2385.
29. Leroux, J., Langendorff, V., Schick, G., Vaishnav, V. y Mazoyer, J., (2003). Emulsion stabilizing properties of pectin. *Food Hydrocolloids*, 17: 455-462.
30. Lim, S. Y., Swanson, B. G., Ross, C. F., Clark, S. (2008). High hydrostatic pressure modification of whey protein concentrate for improved body and texture of low-fat ice cream. *Journal of Dairy Science*, 91:1308-1316.
31. Lobato-Calleros C., Rodriguez, E., Sandoval-Castilla, O., Vernon-Carter, E. J., Alvarez-Ramirez, J. (2006). Reduced-fat white fresh cheese-like products obtained from $W_1/O/W_2$ multiple emulsions: Viscoelastic and high-resolution image analyses. *Food Research International*, 39:678-685.
32. Lobato-Calleros, C., Ramírez-Santiago, C., Osorio-Santiago, V.J., Vernon-Carter, E.J., Hornelas-Urbe, Y. (2002). Microstructure and texture of Manchego cheese-like products made with canola oil, lipophilic and hydrophilic emulsifiers. *Journal of Texture Studies*, 33: 165-182.
33. Lobato-Calleros, C., Sosa-Pérez, A., Rodríguez-Tafoya, J., Sandoval-Castilla, O., Pérez-Alonso, C., Vernon-Carter, E.J. (2008). Structural and textural characteristics of reduced-fat cheese-like products made from $W_1/O/W_2$ emulsions and skim milk. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 41: 1847-1856.

34. MacGibbon, A. K. H., Taylor, M. W. (2006). Composition and structure of bovine milk lipids. En *Advanced dairy chemistry*. Vol. 2: Lipids (eds. Fox, P. F.; McSweeney, P. L. H. 3ra ed. Springer Publishing Company, Nueva York, NY.
35. Marshall, R. T., Arbuckle, W. S. (1996). *Ice cream*, 5ª Edición. Chapman and Hall, Nueva York, NY.
36. Marshall, R. T., Goff, H. D., Hartel, R. W. (2003). *Ice Cream*, 6th ed., Kluwer Academic Publishers/Plenum Press, Nueva York, NY.
37. Matsubara, S. (2001). Alimentos funcionais: uma tendência que abre perspectivas aos laticínios. *Indústria de Laticínios*, 6: 10–18.
38. McClements, D. J., Decker, E. A., Weiss, J. (2007). Emulsions-based delivery systems for lipophilic bioactive components. *Journal of Food Science*, 72: 109-124.
39. McClements, D. J., Guzey D. (2006). Formation, stability and properties of multilayer emulsions for application in the food industry. *Advances in Colloid and Interface Science*, 125-130: 227-248.
40. McClements, D. J., Thanasukarn, P., Pongsawatmanit, R. (2004). Influence of emulsifier type on freeze-thaw stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 18: 1033-1043.
41. McClements, D.J. 2000. Comments on viscosity enhancement and depletion flocculation by polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 14:173-177.
42. Michalski M., Cariou, R., Michel, F, Garnier C. (2002). Native vs damaged milk fat globules: membrane properties affect the viscoelasticity of milk gels. *Journal of Dairy Science*, 85: 2451-2461.

43. Muguet, V., Seiller, M., Barratt, G., Ozer, O., Marty, J. P., Grossiord, J. L. (2001). Formulation of shear rate sensitive multiple emulsions. *Journal of Controlled Release*, 70: 37-49.
44. Musashino, K., Hasegawa, Y., Imaoka, H., Adachi, S., Matsuno, R. (2001). Preparation of W/O/W multiple emulsions with polymers in the outer aqueous phase. *Food Science and Technology Research*, 7(1): 78-83.
45. Muse, M. R., Hartel, R. W. (2004). Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness. *Journal of Dairy Science*. 87: 1-10
46. Ohmes, R., Marshall, R. Heymann H. (1998). Sensory and physical properties of ice creams containing milk fat or fat replacers. *Journal of Dairy Science*, 81: 1222-1228.
47. Owusu A. R. K., Zhu Q. H. (1996). Interfacial parameters for spans and tweens in relation to water-in-oil-in-water multiple emulsion stability. *Food Hydrocolloids*, 10: 245-250.
48. Patel, M. R., Baer, R. J., Acharya, M. R. (2006). Increasing the protein content of ice cream. *Journal of Dairy Science*, 89:1400-1406.
49. Perrier-Cornet, J. M., Marie, P., Gervais, P. (2004). Comparison of emulsification efficiency of protein-stabilized oil-in-water emulsions using jet, high pressure and colloid mill homogenization. *Journal of Food Engineering*, 66: 211-217.
50. Pomeranz Y. (1991). *Functional Properties of Food Components*. 2^a ed. Academic Press, Inc. San Diego, CA.
51. Prentice, H. (1992). Dairy rheology. A concise guide. VCH Publishers, Inc. NY, EUA

52. Schmidt, K. A., Lundy, A., Reynolds, J., Yee, L. N. (1993). Carbohydrate or protein based fat mimicker effects on ice milk properties. *Journal of Food Science*, 58(4): 761-763, 779.
53. Sherman, P. (1968). General properties of emulsions and their constituents. En *Emulsion Science* (Ed. P. Sherman), Academic Press, Londres, Inglaterra, 332-333.
54. Smith, D. E., Bakshi, A. S., y Lomauro, C. J. (1984). Changes in freezing point and rheological properties of ice cream mix as function of sweetener system and whey substitution. *Milchwissenschaft*. 39:455-457.
55. Sofjan, R. P., Hartel, R. W. (2004). Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *International Dairy Journal*, 14:255-262.
56. Specter, S. E., Setser, C. S. (1994). Sensory and physical properties of a reduced-calorie frozen dessert system made with milk fat and sucrose substitutes. *Journal of Dairy Science*, 77: 708-717.
57. Steffe, J. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2^a Edición. Freeman Press. MI, EUA.
58. Tabilo-Munizaga, G., Barbosa-Cánovas, V. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of food Engineering*, 67: 147-156.
59. Tunick M. H. (2000). Rheology of dairy foods that gel, stretch, and fracture. *Journal of Dairy Science*, 83: 1892-1898.
60. Tunick, M. H., Mackey, K. L., Shieh, J. J., Smith, P. W., Cooke, P., Malin, E. L. (1993). Rheology and microstructure of low-fat Mozzarella cheese. *International Dairy Journal*, 3: 649-662.

61. Wildmoser, H., Scheiwiller, J., Windhab, E. J. 2004. Impact of disperse microstructure on rheology and quality aspects of ice cream. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technology*, 37(8): 881–891.
62. Yu, L., Hammond, E. G. (2000). Production and characterization of a Swiss cheese-like product from modified vegetable oils. *Journal of American Oil Chemists' Society*, 77: 917-924.