



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

Influencia de la reología en la estabilidad de una
emulsión láctea elaborada con concentrado de suero
de leche y aceite vegetal

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA

ANDREA LIZETH RENDÓN CONTRERAS

ASESORAS

DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA

DRA. VIRGINIA AGUSTINA DELGADO REYES

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	vii
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	1
1.1 Bebidas lácteas	1
1.1.1 Clasificación	1
1.1.2 Componentes principales	3
1.1.3 Componentes en menor proporción	9
1.2 Interacción entre biopolímeros	12
1.3 Emulsiones lácteas	15
1.3.1 Formación y equipo	15
1.3.2 Factores que intervienen en la formación de bebidas lácteas	17
1.3.3 Procesos de inestabilidad	18
1.4 Reología de los fluidos	22
1.4.1 Clasificación de los fluidos	23
1.4.2 Factores que determinan la reología de las emulsiones	29
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	31
2.1 Objetivos	31
2.2 Desarrollo experimental	32
2.2.1 Materiales	32
2.2.2 Métodos	32
2.2.2.1 Formulación	32
2.2.2.2 Preparación de la emulsión láctea fortificada	33
2.2.2.3 Potencial de iones hidronio	34
2.2.2.4 Densidad relativa	35
2.2.2.5 Tamaño de partícula	35
2.2.2.6 Propiedades de flujo bajo cizalla rotacional	36
2.2.2.7 Estabilidad	37
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1 Potencial de iones hidronio en sistemas acuosos y emulsiones	39
3.2 Densidad relativa en sistemas acuosos y emulsiones	40
3.3 Distribución y tamaño de partícula en sistemas acuosos y emulsiones	41
3.4 Propiedades de flujo bajo cizalla rotacional en sistemas acuosos y emulsiones	49

3.5	Estabilidad de la emulsión láctea	57
	CONCLUSIONES	61
	REFERENCIAS	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1	Componentes típicos encontrados en una bebida láctea	3
Cuadro 1.2	Fuerzas intermoleculares que contribuyen a la interacción entre los biopolímeros	12
Cuadro 2.1	Formulaciones de los sistemas acuosos	32
Cuadro 2.2	Formulaciones de estudio	33
Cuadro 3.1	pH promedio de las diferentes fases acuosas estudiadas	39
Cuadro 3.2	pH promedio de las diferentes emulsiones estudiadas	39
Cuadro 3.3	Densidad relativa promedio de las diferentes fases acuosas estudiadas	40
Cuadro 3.4	Densidad relativa promedio de las diferentes muestras estudiadas	41
Cuadro 3.5	Diámetro de la fase acuosa con y sin ultrasonido	42
Cuadro 3.6	Diámetro de partícula en la emulsión sin xantana y sin CSL	44
Cuadro 3.7	Efecto del diámetro de partícula en emulsiones lácteas, variación de concentrado de suero de leche, aceite y la adición de vitaminas	48
Cuadro 3.8	Viscosidad de la fase leche-azúcar y emulsión sin xantana.	50
Cuadro 3.9	Parámetros reológicos del modelo de Carreau-Yasuda en el primer segmento de ascenso	53
Cuadro 3.10	Parámetros reológicos del modelo de Carreau-Yasuda, variación de aceite vegetal	55
Cuadro 3.11	Parámetros reológicos del modelo de Carreau-Yasuda, variación de CSL	57
Cuadro 3.12	Velocidad de aumento de tamaño de partícula a lo largo del tubo	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Emulsión agua en aceite	2
Figura 1.2	Emulsión aceite en agua	2
Figura 1.3	Estructura tridimensional de la β -lactoglobulina	5
Figura 1.4	Representación gráfica de la acción de un emulsificante	9
Figura 1.5	Orientación de los grupos polares y no polares en un biopolímero	10
Figura 1.6	Estructura molecular de la goma xantana	11
Figura 1.7	Interacción polisacárido-proteína, sistemas obtenidos de la mezcla de los biopolímeros	13
Figura 1.8	Tipos de homogeneización	16
Figura 1.9	Procesos de inestabilidad de las emulsiones	19
Figura 1.10	Proceso de inestabilidad de una emulsión: coalescencia	21
Figura 1.11	Curva de flujo fluidos newtoniano y no newtonianos	25
Figura 1.12	Representación del comportamiento viscoso de un fluido no newtoniano empleando el modelo de Carreau-Yasuda	26
Figura 1.13	Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo	28
Figura 3.1	Distribución de tamaño de partícula, fase acuosa con ultrasonido (CU) y sin ultrasonido (SU)	42
Figura 3.2	Distribución de tamaño de partícula, emulsión sin xantana, con ultrasonido (CU) y sin ultrasonido (SU)	43
Figura 3.3	Distribución de partícula, emulsión sin concentrado de suero de leche con ultrasonido (CU) y sin ultrasonido (SU)	44
Figura 3.4	Distribución del tamaño de partícula, efecto de la variación de concentrado de suero de leche, sin ultrasonido (SU)	43
Figura 3.5	Diámetro de partícula variación de concentrado de suero de leche con ultrasonido (CU)	46
Figura 3.6	Distribución de diámetro de partícula, variación de aceite sin ultrasonido (SU)	47
Figura 3.7	Distribución de diámetro de partícula, variación de aceite con ultrasonido (CU)	48
Figura 3.8	Curva de flujo de la fase de leche 10%-azúcar 5%, emulsión sin xantana y leche-azúcar-CSL	50
Figura 3.9	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla, de la muestra de xantana 0.25%	51
Figura 3.10	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla, comportamiento ajustado al modelo de Carreau-Yasuda	52
Figura 3.11	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla variación de aceite.	54

Figura 3.12	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla	56
Figura 3.13	Retrodispersión de luz en función del tiempo de almacenamiento en refrigeración, en una emulsión láctea fortificada (10% aceite vegetal)	58
Figura 3.14	Disminución de la retrodispersión de luz en función de almacenamiento en refrigeración, en una emulsión láctea fortificada (10% aceite vegetal)	59

RESUMEN

En el presente proyecto se realizó el estudio de una base para bebida láctea, ésta fue elaborada con suero de leche a diferentes concentraciones (5, 10 y 15%), producto que durante mucho tiempo fue considerado un desecho en la industria de los alimentos, pero que en conjunto con la goma xantana (0.25%) logra un buen sinergismo y estabilidad en las emulsiones lácteas, se estudió de igual forma la variación de aceite vegetal (5, 10 y 15%). Se analizaron las fases acuosas así como las emulsiones derivadas a partir de éstas.

A todas las muestras se les midió el pH y la densidad relativa como parámetros de control. El intervalo de pH de las bebidas lácteas se encontró entre 6.12 y 6.77 considerado como un valor cercano al neutro y la densidad relativa en un intervalo de 1.00 a 1.11. La distribución del tamaño de partícula se evaluó por difracción de luz, sin y con ultrasonido, y se encontró que en todas las muestras la aplicación del ultrasonido provocó una disgregación de las partículas. El tamaño de partícula disminuyó con el aumento de la concentración de suero de leche y permaneció constante con el aumento de la concentración de aceite.

El comportamiento reológico de las fases acuosas y las emulsiones de la base de bebida láctea se determinó en un reómetro con una geometría de cono/placa, los resultados obtenidos evidenciaron que las fases acuosas de proteína presentaron una relación lineal entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla, mientras que en las muestras a las que se les adicionó goma xantana su comportamiento fue no newtoniano, donde los datos experimentales se ajustaron al modelo reológico de Carreau-Yasuda. La viscosidad inicial en la prueba aumentó con el incremento del concentrado de suero de leche y del aceite vegetal. La estabilidad de la emulsión láctea se determinó por el método de transmisión-retrodispersión de luz a través de la emulsión, en función del tiempo de almacenamiento en refrigeración. Se obtuvieron emulsiones estables ya que la disminución del porcentaje de retrodispersión de luz fue inferior a 5×10^{-5} mm/min, velocidad relacionada con la formación de agregados (flóculos) o aumento de tamaño de partícula (coalescencia).

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos los seres humanos han tenido la necesidad de alimentarse para obtener los nutrientes necesarios para el organismo. Todos los seres vivos necesitan una nutrición completa y equilibrada, sin embargo, para cada persona los requerimientos son distintos, esto depende de la edad, de la condición física y de su salud, pero en general, toda dieta debe de proporcionar las vitaminas y los minerales esenciales para los procesos fisiológicos del cuerpo, así como proteínas, grasas y carbohidratos, requeridos por el metabolismo (Aranceta y Gil., 2009).

Estos componentes pueden ser obtenidos de diferentes alimentos, sin embargo, los hábitos han cambiado con el paso de los años, razón por la cual la industria de los alimentos se ha planteado grandes desafíos para promover la producción de alimentos fortificados, a los cuales se les adiciona nutrientes en cantidades lo suficientemente importantes que ayudan a conseguir que el alimento sea más rico que el original en los nutrientes añadidos y que coadyuven a una mejor salud humana y darle un mejor estilo de vida, reduciendo el riesgo de enfermedades (Bruzos y col., 2011; Multon, 2010).

Investigaciones recientes demuestran que la ingesta de alimentos fortificados ha aumentado y dependiendo de las necesidades del consumidor son los retos de la industria de alimentos. Uno de los estudios presenta los mecanismos potenciales mediante los cuales las proteínas del suero de leche pueden reforzar el estado físico de los deportistas, ya que las proteínas del suero de leche por su alta calidad y con un mínimo de grasa, carbohidratos y lactosa, están bioquímicamente diseñadas para reforzar el sistema inmunológico (Cribb, 2005).

Otro estudio de interés ha sido la adición de ácido fólico para mujeres embarazadas, (Auris, 2010) en una bebida láctea a base de harina de Arracacha (sustituto la harina de trigo) elevando su valor nutricional. También se ha adicionado calcio para

prevenir la osteoporosis, fibra para mejorar la función intestinal, prebióticos y probióticos de diversas aplicaciones (Olagnero y col., 2007). Muchos de estos productos pueden presentarse como bebidas lácteas o subproductos de la misma, ya que su composición contribuye como fuente natural de los nutrientes requeridos.

Considerando que muchas bebidas lácteas son emulsiones, estas bebidas pueden ser fortificadas con vitaminas como la A, D y E que son liposolubles, mientras que proteínas, minerales, fibras, probióticos (*Lactobacillus casei*), pueden incorporarse a la fase acuosa. La formación de la emulsión se logra industrialmente al combinar derivados de leche en polvo y aceites, con los nutrientes solubles o insolubles en agua, a través de fuerzas mecánicas, formando sistemas dispersos de dos fases no miscibles. Por ello, uno de los aspectos a cuidar en la elaboración de las mismas, es la estabilidad, ya que después de ser producidas no son consumidas inmediatamente. Para lograr la estabilidad de las bebidas lácteas, se puede adicionar emulsificantes y polisacáridos espesantes, que en combinación funcionan como estabilizantes (Tcholakova y col., 2006).

Considerando que las proteínas lácteas son de excelente calidad nutricional, la elaboración de una emulsión láctea fortificada con proteína empleando el concentrado de suero de leche como fuente, se aprovecharán las proteínas globulares, cuyo componente mayoritario es la lactoglobulina, la cual actúa como emulsificante, ya que tiene la capacidad de interactuar con las moléculas hidrofóbicas e hidrofílicas favoreciendo la formación de la emulsión láctea.

Otro componente de variación puede ser el aceite vegetal, ya que dependiendo de los requerimientos del consumidor, se pueden formular emulsiones a diferentes concentraciones. En este caso, la función de las moléculas lipídicas es actuar como modificadores de la viscosidad y la textura, debido a su capacidad de desarrollar propiedades superficiales, de interaccionar con las proteínas y formar agregados (Riera y col., 2004; Euston y col., 1999; Panaras y col., 2011).

Debido a que las emulsiones se elaboran con diferentes tipos y concentraciones de lípidos, agentes emulsificantes y espesantes, su comportamiento reológico pueden exhibir propiedades tanto de líquidos de baja viscosidad hasta de semisólidos (McClements, 1999). El conocimiento de estas propiedades permite explicar la estructura macromolecular de la emulsión, además de ser indispensables en el diseño de equipos y bombas.

Por ello, en este estudio se determinará el efecto del concentrado de suero lácteo y la concentración de aceite en las propiedades reológicas y estabilidad de una base de emulsión láctea fortificada. Como parámetro de control, se evaluarán el efecto de la goma xantana, la adición de vitaminas y los componentes en la fase acuosa. La variación de la proteína tiene como objetivo evaluar su función emulsificante, en la estabilidad de la emulsión, en diferentes proporciones de aceite, el cual sirve como el vehículo para incorporar los ingredientes liposolubles.

CAPÍTULO I ANTECEDENTES

1.1 Bebidas lácteas

De acuerdo con la NORMA Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010, las bebidas lácteas son derivados de la leche y se definen como productos obtenidos a partir de la leche o sus derivados y otros ingredientes funcionalmente necesarios para su elaboración, incluidos los productos con grasa vegetal. Las bebidas lácteas pueden ser fortificadas por diferentes micronutrientes como son las proteínas y vitaminas para conseguir que el alimento sea más rico que el original en los nutrientes añadidos dando mayor aporte al alimento (Paquin, 2009; Multon, 2010).

Desde el punto de vista fisicoquímico las bebidas lácteas son emulsiones complejas elaboradas con leche y grasa vegetal, con pH ácido o neutro (Dallant, 2013), son dispersiones inestables que necesitan la unión forzada de dos fases no miscibles en la cual fase dispersa se mantiene distribuida en forma de partículas de aceite en la fase continua, que generalmente está formada por agua y otros microcomponentes.

Esta organización se consigue por el carácter dipolar del emulsificante, que le permite orientarse en la zona de la interfase aceite-agua, de manera que favorece un estado de equilibrio entre las dos fases. Termodinámicamente las emulsiones buscan su estado de menor energía, lo que da como resultado diferentes formas de desestabilización (Cubero y Villalta, 2002; Panaras y col., 2011).

1.1.1 Clasificación

De acuerdo con la Normatividad Internacional, la bebida láctea se puede clasificar, por su composición, proceso y cantidad de lactosa (NTE INEN 2564:2011).

Por su composición, la bebida láctea se clasifica en:

- Bebida láctea con suero de leche.
- Bebida láctea compuesta.

Por su proceso, la bebida láctea se clasifica como:

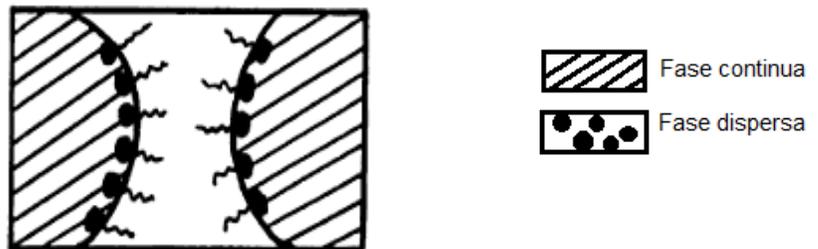
- Pasteurizada.
- Ultrapasteurizada.
- Esterilizada.

De acuerdo al contenido de lactosa:

- Baja en lactosa o deslactosada.
- Parcialmente deslactosada.

Así mismo las bebidas lácteas se pueden clasificar por su composición fisicoquímica con base a la naturaleza de la fase continua:

- Emulsiones agua en aceite (Figura 1.1): Formadas por una fase dispersa de agua, o líquidos miscibles en ella, y una fase continua aceite.



- Emulsiones aceite en agua (Figura 1.2): Formadas por una fase dispersa aceite y la fase continua acuosa.



Figura 1.2 Emulsión aceite en agua (Cubero y Villalta, 2002)

Algunos ejemplos de las emulsiones agua en aceite son la mantequilla y la margarina, sin embargo las bebidas lácteas se encuentran dentro de la clasificación aceite en agua, otros ejemplos son la leche, crema y las bases para los helados (Cubero y Villalta, 2002).

En este proyecto se analizará una bebida láctea clasificada de acuerdo a la Normatividad Internacional como una bebida láctea con suero de leche deslactosada que por sus propiedades fisicoquímicas es una emulsión aceite en agua.

1.1.2 Componentes principales

Las bebidas lácteas están elaboradas con diferentes ingredientes, muchos de los cuales son de composición compleja, contienen una amplia variedad de componentes químicos y pueden ser definidas por sus ingredientes (Cuadro 1.1) (McClements, 1999).

Cuadro 1.1 Componentes típicos encontrados en una emulsión láctea (McClements, 1999).

Macrocomponentes	Microcomponentes
Proteínas	Emulsificantes
Lípidos	Minerales
Agua	Gomas
Carbohidratos	Colorantes
	Saborizantes
	Conservadores
	Vitaminas

Los componentes de una bebida láctea interactúan uno con otro, ya sea físicamente o químicamente, determinando las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del producto final. Por lo anterior la producción de una bebida láctea de calidad depende de la función que cada componente realice individualmente y cómo se comporta a nivel global (McClements, 1999).

Proteínas

Las bebidas lácteas suelen ser llamadas como derivados líquidos elaborados a base de leche, ésta presenta una invaluable fuente de proteínas de alta calidad, que en cantidades adecuadas ayudan a mejorar el bienestar del consumidor, además de que éstas mismas favorecen la formación de las mismas por sus propiedades anfifílicas (Pincay, 2010).

En general, las proteínas tienen propiedades funcionales (propiedades físicas y químicas que afectan el comportamiento de los sistemas alimentarios durante el procesamiento, el almacenamiento, la preparación y el consumo), de gran importancia como su alta solubilidad, su aumento de viscosidad así como emulsificante y espumante (Kinsella, 1982).

Las propiedades funcionales de las proteínas dependen de diferentes factores tales como:

- Factores intrínsecos de la proteína: composición, estructura, carga neta y solubilidad.
- Factores extrínsecos: temperatura, pH, sales y concentraciones a las cuales sean solubilizadas..
- Efectos del procesamiento: homogeneización, calentamiento, congelación, y almacenamiento.
- Componentes de los alimentos: lípidos, carbohidratos, sales y proteínas.

Por tal motivo las proteínas son uno de los biopolímeros más utilizados como ingredientes en la elaboración de emulsiones, éstas se encuentran presentes en la leche, como las caseínas, la β -lactoalbúmina y la α -lactoglobulina, éstas últimas se encuentran en el suero de leche. Las proteínas lácteas, gracias a sus 20 diferentes aminoácidos primarios, unidos vía enlaces amida, así como por sus propiedades fisicoquímicas y físicas, como tamaño, forma, composición, carga neta, solubilidad y reactividad química, son responsables en gran medida de la textura y de las características reológicas de muchos alimentos que las contienen entre ellos las

bebidas lácteas, además de que las proteínas del suero de leche son excelentes emulsificantes (Ye, 2011).

La importancia de las caseínas en las bebidas lácteas radica en que muestran una estructura primaria, de la cual se deducen diversas características singulares, la primera es que existen ocho puntos de fosforilación post-translacional y por tanto esta proteína exhibe interacciones con el calcio, el agrupamiento de residuos polares y no polares, con una estructura dipolar singular compuesta por un dominio cargado altamente solvatada y un dominio globular hidrofóbico. La naturaleza anfifílica de la estructura de la caseína es un factor clave de la capacidad única de esta proteína de estabilizar la micela de la caseína de leche, exhibe excelente solubilidad y estabilidad al calor por encima de pH 6, estas proteínas tienen propiedades emulsificantes (Fennema, 1996).

La β -lactoglobulina es la proteína más abundante del suero lácteo la cual se encuentra representada en la Figura 1.3, es una proteína globular con una cadena polipeptídica, esta estructura se estabiliza con uniones disulfuro, en forma de una red tridimensional, que resulta de un balance de varias fuerzas atractivas y repulsivas, que ocurren en diferentes partes de la cadena polipeptídica y las moléculas del solvente. Presenta una gran cantidad de residuos hidrofóbicos, es una proteína muy soluble en agua ya que la mayoría de los grupos no polares están ocultos en el interior de la molécula y la mayoría de los grupos polares están expuestos en la superficie, es muy atractiva superficialmente, por lo tanto, proporciona buenas propiedades espumantes y emulsificantes. Estas propiedades se ven modificadas por las condiciones del pH, fuerza iónica, entre otras (Martínez, 2010).

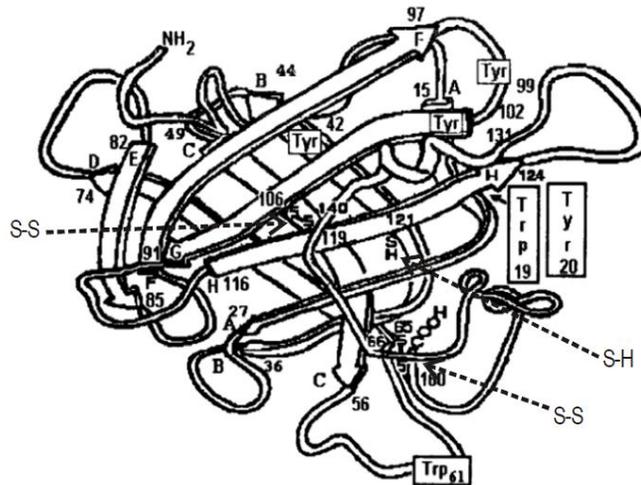


Figura 1.3 Estructura tridimensional de la β -lactoglobulina (Martínez, 2010).

Los concentrados de proteínas del suero son muy deseables como ingredientes nutritivos debido a su alta concentración de aminoácidos. La estabilidad estructural de la β -lactoglobulina, es tal que experimenta cambios estructurales irreversibles en el intervalo de temperatura de muchos procesos térmicos de la leche y productos lácteos, mientras que la lactoalbúmina, debido a su grado de desnaturalización y baja solubilidad, funciona mejor en materiales a los cuales se les miden propiedades reológicas o texturales como lo es la bebida láctea; estas proteínas muestran una buena hidratación y también presentan propiedades emulsificantes (Fennema, 1996).

Lípidos

La formación de emulsiones lácteas requiere de grasas y aceites, ya que aportan nutrientes esenciales y son una fuente de energía para el organismo, mismas que influyen en las propiedades nutricionales, organolépticas y fisicoquímicas de las emulsiones. Los lípidos de la leche están compuestos del 98% de triacilglicéridos y se encuentran presentes como pequeñas partículas llamadas glóbulos de 2-6 μm de tamaño. Los glóbulos están constituidos por un núcleo central que contiene la grasa y que aparece rodeado de una película de naturaleza lipoproteínica conocida como membrana, estos lípidos de la leche y los ácidos grasos en particular son los más

susceptibles a la alteración de todos los componentes de la leche (McClements, 1999; Truong y col., 2014).

Las funciones de las moléculas lipídicas se resumen básicamente en la modificación de la textura, a su capacidad de formar agregados cristalinos, a la capacidad de interaccionar con las proteínas, a la capacidad de dispersarse y emulsificarse esto depende en gran medida de las propiedades superficiales que están relacionados con factores como hidrofobicidad, tensión interfacial, solubilidad, las cuales derivan básicamente de la presencia de sus moléculas en una zona no polar, representada por las cadenas alifáticas de los ácidos grasos. Las cadenas interaccionan entre sí mediante fuerzas de Van der Waals debido a esto, las moléculas lipídicas pueden formar diferentes tipos de estructuras, en las cuales los lípidos polares interaccionan con moléculas de agua y algunas de sus funciones derivan de la capacidad de estabilización de emulsiones debido a su carácter anfílico y a la formación de complejos (Riera y col., 2004).

Vitaminas y minerales

Las bebidas lácteas se encuentran dentro de la gama de alimentos que pueden ser fortificados con vitaminas, ya sea por la pérdida de las mismas durante el proceso de elaboración o por enriquecer dichos productos, ya que todas las vitaminas se degradan en menor o mayor cantidad y dependiendo de las necesidades del consumidor es la cantidad de vitaminas que se adicionan.

De acuerdo a lo reportado por Alais (2003) y Gil (2010), la leche figura entre los alimentos que contienen la variedad más completa de vitaminas y es necesaria para el buen funcionamiento de procesos vitales, dentro de las cuales se encuentran dos grandes grupos:

- Vitaminas liposolubles (A, D y E) asociadas a la materia grasa o lipídica, por esta razón, se encuentran en la nata o crema y en la mantequilla tras el desnatado, por lo que no se hallan en la leche desnatada ni en el lactosuero.
- Vitaminas hidrosolubles (B₁, B₂, C, entre otras) las cuales se encuentran en la fase acuosa, leche desnatada y lactosuero.

Las funciones que desempeñan las vitaminas *in vivo* son diversas (Gil, 2010):

- Como coenzimas o precursores (niacina, tiamina, rivotflavina, biotina, ácido pantoténico vitamina B₆, vitamina B₁₂ y folato)
- Como componentes del sistema de defensa antioxidante (ácido ascórbico, ciertos carotenoides y vitamina E)
- Como factores implicados en la regulación genética (vitaminas A, D)
- En funciones especializadas como la vitamina A en la visión, el ascorbato en diversas reacciones de hidroxilación y la vitamina K en las reacciones de carboxilación específicas; algunas de las vitaminas mencionadas, son añadidas a productos lácteos para la fortificación de los mismos.

La definición de fortificación es la adición de nutrientes en cantidades lo suficientemente importantes como para conseguir que el alimento sea más rico que el original en los nutrientes añadidos. Esta operación puede realizarse añadiendo nutrientes normalmente ausentes o perdidos durante el proceso de elaboración de las bebidas lácteas (Fennema, 1996; Multon, 2000).

En el caso de las bebidas lácteas, la fuente de algunos de los minerales presentes en las mismas se obtienen de la leche en polvo, la cual puede proporcionar calcio, potasio y fósforo y a pesar de no existir una definición universal de los nutrimentos inorgánicos, para los alimentos y la nutrición, este término puede referirse a los elementos distintos del carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno presentes en los alimentos, éstos son cuatro elementos no minerales y se encuentran formando parte principalmente de moléculas orgánicas y del agua, constituyendo un 99% del número total de átomos de

los sistemas vivos, por lo anterior, se encuentran en los alimentos a concentraciones relativamente bajas y desempeñan papeles clave tanto en los sistemas vivos como en los alimentos (Paquin, 2009; Fennema, 1996).

La leche contiene alrededor de 1% de sustancias minerales, éstas se encuentran en forma de sales disueltas o en estado coloidal formando compuestos con las caseínas, la mayoría de las sales son inorgánicas aunque también las hay orgánicas mismas que están constituidas por cationes y aniones. En la composición en minerales de la leche se pueden distinguir entre macroelementos y oligoelementos y tienen una enorme importancia en la estabilidad de la bebida láctea, así, la estabilidad de las proteínas depende de lo que se conoce como “equilibrio iónico de la leche” y este efecto se debe a los componentes salinos de la leche, ya que una parte importante se encuentra en la fase coloidal estrictamente asociados a las micelas de la caseína, más de dos tercios de partes de calcio y fósforo, y un tercio de magnesio, se encuentran en estado coloidal, por lo tanto hay un equilibrio natural entre el calcio y el magnesio así que cualquier modificación de este equilibrio altera la estabilidad de la leche (Gil, 2010).

1.1.3 Componentes en menor proporción.

Aditivos

La formación de una emulsión láctea requiere diferentes aditivos los cuales pueden definirse por el CODEX STAN 107-1981, como toda sustancia que normalmente no es consumida como alimento en sí y no utilizada habitualmente como ingrediente característico en la alimentación, aportando o no valor nutritivo y cuya adición intencionada a los alimentos es con un objetivo tecnológico en el momento de su fabricación, los cuales para este caso son estabilizantes, espesantes o emulsificantes.

Agente emulsificante

Los agentes emulsificantes son moléculas superficialmente activas que se adsorben en la superficie de las partículas de aceite, ya que es una molécula anfifílica que tiene una parte hidrofílica, la cual tiene afinidad con el agua y otra parte lipofílica, la cual

tiene afinidad con el aceite como se muestra en la Figura 1.4, de la cual resulta la formación de una membrana protectora que retarda la aproximación entre las partículas y su posterior agregación (McClements, 1999).

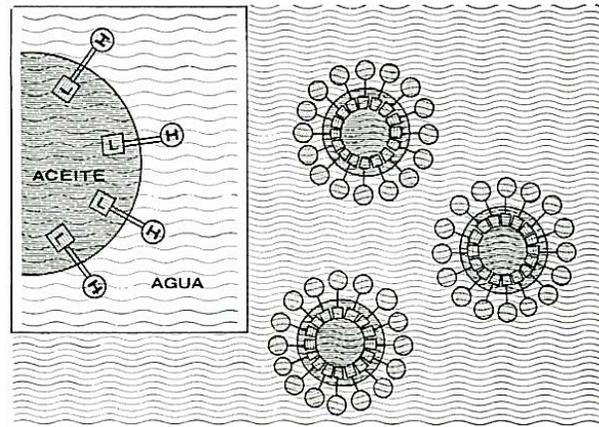


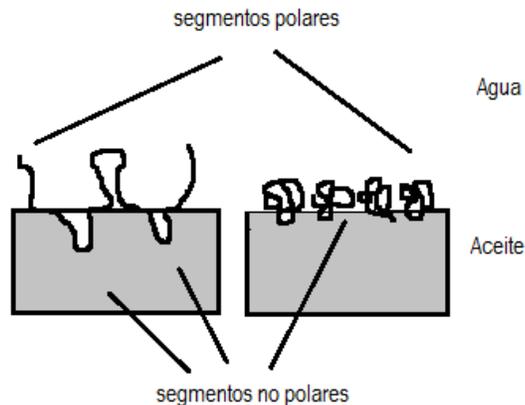
Figura 1.4 Representación gráfica de la acción de un emulsificante

De acuerdo con lo reportado por McClements (1999), los agentes emulsificantes se pueden clasificar en dos grupos:

- Agentes emulsificantes de bajo peso molecular, conocidos como surfactantes, que son principalmente iónicos, algunos ejemplos de éstos son los monoglicéridos, ésteres de sacarosa y ácidos grasos. Las propiedades funcionales del surfactante están determinadas por su estructura química.
- Biopolímeros emulsificantes, dentro de los cuales se encuentran las lipoproteínas, los polisacáridos y las proteínas, como las del suero de leche, las cuales generalmente son utilizadas como componente principal en las bebidas lácteas. Estos biopolímeros contienen cantidades importantes de grupos polares y no polares de superficie activa. Cuando el biopolímero se adsorbe en la interfase, puede adoptar una conformación como se muestra en la Figura 1.5, donde los grupos polares están localizados en la fase acuosa, lo

cual reduce el área de contacto entre las moléculas del agua y aceite, por lo tanto, la tensión interfacial disminuye.

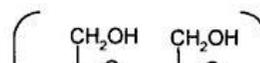
Figura 1.5 Orientación de los grupos polares y no polares en un biopolímero (McClements, 1999).



Agente estabilizante o espesante

Los polisacáridos tienen diferentes propiedades funcionales como como estabilizar suspensiones, espumas y emulsiones, esto se logra impidiendo el cambio de forma o naturaleza química de los productos alimenticios a los que se incorporan, inhibiendo reacciones o manteniendo el equilibrio químico de los mismos. Dentro de éstos se podría incluir la goma xantana que se añade para aumentar la viscosidad, esta característica se da por el hecho de ser un polisacárido ramificado como se muestra en la Figura 1.6, de tal manera que pueden ser utilizada en las bebidas lácteas. Este heteropolisacárido es soluble en agua y leche en frío, teniendo un efecto fluidificante de características no tixotrópicas y alta fluidez al cizallarlos a causa de un progresivo alineamiento de las moléculas rígidas (la viscosidad inicial se recupera instantáneamente) (García, 2010).

Su viscosidad está muy poco influenciada por la temperatura, ya que después de tratamientos térmicos, como esterilización o pasteurización, se recupera una vez que disminuye su temperatura. Tampoco experimenta cambios de textura después de



conservarse a temperaturas de refrigeración o a temperatura ambiente. Se considera también un agente de control reológico en sistemas acuosos y como estabilizante en emulsiones y suspensiones. Es bastante estable a los tratamientos mecánicos (Cubero y Villalta, 2002).

Figura 1.6 Estructura molecular de la goma xantana (Cubero y Villalta, 2002).

1.2 Interacción entre biopolímeros

En las bebidas lácteas, la interacción entre los biopolímeros, depende de las condiciones en las que se encuentre la proteína, y de los tratamientos, a los que se han sometido, algunos ejemplos son el calentamiento, la adición de sales y la mezcla con otros biopolímeros. Todos estos comportamientos (covalente, electrostáticas, hidrofóbicas, etc) se dan por interacciones entre las moléculas proteínicas y las de otros polisacáridos (Martínez, 2010).

Las interacciones dependen de las fuerzas intermoleculares entre los biopolímeros que se describen en el Cuadro 1.2

Cuadro 1.2 Fuerzas intermoleculares que contribuyen a la interacción entre biopolímeros (McClements, 1999).

Covalentes	Unión muy fuerte formada entre grupos reactivos específicos de diferentes macromoléculas.
Electrostáticas	Interacción que puede ser repulsiva o atractiva según las cargas eléctrica sean del mismo signo u opuesto, respectivamente. La fuerza de estas interacciones disminuye con el aumento de la fuerza iónica.
Volúmenes de exclusión	Es una interacción repulsiva dada por el gran volumen ocupado por algunos biopolímeros en solución, produciendo un importante efecto sobre la exclusión estérica, es decir, hay una reducción en el volumen disponible a ser ocupado por una molécula de biopolímero.
Uniones hidrógeno	Interacción atractiva moderadamente fuerte entre átomos de hidrógeno y otros átomos mucho más electronegativos. Las uniones puente hidrógeno son menos importantes cuando aumenta la temperatura.
Hidrofóbicas	Interacción atractiva moderadamente fuerte de origen entrópico entre grupos no polares. Las uniones hidrofóbicas aumentan su fuerza con el aumento de la temperatura.
Puentes iónicos	Tipo específico de interacción que involucra la unión de cationes polivalentes con dos grupos aniónicos diferentes.
Van der Waals	Interacción atractiva débil de origen electromagnético entre grupos con dipolos inducidos o permanentes.

La importancia de estas interacciones en un sistema particular depende del tipo de biopolímero involucrado (peso molecular, densidad de la carga en función del pH, flexibilidad e hidrofobicidad), las características de la solución (pH, fuerza iónica), y las condiciones ambientales (temperatura, cizalla) (McClements, 2009).

Los posibles interacciones que pueden observarse en la mezcla polisacárido- proteína se muestran en la Figura 1.7

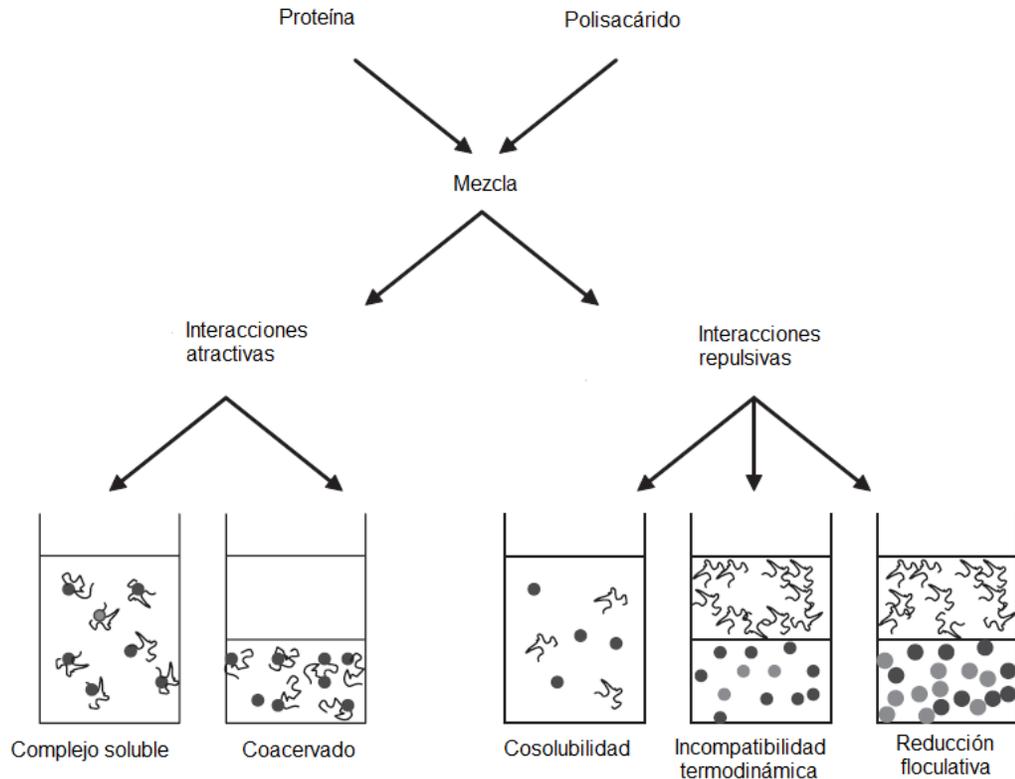


Figura 1.7 Interacción polisacárido-proteína, sistemas obtenidos de la mezcla de los biopolímeros (Goh y Singh, 2009).

Interacción proteína-polisacárido

Las proteínas de la leche y del suero en conjunto con la goma xantana, juegan un rol muy importante en la estructura y la estabilidad de las bebidas lácteas, la combinación de estos componentes fue estudiado en el presente proyecto, sin embargo, las interacciones proteína-polisacárido en general se dividen en dos grandes grupos las cuales se describen a continuación (Goh y Singh, 2009):

Interacciones atractivas y repulsivas entre diferentes macromoléculas que pueden estar dadas por los varias tipos de fuerzas, estas interacciones son las responsables de la formación de complejos y de la inmiscibilidad de biopolímeros., de tal forma que la interacción entre los biopolímeros puede ser segregativa (los biopolímeros se

repelen unos a otros y entonces se definen como incompatibles) o asociativa cuando son de diferentes cargas y se atraen unos a otros)

En disoluciones segregativas la mezcla generada con dichas características, es estable debido al efecto predominante de la entropía de mezclado y la proteína y el polisacárido son cosolubles. Cuando se aumenta la concentración de los biopolímeros pueden ocurrir los fenómenos llamados de asociación o segregación, por otro lado, existe asociación entre las moléculas de los distintos biopolímeros (carga neta opuesta) pueden producirse la formación de complejos no solubles que precipitan obteniéndose dos fases separadas, una fase coacervada que contiene a los complejos y la otra fase diluida con baja concentración de ambos biopolímeros. Este fenómeno se llama coacervación compleja y es un fenómeno de complejamiento (Doublie y col., 2000).

En ciertos casos, las atracciones electrostáticas pueden llevar a la formación de complejos solubles, obteniéndose un sistema de solo una fase. En este caso es debido aun efecto de solubilidad por complejamiento.

Por último, en condiciones donde predominan las fuerzas de repulsión entre los biopolímeros (misma carga neta), puede obtenerse un sistema de dos fases en el cual ambos componentes macromoleculares están concentrados en diferentes fases. Esto se debe a la incompatibilidad entre las proteínas y polisacáridos en medio líquido, entonces se presenta el fenómeno de segregación (Goh y col., 2009).

1.3 Emulsiones lácteas

1.3.1 Formación y equipo

La elaboración de una bebida láctea se obtiene mediante un proceso llamado homogeneización, que tiene por objetivo convertir dos líquidos inmiscibles en una emulsión. Es necesario dispersar varios ingredientes dentro de la fase que sea más soluble para los componentes, por ejemplo, las vitaminas, colorantes, antioxidantes son generalmente mezclados con la fase oleosa (aceite), mientras que los ingredientes proteínas, polisacáridos, azúcares y sales son mezclados con agua. La formación de

emulsiones lácteas requiere de una pre-homogenización y una homogeneización secundaria, las cuales consisten en un mezclado a alta velocidad y una homogeneización a alta presión. La reducción de tamaño de partículas en cada etapa se muestra en la Figura 1.8, la cual es posible con un homogeneizador de alta presión, y este flujo de alta presión crea una agitación vigorosa, inmediatamente después de la agitación se forma una emulsión, la cual puede ser observada como un líquido opaco (McClements, 1999; Friberg y col., 2005).

Mezclado a alta velocidad

Los mezcladores a alta velocidad son de los métodos comúnmente usados para homogeneizar lípidos y fases acuosas en la industria de los alimentos. Los líquidos que son homogeneizados son puestos en un recipiente, el cual puede o no contener una pequeña cantidad de otro líquido, a continuación son mezclados a altas velocidades. La rápida rotación del mezclador, genera una combinación longitudinal, rotacional y radial de los gradientes de velocidad en los líquidos que desorganiza la interfase de agua y aceite haciendo que los líquidos estén entremezclados, rompiendo las grandes partículas en pequeñas. Una homogeneización eficiente, se consigue cuando los perfiles del flujo horizontal y vertical se distribuyen uniformemente a través del recipiente. El diseño del agitador también determina la eficiencia del proceso de homogeneizado. El mezclado generalmente conduce a un incremento de la temperatura de una emulsión porque parte de la energía mecánica, se convierte el calor debido a la disipación viscosa. Si alguno de los ingredientes de la emulsión es sensible al calor es necesario controlar la temperatura del recipiente durante la homogeneización. Los mezcladores de alta velocidad son particularmente usados para preparar emulsiones con viscosidades bajas o intermedias (McClements, 1999).

Homogeneización a alta presión

Para efectuar la emulsificación se pasa ambas fases por una válvula de resorte, a alta presión entre 35 y 210 kPa. La emulsificación se efectúa no sólo al pasar los componentes por debajo del asiento de la válvula, sino también cuando la emulsión choca contra la pared de retención que circunda la válvula. Los homogeneizadores se

construyen también con más de un paso de emulsificación, esto es con válvulas de escape sucesivas. Esto es útil en algunos casos en que la homogeneización a fuerte presión fomenta la aglutinación de las partículas finas de la emulsión que forma. El segundo paso de homogeneización a menor presión desintegra los grumos y da un producto de menor viscosidad. Empleando ingredientes similares los homogeneizadores dan por lo general una emulsión de menor tamaño de partícula que los molinos coloidales, aunque no es tan uniforme dicho tamaño de partícula. El aumento de temperatura durante la homogeneización no es muy grande (McClements, 1999).

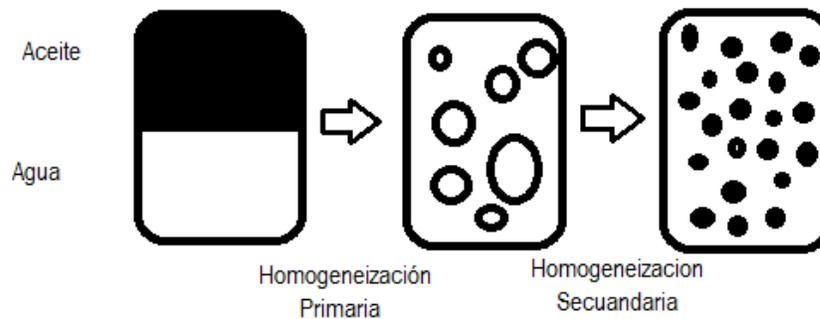


Figura 1.8 Tipos de homogeneización (McClements, 1999).

1.3.2 Factores que intervienen en la formación de bebidas lácteas

Los factores que pueden intervenir en la formación de bebidas lácteas son, tipo y concentración del emulsificante, propiedades y componentes de la fase, y temperatura, entre otros, los cuales se describen a continuación:

a) Tipo y concentración del emulsificante

El emulsificante reduce la tensión interfacial entre la fase acuosa y la fase lipídica, dando como resultado la disminución de tamaño de partícula, ya que se adsorbe en la superficie de las partículas durante la homogeneización formando una membrana resistente y firme, que evita que las moléculas regresen a su estado de menor energía. La naturaleza química y la concentración del agente emulsificante tienen efecto sobre la viscosidad y la estabilidad de la emulsión (McClements, 1999).

b) Propiedades y componentes de las fases

La composición y propiedades fisicoquímicas de las fases de la emulsión influyen en el tamaño de las partículas producidas durante la homogeneización y la viscosidad global de la emulsión. Se pueden ver afectadas por las variaciones del tipo de aceite, ya que las fases tienen diferente tensión interfacial cuando el aceite se pone en contacto con la fase acuosa, dependiendo de su naturaleza, cuenta con diferentes estructuras moleculares y diferentes cantidades de componentes de superficie activa, tales como ácidos grasos libres, diglicéridos, entre otros. Estos componentes lipídicos de superficie activa tienden a acumularse en la interfase aceite-agua, reduciendo la tensión interfacial, disminuyendo así la cantidad de energía requerida para lograr la ruptura de las partículas de aceite (McClements, 1999).

c) Temperatura

La temperatura influye en el tamaño de partículas producidas durante la homogeneización, la viscosidad de la fase acuosa y la fase oleosa son dependientes de la temperatura, es también importante porque determina el estado físico de la fase lipídica. Es imposible realizar una emulsión láctea, si la fase lipídica se encuentra en estado sólido, debido a que no fluye a través del homogeneizador o por la enorme cantidad de energía que se necesita para romper los cristales de grasa, de tal manera que los cristales de una partícula penetran en otra haciendo un gran cúmulo de los mismos y esto genera un aumento de la viscosidad que al ser homogeneizado puede bloquear el equipo (McClements, 1999).

1.3.3 Procesos de inestabilidad

Las emulsiones lácteas estables son aquellas que no sufren ningún cambio en la distribución y tamaño de partículas, en su estado de agregación o en su arreglo espacial, y éstas tienen que ser capaces de resistir cambios a través del tiempo. Sin embargo, todas las emulsiones son inestables por naturaleza, debido al rompimiento de la barrera de energía que se encuentra en las fases de la emulsión, formando

agregados, separación de fases y la adsorción o la combinación de los anteriores como se muestra en la Figura 1.9 (Dickinson, 1986).

Como ya se mencionó en la formación de emulsiones normalmente se distinguen dos componentes: el emulsificante y el estabilizante; los cuales generalmente caen en dos categorías, moléculas pequeñas o biopolímeros.

La presencia de polisacáridos con carga positiva o negativa en emulsiones estabilizadas con proteínas puede tener una gran influencia en las propiedades de la emulsión. El tipo de polisacárido y la carga determinará la naturaleza de las interacciones entre proteína y polisacárido, así como el mecanismo de desestabilización en la emulsión (Charalambous, 1989).

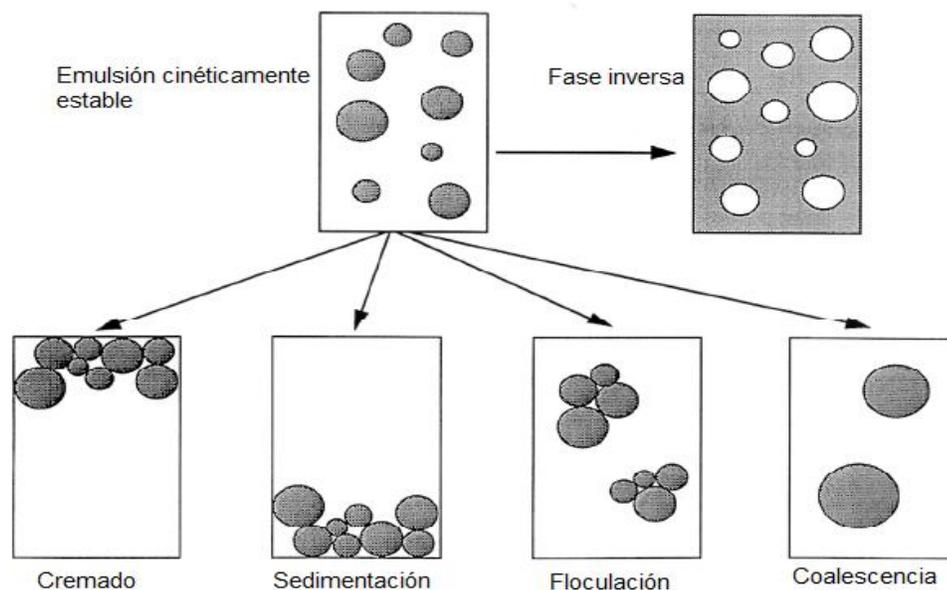


Figura 1.9 Procesos de inestabilidad de las emulsiones (McClements, 1999).

Las emulsiones pueden sufrir los distintos cambios físicos, las que por su naturaleza fisicoquímica son llamadas aceite en agua, tienden a sedimentar y no a cremar. La maduración de Ostwald no suele producirse en las emulsiones aceite en agua, porque los lípidos constituidos por triglicéridos, que son los habitualmente usados, son

insolubles en agua. Sin embargo, las emulsiones agua en aceite pueden presentar maduración de Ostwald, los diferentes procesos de desestabilización son descritos a continuación (Fennema, 1996):

Cremado y sedimentación

En general las partículas de una emulsión tienen diferente densidad a las del líquido que las rodea y si estas partículas tienen una densidad menor, a las del líquido tienden a moverse hacia arriba, haciendo referencia al cremado, en cambio, si la densidad es mayor que la del líquido, tenderán a moverse hacia abajo, ésto corresponde a la sedimentación. Lo anterior asume que las emulsiones aceite-agua tendrán cremado, mientras que las agua-aceite sedimentación. La agregación facilita considerablemente el cremado y, si ocurre, el cremado incrementa la velocidad de agregación y así sucesivamente.

Floculación

Las partículas en las emulsiones están en continuo movimiento debido al efecto de la energía térmica, gravedad o fuerzas aplicadas mecánicamente y cuando dichas partículas se mueven con frecuencia chocan con partículas vecinas. Después de la colisión, las partículas de la emulsión pueden separarse o quedarse juntas. Esto dependerá de la magnitud de las interacciones atractivas o repulsivas entre ellas.

La floculación es el proceso por el cual dos o más partículas se mantienen juntas, sin estar en contacto íntimo, separándose por una capa de surfactante o polímero, este proceso está controlado por un equilibrio global entre las fuerzas de atracción electrostáticas de Van der Waals, repulsivas de tipo estéricas y de hidratación a medida que avanza el proceso de floculación.

Coalescencia

La coalescencia es inducida por la ruptura de la película fina que separa las partículas próximas este proceso puede ser observado en la Figura 1.10. Si en la película se forma un pequeño orificio, las partículas convergerán. La rotura de la película es un suceso casual, que tiene importantes consecuencias:

- La probabilidad de coalescencia, cuando es posible, será proporcional al tiempo durante el cual las partículas permanezcan próximas.
- La coalescencia es un proceso de primer orden, a diferencia de la agregación que en principio, es de segundo orden con respecto al tiempo y a la concentración.
- La probabilidad de que se rompa una película será proporcional a su área.

Esto implica, que por aumentar el área de la película el aplanamiento de las partículas, al aproximarse, promoverá la coalescencia. Las partículas de aceite normalmente presentes en las emulsiones alimenticias no sufren aplanamiento. La coalescencia sólo se da si las partículas se aproximan entre sí, es decir, en los agregados o en las capas de la crema. Cuanto más compacta sea la capa de la crema, más rápida será la coalescencia. Si se produce la coalescencia parcial de la capa de crema, esta capa adquirirá las características de un tapón sólido. La coalescencia se determina por la formación de partículas grandes, mientras que en la coalescencia parcial coalescerán en partículas grandes cuando se calienten lo suficiente para fundir cristales de triacilglicerol. Es frecuente que la coalescencia o la coalescencia parcial conduzcan a distribuciones de tamaño muy amplio

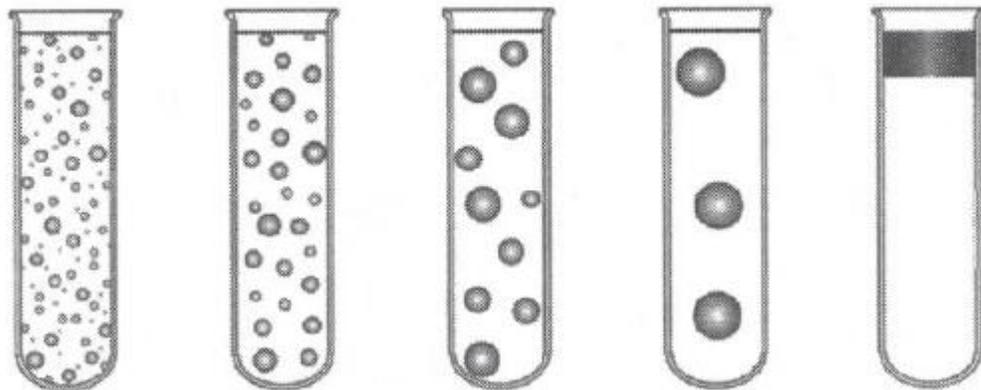


Figura 1.10 Proceso de inestabilidad de una emulsión: coalescencia (McClements, 1999).

La coalescencia es menos probable en:

- Las partículas más pequeñas: Las partículas más pequeñas tienen una película de menor área y por tanto menor probabilidad de ruptura de la misma; se necesita más coalescencia para obtener partículas de un cierto tamaño: la velocidad de cremado disminuye.
- Cuanto más gruesa sea la película que separa las partículas: Una película más gruesa supone fuerzas repulsivas más intensas o de mayor alcance, entre las partículas que les conceden mayor estabilidad contra la coalescencia.
- Cuanto mayor es la tensión interfacial: Esto puede parecer extraño porque para hacer una emulsión se necesita un surfactante y los surfactantes disminuyen la tensión interfacial. Además, valores de tensión interfacial más pequeños implican que el sistema tiene menor energía libre superficial. Sin embargo, lo que importa es la energía libre de activación para la ruptura de la película, que es mayor cuando mayor es la tensión interfacial, porque un valor de tensión interfacial grande dificulta más la deformación de la película y la deformación facilita la ruptura (Fennema, 1996).

1.4 Reología de fluidos

Los alimentos líquidos como leche y los derivados de la misma como las bebidas lácteas, son transportados por medio de bombas en alguna etapa del procesamiento o en el empaque, por lo que sus características de comportamiento al flujo son importantes para determinar la potencia que se necesita en el bombeo, definir el tamaño de la tubería y seleccionar intercambiadores de calor, entre otros. Por lo que el transporte de los alimentos está directamente relacionado con las propiedades de los líquidos, en particular la densidad y la viscosidad (Sharma y col., 2007).

La ciencia que estudia las propiedades de flujo de los alimentos fluidos, como las bebidas lácteas, es conocida como reología, la cual tiene como objetivo estudiar el comportamiento de los materiales sometidos a fuerzas externas, desarrollando posteriormente un modelo matemático entre las variables involucradas que permita obtener las propiedades reológicas del material (Méndez y Ramos., 2009).

Las variables involucradas en la reología se definen de la siguiente manera (Steffe , 1996; Rao, 1999; Ramírez-Navas, 2006):

- Deformación: es el cambio de tamaño o forma de un cuerpo, debido a esfuerzos externos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo.
- Deformación de cizalla: es el cambio tangencial del tamaño o forma de un cuerpo debido a una fuerza aplicada paralelamente a un plano (unidireccional).
- Esfuerzo: cantidad matemática que representa a las fuerzas externas aplicadas a un material por unidad de área.
- Esfuerzo de cizalla: esfuerzo que actúa paralelamente al plano sobre es aplicado una fuerza. Los esfuerzos de cizalla tienden a favorecer la deformación lo largo de un plano.
- Velocidad de deformación: es la variación de la deformación en función del tiempo.
- Velocidad de cizalla: es la variación de la deformación de cizalla en función del tiempo.

Dependiendo de la respuesta al esfuerzo aplicado, el material puede comportarse como fluido, donde predominan las propiedades viscosas, como sólido, donde predomina el carácter elástico del material, o intermedio como semisólido viscoelástico (Steffe, 1996; Rao, 1999).

1.4.1 Clasificación de los fluidos

Los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos, los no newtonianos pueden ser dependientes e independientes del tiempo de cizallamiento (Steffe, 1996), las bebidas lácteas a las que se ha adicionado hidrocoloides como la goma xantana, exhiben una gran capacidad fluidificante característica de los polisacáridos.

Fluidos newtonianos

Los fluidos newtonianos por definición tienen una relación lineal entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla partiendo del origen, cuya pendiente es la viscosidad, el comportamiento es mostrado con el reograma de la Figura 1.11 (Steffe, 1996). Se cuenta con un modelo matemático que describe el comportamiento newtoniano, y está dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

Donde σ es el esfuerzo de cizalla (Pa), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla (s^{-1}) y η es la viscosidad del fluido (Pa.s). Este comportamiento lo presentan la mayoría de las bebidas poco viscosas, tales como la leche, té, café, vinos y bebidas gaseosas sin gas. Así como viscosas, de bajo peso molecular, como jarabes y aceites.

Fluido no newtoniano

Las bebidas lácteas pueden presentar un comportamiento no newtoniano, el cual es definido como aquel fluido cuya viscosidad, varía con la velocidad de cizalla que se le aplique, y como se mencionó, son clasificados como dependientes e independientes del tiempo de cizallamiento (Ibarz M Barbosa-Cánovas, 2005).

Fluido independiente del tiempo de cizallamiento

- Fluidificante. Este tipo de fluidos se caracteriza por una disminución de su viscosidad y de un aumento de esfuerzo de cizalla al incrementar la velocidad de cizalla. La viscosidad depende de la velocidad de cizalla aplicada, pero no del tiempo en el que están sometidos al cizallamiento. La curva de esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla no presenta un comportamiento lineal, a cada valor de esfuerzo de cizalla le corresponde otro de velocidad de cizalla y a la inversa, como se ilustra en la Figura 1.11.
- Reoespesante. Es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo de cizallamiento ya que se presenta a altas velocidades de cizalla, es opuesto al fluidificante, presenta un comportamiento no lineal, pero los valores de esfuerzo de cizalla y velocidad de cizalla están unívocamente relacionados, como se

muestra en la Figura 1.1, en este caso la viscosidad aumenta al aumentar la velocidad de cizalla.

-

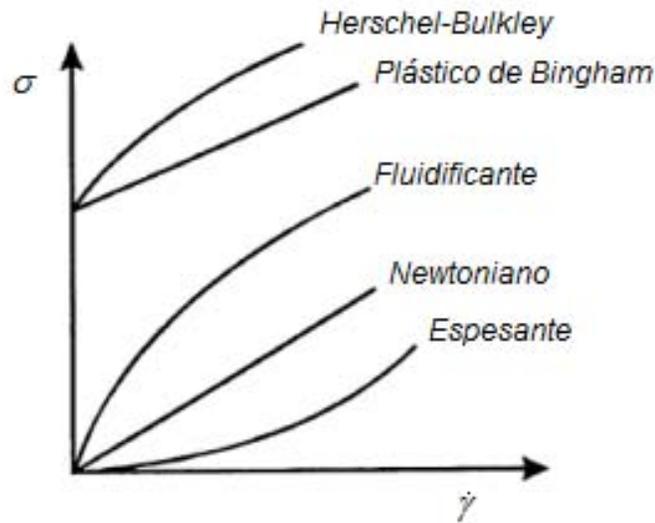


Figura 1.11 Curva de flujo fluidos newtonianos y no newtonianos (Steffe, 1996).

El modelo matemático más simple para describir el flujo de un fluido independiente del tiempo es el de la potencia, está definido por la ecuación potencial:

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n$$

Donde n es el índice de comportamiento al flujo (adimensional) y k es el índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$).

El comportamiento viscoso de los fluidos no newtonianos es mucho más complejo. Por ejemplo, se pueden encontrar fluidos cuya viscosidad a valores de velocidad de cizalla relativamente bajas, puede considerarse constante e independiente de la velocidad de cizalla, es decir, muestra un comportamiento newtoniano. Para valores de velocidad de cizalla intermedios, presentan un comportamiento fluidificante caracterizado por el modelo de la ley de la potencia. Para valores de velocidad de cizalla relativamente altos, el comportamiento vuelve a ser newtoniano (Méndez-Sánchez y col., 2010). Este comportamiento se representa en la Figura 1.12.

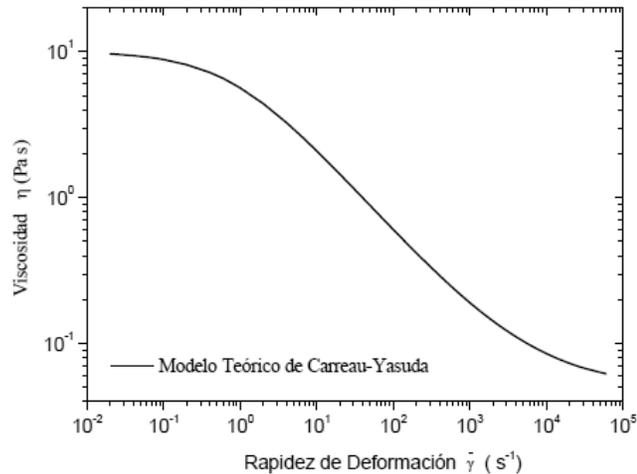


Figura 1.12 Representación del comportamiento viscoso de un fluido no newtoniano empleando el modelo de Carreau- Yasuda

Un modelo generalizado es el de Carreau-Yasuda, que tiene gran flexibilidad para involucrar los modelos antes mencionados y se expresa en la siguiente ecuación:

$$\eta = (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{n}} + \eta_\infty$$

Este modelo consta de cinco parámetros η_0 , correspondiente a la viscosidad newtoniana a valores de velocidad de cizalla bajos, η_∞ es la viscosidad newtoniana, para valores de velocidad de cizalla altos, λ es una constante en el tiempo, n corresponde al comportamiento al flujo del modelo de la potencia y a es una constante adimensional. Dicha ecuación se grafica y se muestra en la Figura 1.12 (Méndez-Sánchez y col., 2010).

Existen otros fluidos que se comportan como sólidos antes de fluir, y después de sobrepasar un esfuerzo de cizalla o esfuerzo inicial, denominado esfuerzo de cedencia, fluyen como fluidos newtonianos o no newtonianos. Ejemplos de fluidos con esta característica son la salsa catsup, el yogurt, los postres lácteos, entre otros (Rao, 1999).

El modelo matemático más simple para describir el flujo de un fluido con un esfuerzo inicial es el plástico de Bingham, que está definido por la ecuación:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta_p \dot{\gamma}$$

En donde σ_0 , es el esfuerzo de cedencia y η_p es la viscosidad plástica y ambos son constantes. Éste es un modelo lineal cuya diferencia con respecto al de Newton es la introducción de un esfuerzo de cedencia que debe superarse para que comience el flujo.

El modelo de Herschel-Bulkley es válido para una amplia gama de materiales, también conocido como, ley de la potencia con esfuerzo de cedencia. Que es el resultado de la combinación de los modelos plástico de Bingham y Ley de la Potencia, la siguiente ecuación describe el comportamiento de un fluido regido por dicho modelo:

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

En este modelo los parámetros n y k se definen igual que en Ley de la Potencia.

Fluido dependiente del tiempo de cizallamiento

- Tixotropía

La tixotropía es el ablandamiento dependiente del tiempo de cizallamiento, la representación gráfica que le corresponde, es una curva similar a la del comportamiento fluidificante en cuanto que la viscosidad desciende a medida que aumenta la velocidad de cizalla y el tiempo de cizallamiento. Si se mantiene constante la velocidad de cizalla, la viscosidad desciende con el tiempo de cizallamiento, de manera que la viscosidad no sólo depende de la velocidad de cizalla, sino también de la duración (tiempo) del cizallamiento.

Cuando la representación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla es dependiente del tiempo (Figura 1.13), se forma un ciclo de histéresis (proceso en el ascenso y descenso de la velocidad de cizalla no coinciden denominado bucle de histéresis).

Ejemplos de este tipo de fluidos pueden ser los purés de frutas, diferentes tipos del yogurt, los postres lácteos con almidón, entre otros (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

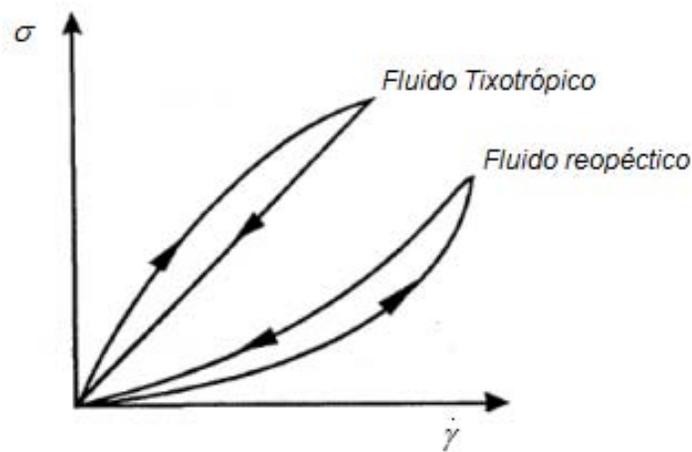


Figura 1.13 Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo.

- Antitixotropía

La antitixotropía es un espesamiento dependiente del tiempo de cizallamiento, la representación gráfica esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla, de dicho comportamiento es también curvilíneo y los parámetros no están unívocamente relacionados. Existen dos valores de velocidad de cizalla, para cada valor de esfuerzo de cizalla en tiempo de cizallamiento diferente, y a la inversa dicho comportamiento es lo inverso a la tixotropía (Figura 1.13). Se ha reportado que algunas suspensiones concentradas pueden presentar este tipo de comportamiento (Botella, 2005).

1.4.2 Factores que determinan la reología de las emulsiones

Las emulsiones exhiben un amplio intervalo de propiedades reológicas, que van desde líquidos de baja viscosidad hasta sólidos, el comportamiento reológico de un alimento depende, en particular, del tipo y concentración de ingredientes que contenga, así como las condiciones de procesamiento y almacenamiento que ha experimentado. De acuerdo con McClements (1999) los factores que afectan la reología de las emulsiones son:

- **Fracción volumen de la fase dispersa**

La viscosidad de una emulsión incrementa con la fracción volumen de la fase dispersa. A bajas concentraciones, éstas incrementan su dependencia lineal en la fracción volumen, pero ésta comienza a ser más pronunciada a altas concentraciones. Por encima de una fracción volumen de fase dispersa (ϕ_c) las partículas están empaquetadas tan estrechamente que no pueden fluir fácilmente unas sobre otras, y así la emulsión tiene propiedades tipo gel o semisólido. La naturaleza precisa de la dependencia de la viscosidad sobre la fracción volumen está determinada principalmente por la naturaleza de las interacciones coloidales entre las partículas.

- **Reología de los componentes**

La viscosidad de una emulsión es directamente proporcional a la viscosidad de la fase continua, por lo que cualquier alteración de la fase continua tiene una influencia sobre la reología de las emulsiones. Las propiedades reológicas del sistema, dependen en gran medida de la presencia de un agente espesante en la fase acuosa o de la presencia de una red de cristales de grasa en la fase oleosa. La reología de la fase dispersa tiene una menor influencia sobre la reología de las emulsiones debido a que las partículas están cubiertas por una membrana o surfactante viscoelástico

- **Tamaño de partícula**

La influencia del tamaño de partícula y la distribución del tamaño de partícula en la reología de las emulsiones depende del volumen de la fracción de la fase dispersa y de las interacciones coloidales. Cuando no hay interacciones coloidales atractivas o repulsivas de largo alcance entre las partículas, la viscosidad de una emulsión es

independiente del tamaño de partícula, mientras que cuando hay un intervalo de repulsión entre el tamaño de partícula, la fracción volumen efectiva es mucho mayor que la fracción volumen real, por lo que se presenta un aumento en la viscosidad de la emulsión. Cuanto menor es el tamaño de partícula en una emulsión, mayor es su viscosidad y cuanto más amplia es la distribución, menor es la viscosidad.

Interacciones coloidales

La naturaleza de las interacciones coloidales entre las partículas en una emulsión es uno de los factores más importantes que determinan su comportamiento reológico, cuando las interacciones son de amplio alcance y repulsivas, la efectividad de la fracción volumen de la fase dispersa puede ser considerablemente mayor que su fracción volumen real, por lo tanto hay un aumento en la viscosidad de la emulsión. Cuando las interacciones entre las partículas son suficientemente atractivas, la efectividad de la fracción volumen de la fase dispersa se incrementa debido a la floculación de la partícula, cuyo resultado es el aumento de la viscosidad.

Las propiedades reológicas de una emulsión, por lo tanto, dependen de la magnitud relativa de atracción y de repulsión entre las interacciones de las partículas, por lo anterior, un experto en alimentos puede controlar las propiedades reológicas de los alimentos, por medio de la manipulación de interacciones coloidales entre las partículas.

Carga de la partícula

La carga de la partícula de una emulsión puede afectar sus propiedades reológicas de diferentes formas; la primera, es que la carga determina si las partículas se pueden agregar y la distancia con la que se acercan entre sí. El segundo factor es que la carga de las partículas influye en la reología debido al efecto viscoso.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Objetivos

General

Evaluar el efecto de la concentración de suero de leche y aceite vegetal en la reología y en la estabilidad de una emulsión láctea, a través de sus propiedades de flujo, tamaño de partícula, retrodispersión de luz, pH y densidad, proponiendo una base de emulsión láctea fortificada estable.

Particulares

1.- Determinar la densidad, pH, tamaño de partícula y comportamiento al flujo de los sistemas acuosos (goma xantana, azúcar-leche, azúcar-leche-goma xantana, azúcar-leche-CSL, azúcar-leche-goma xantana-CSL) y la emulsión sin goma xantana con técnicas estandarizadas para inferir su efecto en las propiedades de la emulsión láctea fortificada.

2.- Establecer el efecto de la concentración de suero de leche (5, 10 y 15%) y de aceite (5, 10 y 15%), manteniendo constante la concentración de leche descremada, azúcar y goma xantana, en la reología (propiedades de flujo) y en la estabilidad (tamaño de partícula, retrodispersión de luz) de emulsiones, proponiendo una base de emulsión láctea fortificada estable.

3.- Comparar las propiedades de la emulsión láctea fortificada con y sin vitaminas, mediante pruebas de tamaño de partícula, propiedades de flujo, retrodispersión de luz, densidad y pH, cuantificando el efecto de las mismas en la base de emulsión láctea.

2.2 Desarrollo experimental

2.2.1 Materiales

Se empleó concentrado de suero de leche (CSL) (Hegart de México 33-35% proteína), leche descremada en polvo (Toronto, Grupo Lamesa S.A. de C.V.), aceite vegetal (Oleíco, Coral Internacional S.A. de C.V., 100% cártamo), goma xantana (Keltrol, CP

Kelco) y agua purificada baja en sodio (PepsiCo Inc.) como disolvente de la fase acuosa.

Se agregaron vitaminas liposolubles A, C y D (Aderogyl, Neolonesa de Medicamentos S.A. de C.V.) y se endulzó con azúcar refinada comercial.

2.2.2 Métodos

2.2.2.1 Formulación de una emulsión láctea fortificada

Se realizó el estudio de los sistemas acuosos con la finalidad de analizar su influencia en la emulsión, entre los cuales se estudiaron, disoluciones de goma xantana, azúcar-leche, leche-goma xantana-azúcar; leche-CSL-azúcar, leche-CSL-azúcar- goma xantana. La formulación de los sistemas acuosos se presenta en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1 Formulaciones de los sistemas acuosos

Fase acuosa	Leche (%)	CSL (%)	Azúcar (%)	Goma xantana (%)	Aceite (%)
1	-	-	-	0.25	-
2	10	-	5	-	-
3	10	-	5	0.25	-
4	10	10	5	-	-
5	10	10	5	0.25	-

Para cumplir el objetivo de estudio, se prepararon diferentes formulaciones donde se determinó el efecto del aceite vegetal, concentrado de suero de leche y goma xantana. La variación de los porcentajes se estableció con base en formulaciones de productos comerciales y pruebas preliminares.

Se variaron cuatro niveles de concentrado de suero de leche (0, 5, 10 y 15%) manteniendo constante la concentración de leche descremada (10%), azúcar (5%), aceite vegetal (10%), goma xantana (0.25%), así como 3 niveles de concentración de aceite al (5, 10, y 15%), manteniendo constante la concentración de leche descremada (10%), suero de leche (10%), azúcar (5%), goma xantana (0.25%).

Se elaboraron emulsiones sin xantana con el fin de determinar el efecto del estabilizante y se adicionaron vitaminas para fortificar la emulsión láctea e inferir el efecto que tienen éstas en la emulsión láctea. Dichas formulaciones son presentadas en el Cuadro 2.2, en total fueron obtenidas 15 muestras diferentes.

Cuadro 2.2 Formulaciones de estudio.

Formulación de estudio	Leche (%)	CSL (%)	Azúcar (%)	Goma Xantana (%)	Aceite (%)
Emulsión (Variación de aceite)	10	10	5	0.25	5
	10	10	5	0.25	10
	10	10	5	0.25	15
Emulsión (Variación de CSL)	10	0	5	0.25	10
	10	5	5	0.25	10
	10	10	5	0.25	10
	10	15	5	0.25	10
Emulsión sin xantana	10	10	5	-	10
Emulsión con vitaminas	10	10	5	0.25	5
	10	15	5	0.25	10

2.2.2.2 Preparación de una emulsión láctea fortificada

Fase acuosa

Para la elaboración de las fases acuosas se pesaron cada uno de los componentes (Cuadro 2.1), fueron disueltos en agua baja en sodio, agregando el azúcar en primer término para asegurar su total dispersión, posteriormente se agregó leche descremada en polvo, y el suero de leche. La goma xantana fue incorporada por separado en el 50% del agua restante de la formulación, poco a poco para evitar la formación de grumos, manteniendo una velocidad de agitación constante durante 30 minutos en una parrilla de agitación marca Cimarec modelo 131125 (Malasia), a temperatura ambiente 25 °C.

Emulsión láctea

Una vez elaborada la fase acuosa se prosiguió a la preparación de la emulsión, donde se mezcló la fase acuosa con la fase oleosa (aceite) con un homogeneizador marca Silverson modelo L4R (Inglaterra), durante 5 minutos a velocidad de 8000 rpm. La emulsión estaba contenida en un baño de agua fría, para evitar que la emulsión rebasara los 25 °C. Cuando fue requerido, las vitaminas se agregaron a la fase oleosa.

2.2.2.3 Potencial de iones hidronio

Se determinó el pH de las fases acuosas y de las emulsiones, por medio de un instrumento marca Conductronic, modelo pH 120 (Malasia), como parámetro de control en la preparación de las bebidas lácteas.

De acuerdo a la NMX-F-317-S-1978, el valor del pH se emplea como unidad de medida para la acidez o alcalinidad de un producto líquido. En la determinación electrónica del pH, se utiliza la diferencia de un potencial eléctrico entre dos soluciones de diferente pH, separadas por una membrana de un vidrio especial, mediante un aparato medidor de pH.

La medición se realizó a temperatura ambiente (25°C), inmediatamente después de la elaboración de la emulsión, por cada prueba se realizaron tres mediciones de pH, calculando de los resultados obtenidos, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje.

2.2.2.4 Densidad relativa

Se determinó en un densímetro digital marca Anton Paar modelo DMA 38 (Austria), como parámetro de control en fases acuosas y emulsiones. El principio básico de medida es un tubo en forma de U excitado electromagnéticamente mediante una oscilación armónica. El periodo de oscilación depende de la densidad de la muestra en el interior del tubo. Por lo que, la medida del periodo de oscilación, la densidad y

todos los valores relativos a la densidad son calculados automáticamente (Delgado-Reyes, 2012).

La prueba se realizó a una temperatura de 20 °C, y el equipo se verificó con la densidad del aire para asegurar la limpieza del capilar, el instrumento cuenta con dos jeringas, una para la muestra y otra para la limpieza del equipo, se llenó la jeringa de la muestra y se introdujo al tubo de vidrio del aparato. La lectura de densidad se tomó a las tres muestras, de los resultados obtenidos se calculó promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje.

2.2.2.5 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula de la base de emulsión láctea se determinó por medio del analizador de partículas Cilas modelo 930 (Francia). La operación del analizador de tamaño de partículas se basa en el principio de la difracción de la luz de un rayo láser sobre las partículas, el software, por medio de cálculos logarítmicos determina el tamaño de la partícula (Beristain F, 2012).

Se realizó la prueba a temperatura ambiente (25 °C), se tomaron muestras pequeñas con una pipeta. La muestra fue diluida en el instrumento, éste cuenta con un alimentador vía líquida donde es mezclado. De la prueba se obtuvieron curvas de distribución de tamaño de partícula en porcentaje de volumen en función del diámetro, con y sin aplicación de ultrasonido. Se obtuvieron los diámetros de partícula de los cuales se calculó promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje.

2.2.2.6 Propiedades de flujo bajo cizalla rotacional

La caracterización reológica se realizó en un Reómetro marca Physica Anton Paar modelo MCR 301 (Austria) con un dispositivo de cono y placa (CP 75-1). El principio de este instrumento está relacionado con la cantidad de movimiento transferida desde el cono que rota hacia la placa en la que está contenida la muestra. Se mide el par de

torsión o torque del motor requerido para mover el cono y se transforma a esfuerzo de cizalla con la constante de proporcionalidad respectiva, que también depende de las dimensiones del cono o placa que rota utilizados. La viscosidad, que es una medida de la resistencia a transferir cantidad de movimiento, se calcula a través del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla. El instrumento permite controlar también, el esfuerzo de cizalla y medir la velocidad de cizalla respectiva, procedimiento que se recomienda utilizar en el caso de que el material fluido requiera un esfuerzo de cedencia para comenzar a fluir (Martínez-Padilla, 2012).

En las muestras más fluidas, se utilizó un programa de una etapa de ascenso-descenso de la velocidad de cizalla (100 a 200 s^{-1}) tomando 30 puntos distribuidos logarítmicamente, de 10 segundos cada uno.

En las muestras con apariencia más viscosa, se aplicó un programa de dos etapas, con el mismo dispositivo la primera consistió en dos segmentos, tomando 25 puntos distribuidos logarítmicamente, de 10 segundos cada uno, controlando el esfuerzo de cizalla de 0.1 a 10 Pa , y luego una disminución del mismo de 10 a 0.1 Pa . De este modo, se determinó si el fluido tenía un esfuerzo inicial o presentaba una viscosidad constante antes de ser fluidificante. La segunda etapa fue controlando la velocidad de cizalla de 1 - 300 s^{-1} , tomando 30 puntos distribuidos logarítmicamente, de 10 segundos cada uno, ascenso-descenso, sobre la misma muestra, del cual se obtuvo el modelo reológico que define el comportamiento al flujo, graficando el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla y aplicaron los modelos de ajuste.

Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), manteniendo una atmósfera húmeda para evitar que la muestra se secase utilizando un algodón con agua en la parte externa de la placa. Se calculó de las repeticiones el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (%) de los parámetros reológicos del modelo matemático que mejor se ajustó a los datos experimentales.

2.2.2.7 Estabilidad

La estabilidad de la emulsión láctea se determinó por transmisión de luz a través de la muestra en función del tiempo de almacenamiento, con el instrumento Turbiscan Formulation modelo MA2000 (Francia), con el fin de delimitar la zona que presentó inestabilidad y definir el tipo de proceso (cremado, coalescencia, clarificado o floculación). Se realizó a temperatura ambiente (25°C).

El instrumento es un analizador de barrido vertical que permite cuantificar la estabilidad e inestabilidad de sistemas dispersos y de emulsiones concentradas. Consiste en un cabezal de lectura que se mueve a lo largo de una celda de vidrio de fondo plano, que toma lecturas de luz transmitida o retrodispersa cada 40 μm a una longitud de 80 mm del tubo que contiene la muestra. El barrido se puede repetir con una frecuencia programable. El cabezal de la lectura usa una fuente de luz pulsada de infrarrojo cercano y un detector de transmisión recoge la luz transmitida a través de la disolución en el tubo de la muestra a 0°, en tanto que un detector de retrodispersión recibe la luz retrodispersada sobre la muestra a 135° (González-Sánchez, 2012).

Las diferentes formulaciones de las bebidas lácteas fueron colocadas aproximadamente a la misma altura (60mm) en diferentes celdas de vidrio, las cuales son selladas con tapas, los tubos son insertados en el equipo, donde se hace la medición de la prueba y el software del mismo registra los cambios de luz transmitida o retrodispersada de la muestra. Esta prueba se realizó por triplicado cada 24 horas, después de la preparación durante 3625 horas.

En modo referencia a tiempo cero se tomaron los valores medios de retrodispersión de luz (%) y se graficaron en función del tiempo. Se ajustó a una línea cuya pendiente corresponde a velocidad de disminución de retrodispersión de luz, que indirectamente representa el aumento de tamaño de partícula o flóculos a lo largo del tubo. Se calculó el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Potencial de iones hidronio en sistemas acuosos y emulsiones

Para las fases acuosas y las emulsiones lácteas se determinó el valor de pH, cuyos resultados se muestran resumidos en los Cuadros 3.1 y 3.2.

Cuadro 3.1 pH promedio de las diferentes fases acuosas estudiadas.

	Muestra	pH	σ	C.V. (%)
Fase acuosa	Azúcar 5%, leche 10%	6.75	0.02	0.3
	Xantana 0.25%	6.39	0.19	3.0
	Azúcar 5%, leche 10%, xantana 0.25%	6.71	0.03	0.45
	Azúcar 5%, leche 10%, CSL 10%, xantana 0.25%	6.70	0.01	0.15

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

Cuadro 3.2 pH promedio de las diferentes emulsiones estudiadas.

Emulsión				
Emulsión (variación de aceite)		pH	σ	C.V. (%)
5 %	Azúcar 5%, leche 10%, CSL 10%, xantana 0.25%	6.62	0.05	0.8
10 %		6.19	0.06	1.0
15 %		6.70	0.01	0.1
Emulsión (variación de CSL)				
5 %	Azúcar 5%, leche 10%, aceite 10% xantana 0.25%	6.60	0.03	0.4
10 %		6.68	0.03	0.4
15 %		6.62	0.03	0.5
Emulsión sin xantana				
Azúcar 5%, leche 10%, CSL 10%, aceite 10%		6.51	0.01	0.1
Emulsión sin CSL				
Azúcar 5%, leche 10%, aceite 10% xantana 0.25%		6.77	0.02	0.3
Emulsión con vitaminas				
Azúcar 5%, leche 10%, CSL 10%, xantana 0.25%, aceite 5%		6.12	0.01	0.2
Azúcar 5%, leche 10%, aceite 10%, xantana 0.25%, CSL 15%		6.25	0.02	0.3

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

Las fases acuosas presentaron valores de pH entre 6.39 y 6.75, de igual manera el pH de las emulsiones presenta tendencia hacia la neutralidad, desde 6.12 hasta 6.77. Estos valores están dentro del pH ideal para productos de bebidas lácteas no ácidas, datos similares fueron reportados por Auris (2010) en estudios realizados en una base de emulsión láctea fortificada con harina de “arracacha” y ácido fólico, donde se reportan valores de pH promedio de 6.7.

3.2 Densidad relativa en sistemas acuosos y emulsiones

Los valores de densidad relativa se requirieron como parámetro de control en la elaboración de las fases acuosas y de la emulsión láctea fortificada, dichos valores se muestran en los Cuadros 3.3 y 3.4.

Todas las muestras analizadas presentaron un valor de densidad relativa por encima de la unidad, ya que el componente mayoritario de las mismas es el agua. La densidad relativa de las fases acuosas osciló entre 1.00 y 1.08, la cual está relacionada directamente con la concentración de sólidos, a mayor concentración de sólidos mayor densidad. La densidad relativa de las emulsiones varió desde 1.03 a 1.11.

Cuadro 3.3 Densidad relativa promedio de las diferentes muestras estudiadas

	Muestra	Densidad relativa	σ	C.V. (%)
Fase acuosa	Azúcar 5%, leche 10%	1.06	0.0001	0.01
	Xantana 0.25%	1.00	0.0001	0.01
	Azúcar 5%, leche 10%, xantana 0.25%	1.03	0.0004	0.04
	Azúcar 5%, leche 10%, CSL 10%, xantana 0.25%	1.08	0.0013	0.12

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

En cuanto a la variación de aceite a diferentes concentraciones, se observó que conforme aumenta el contenido de aceite, la densidad de la emulsión láctea disminuye, ya que la densidad el aceite es menor a la del agua. Asimismo, al aumentar el concentrado de suero de leche la densidad aumenta.

Cuadro 3.4 Densidad relativa promedio de las diferentes muestras estudiadas.

Emulsión (variación de aceite)		Densidad relativa	σ	C.V. (%)
5 %	Azúcar 5%, leche 10%, CSL 10%, xantana 0.25%	1.10	0.0003	0.03
10 %		1.09	0.0008	0.08
15 %		1.07	0.0014	0.13
Emulsión (variación CSL %)				
5 %	Azúcar 5%, leche 10%, aceite 10%, xantana 0.25%	1.07	0.0001	0.01
10 %		1.09	0.0010	0.01
15 %		1.10	0.0008	0.07
Emulsión sin xantana	Azúcar 5%, leche 10%, CSL 10%, aceite 10%	1.11	0.0008	0.07
Emulsión sin CSL	Azúcar 5%, leche 10%, aceite 10% , xantana 0.25%	1.05	0.0001	0.01
Emulsión con vitaminas	Azúcar 5%, leche 10%, CSL 10%, xantana 0.25%, aceite 5%	1.03	0.0046	0.45
	Azúcar 5%, leche 10%, aceite 10%, xantana 0.25%, CSL 15%	1.09	0.0009	0.08

Concentrado de suero de leche (CSL) desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

3.3 Distribución y tamaño de partícula en sistemas acuosos y emulsiones

Fase acuosa

La Figura 3.1 muestra la distribución de tamaño de partícula en la fase acuosa (azúcar 5%-leche 10%- CSL 10%- goma xantana 0.25%) con y sin ultrasonido, las partículas que se encuentran presentes y dispersas, que proporcionan el diámetro de partícula de la muestra, son las proteínas lácteas y las de la goma xantana.

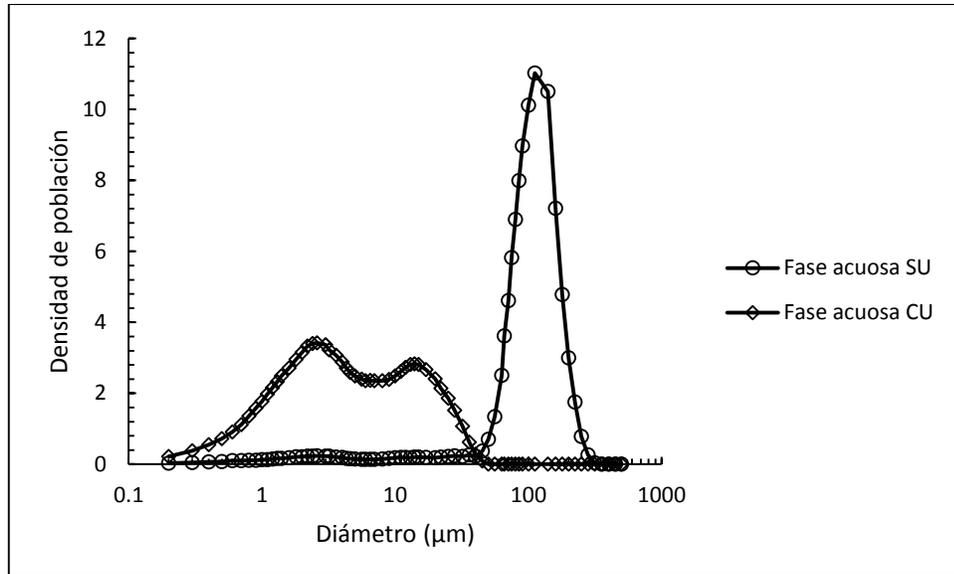


Figura 3.1 Distribución de tamaño de partícula, fase acuosa con ultrasonido (CU) y sin ultrasonido (SU).

Sin ultrasonido, la fase acuosa presentó una curva monomodal, con un diámetro de partícula por encima de 100 µm. Al aplicar ultrasonido se observó una curva bimodal con partículas de menor tamaño que confirma la presencia de agregados, obteniéndose una distribución de población polidispersa, distinguiéndose dos modas. El ultrasonido aplicado provocó una disgregación de las partículas, datos que se corroboran en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 Diámetro de la fase acuosa con y sin ultrasonido

Fase acuosa			
Sin ultrasonido		Con ultrasonido	
	Moda I (µm)	Moda I (µm)	Moda II (µm)
	137	3.6	13.7
σ	24.1	0.91	0.58
C.V. (%)	18	25	4.2

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

Emulsión sin xantana

En la Figura 3.2 se muestra la distribución obtenida sin ultrasonido y con ultrasonido de tipo multimodal y bimodal respectivamente. Se puede observar que para la emulsión sin ultrasonido, el tamaño de la moda de la población más grande fue de 140 μm , y el de la más pequeña de 3.3 μm . Al aplicar ultrasonido, se observó también la disminución del diámetro, donde las partículas grandes fueron de 12 μm y las pequeñas de 3.4 μm y 0.3 μm (Cuadro 3.6), estas últimas en muy pequeña proporción. La disminución observada después de aplicar el ultrasonido implica disgregación de floculos.

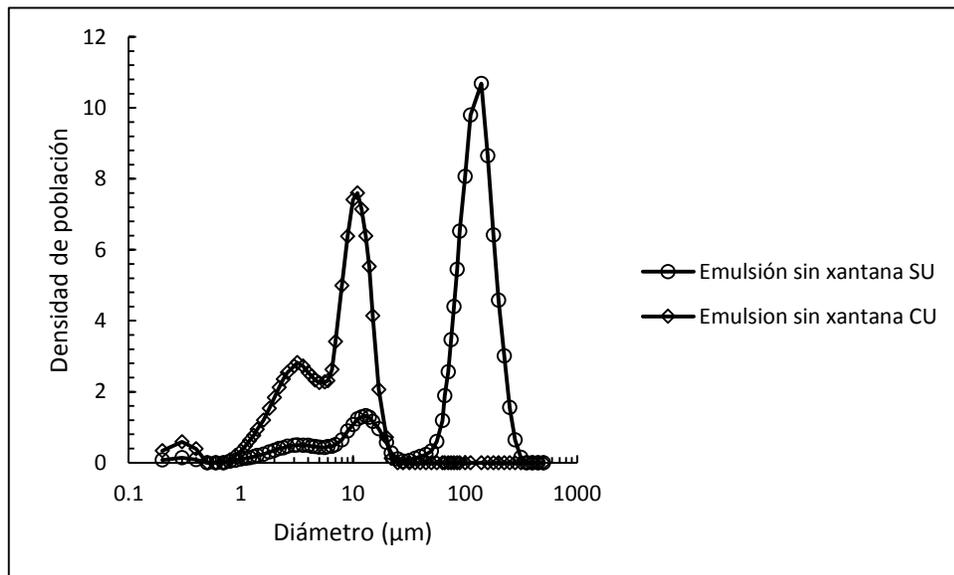


Figura 3.2 Distribución de tamaño de partícula, emulsión sin xantana, con ultrasonido (CU) y sin ultrasonido (SU).

Emulsión sin concentrado de suero de leche

En la Figura 3.3 se muestra la densidad de población en función del diámetro de partícula de la emulsión sin concentrado de suero de leche, con y sin ultrasonido. Se obtuvo una curva de tipo multimodal en la muestra sin ultrasonido (6.5 μm , moda I; 153.3 μm , moda II; 0.5 μm , moda III), al aplicarle ultrasonido a dicha muestra, la

distribución de la población II desaparece, presentando una sola población cuya moda fue de 7.8 μm (Cuadro 3.6). Es importante mencionar que se observa una pequeña población de partículas de 0.5 μm , que pudiera representar entidades de proteína provenientes de la leche descremada, que se encuentran en exceso en la emulsión. Por otra parte, la emulsión sin CSL presenta agregados de partículas (153 μm), característico de emulsiones floculadas.

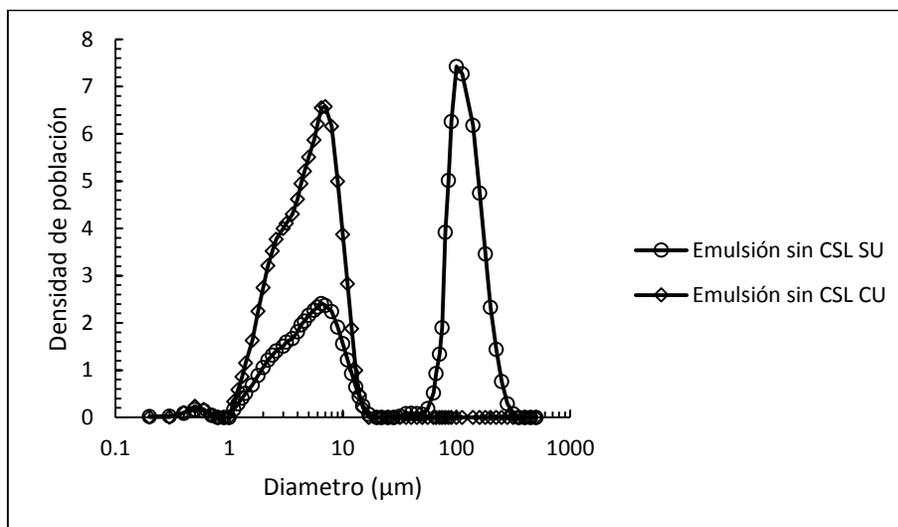


Figura 3.3 Distribución de tamaño partícula, emulsión sin concentrado de suero de leche con ultrasonido (CU) y sin ultrasonido (SU).

Cuadro 3.6 Diámetro de partícula en la emulsión sin xantana y sin CSL.

Sin ultrasonido			Con ultrasonido		
Emulsión sin xantana					
	Moda I (μm)	Moda II (μm)	Moda III (μm)	Moda I (μm)	Moda II (μm)
X	3.3	13	140	3.5	12
σ	0.23	0	0	0.23	0
C.V. (%)	6.7	0	0	6.6	0
Emulsión sin CSL					
X	6.5	153		7.8	
σ	0	11.55		0.29	
C.V. (%)	0	7.5		3.7	

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

Emulsiones con variación de concentrado de suero de leche

Los resultados de la variación de concentrado de suero de leche sin ultrasonido se muestran en la Figura 3.4, para las concentraciones de 5 y 10%, las curvas son de tipo bimodal, el diámetro de la moda II se encuentra entre 127 y 140 μm , y para la población I de 4.7 y 3.5 μm (Cuadro 3.7). Mientras que para la concentración del 15% de concentrado de suero de leche, se presenta una curva de tipo monomodal con un diámetro de partícula de 2 μm .

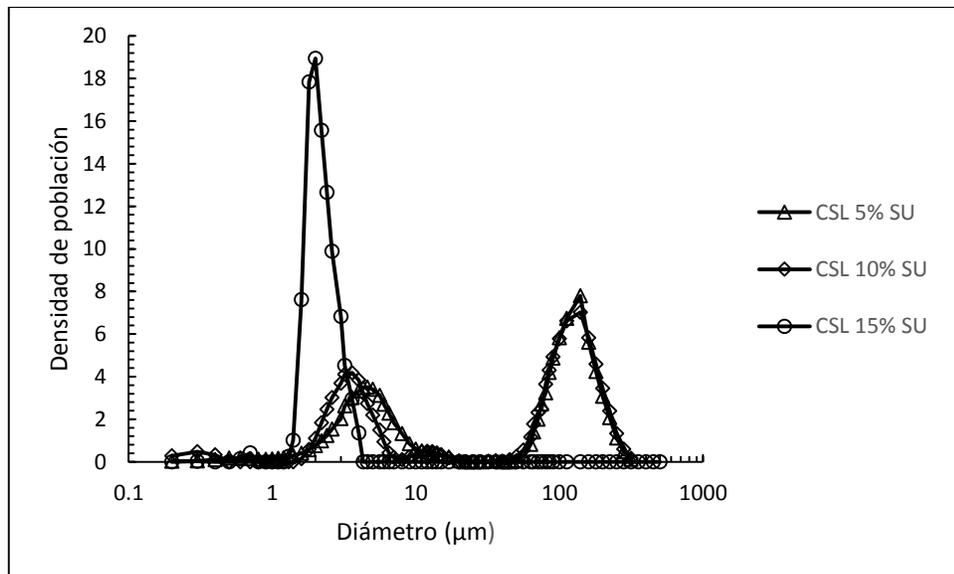


Figura 3.4 Distribución de tamaño de partícula, efecto de la variación de concentrado de suero de leche, sin ultrasonido (SU).

Al aplicarle ultrasonido a las emulsiones se obtiene una distribución monomodal (Figura 3.5), para las concentraciones del 5 y 15 %, mientras que para las del 10% se observa una curva bimodal, los diámetros se encuentran por debajo de 4.6 μm , y se observan partículas de 1.8 μm al 15 % de concentrado de suero de leche. En general, cuando se incrementó el contenido de concentrado de suero de leche, el diámetro disminuyó. En las emulsiones sin concentrado de suero de leche, se observó también una población de partículas muy pequeñas (0.3 μm).

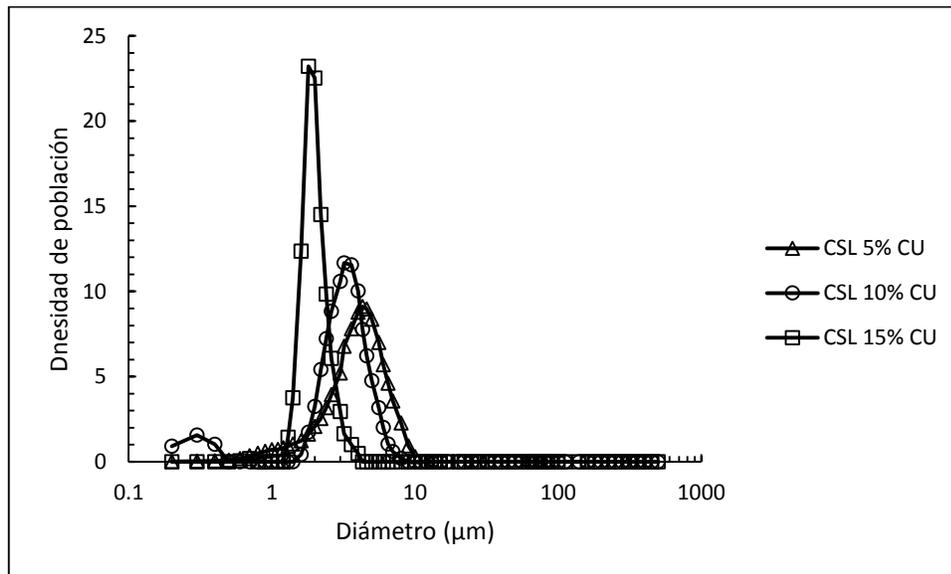


Figura 3.5 Diámetro de tamaño partícula variación de concentrado de suero de leche con ultrasonido (CU).

Variación de aceite

En la Figura 3.6 se presenta una curva de distribución de tamaño de partícula de tipo multimodal (sin ultrasonido) obtenida en las emulsiones donde se varió el aceite. Se observa que para las tres concentraciones de aceite, las curvas se superponen presentando coeficientes de variación nulos en la emulsión al 5% de aceite. En cuanto a los valores de las modas, se observan partículas pequeñas de 3.6 μm en las tres concentraciones de aceite, mientras que los agregados varían de 131 a 140 μm . Al aplicar ultrasonido, las emulsiones al variar la concentración de aceite presentaron modas entre 3.6 y 3.2 μm , con tendencia a disminuir al incrementarse la concentración de aceite.

La moda de la población I puede atribuirse al tamaño de los glóbulos de aceite (3.6 μm) en los tres porcentajes de aceite estudiados, considerando que una emulsión puede presentar diámetros de glóbulo de 0.1 a 100 μm (McClements, 1999). Mientras que la población II se puede atribuir a agregados de proteína o flóculos de aceite cuyo

valor varía de 131 a 140 μm . En el caso de agregados de proteína se ha reportado recientemente la formación de agregados por encima de 100 μm al 50 % de fracción acumulada, en dispersiones acuosas de concentrado de suero de leche sin la aplicación de ultrasonido (Jambrack y col., 2014).

Al aplicar ultrasonido se presenta una curva monomodal de diámetro entre 3.6 y 3.2 μm , muy cercanas a las de la población I sin ultrasonido. Generalmente el tamaño de partícula correspondientes a los lípidos de la leche oscilan entre 2 y 6 μm , que en conjunto con los otros componentes forman agregados. Es por esa razón que sin ultrasonido se puede presentar una curva bimodal y con ultrasonido se puede observar un comportamiento monomodal, ya que los flóculos de los lípidos han sido disgregados. No se encontraron reportados valores de distribución de tamaño de partícula en los que se haya aplicado ultrasonido similar para poder realizar una comparación.

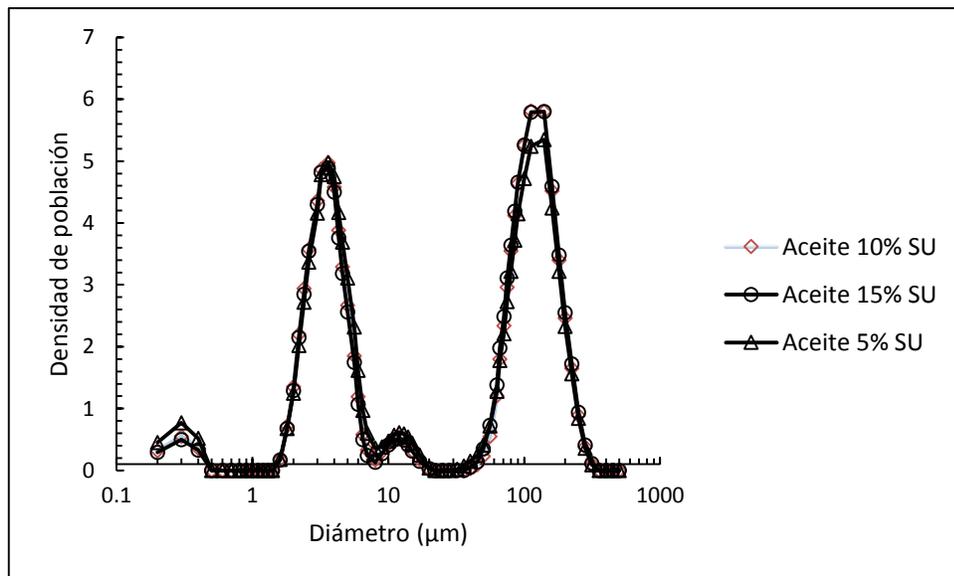


Figura 3.6 Distribución de diámetro de partícula, variación de aceite sin ultrasonido (SU).

Se presentan los valores del diámetro de partícula de la emulsión con vitaminas (Cuadro 3.7), al igual que en las figuras anteriores tiene el mismo comportamiento, sin ultrasonido presenta una curva bimodal y con ultrasonido se obtuvo un

comportamiento monomodal, por esta razón la curva no es presentada, se obtiene un diámetro de 2.6 μm al aplicarle ultrasonido, valor que se encuentra dentro de los valores referenciados. Las vitaminas se adicionaron en fase lipídica, aumentando la concentración de la misma, disminuyendo el diámetro de partícula.

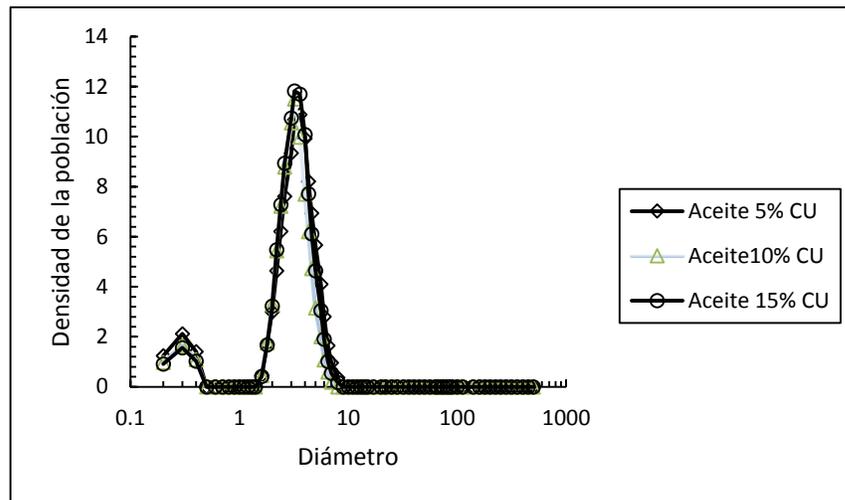


Figura 3.7 Distribución de diámetro de partícula, variación de aceite con ultrasonido (CU).

El sistema emulsión sin xantana (Figura 3.2) fue comparado con la emulsión de CSL al 10% (Figura 3.5), ya que presenta los mismos componentes de la emulsión a las mismas concentraciones (Cuadros 3.6 y 3.7). La emulsión sin xantana presenta una curva polidispersa (3.3 μm , 13 μm y 140 μm) sin ultrasonido, mientras que la emulsión con xantana presenta sólo las poblaciones de partículas más pequeñas y más grandes (3.6 μm , 131 μm). Es importante mencionar que las partículas de tamaño intermedio (13 μm) sólo se presentaron en las emulsiones sin xantana. Al aplicar ultrasonido, las partículas intermedias se conservan, lo que confirma su presencia. Considerando que las partículas de tamaño intermedio también fueron detectadas en la fase acuosa conteniendo xantana, éstas pueden atribuirse a agregados de proteína, que en la emulsión completa conteniendo xantana ya no se encuentran.

Cuadro 3.7 Efecto del diámetro de partícula en emulsiones lácteas, variación de concentrado de suero de leche, aceite y la adición de vitaminas.

	Sin ultrasonido		Con ultrasonido
	Moda I (μm)	Moda II (μm)	Moda I (μm)
variación de CSL			
5 %	4.7	140	4.6
σ	0.23	0	0
C.V.	4.9	0	0
10%	3.5	127	3.1
σ .	0.23	23.1	0.1
C.V.	6.6	18.2	30
15%	2		1.8
σ	0		0
C.V.	0		0
variación de aceite			
5%	3.6	140	3.6
σ	0	0	0
C.V.	0	0	0
10%	3.6	131	3.3
σ	0	16.2	0.2
C.V.	0	12.4	6.1
15%	3.6	140	3.2
σ	0	0	0
C.V.	0	0	0
Emulsión con vitaminas			
x	2.7	140	2.6
σ	0.23	-	-
C.V.	8.5	-	-

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

3.4 Propiedades de flujo bajo cizalla rotacional en sistemas acuosos y emulsiones

Materiales con comportamiento newtoniano

En la Figura 3.8 se presenta el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de leche - azúcar, leche – azúcar – CSL y la emulsión sin xantana, se observó una relación lineal entre esas variables reológicas, característica de un fluido con comportamiento newtoniano (Rao, 1999). En el Cuadro 3.8 se muestra el valor de la viscosidad de cada muestra, siendo la viscosidad de la leche-azúcar la más baja de

0.002 Pa.s ($r^2:0.9913$), muy cercana a la viscosidad del agua, y la emulsión sin xantana de 0.010 Pa.s ($r^2:0.9996$) la de mayor viscosidad, debido a que presenta un número mayor de componentes, por lo tanto presentan mayor resistencia a fluir.

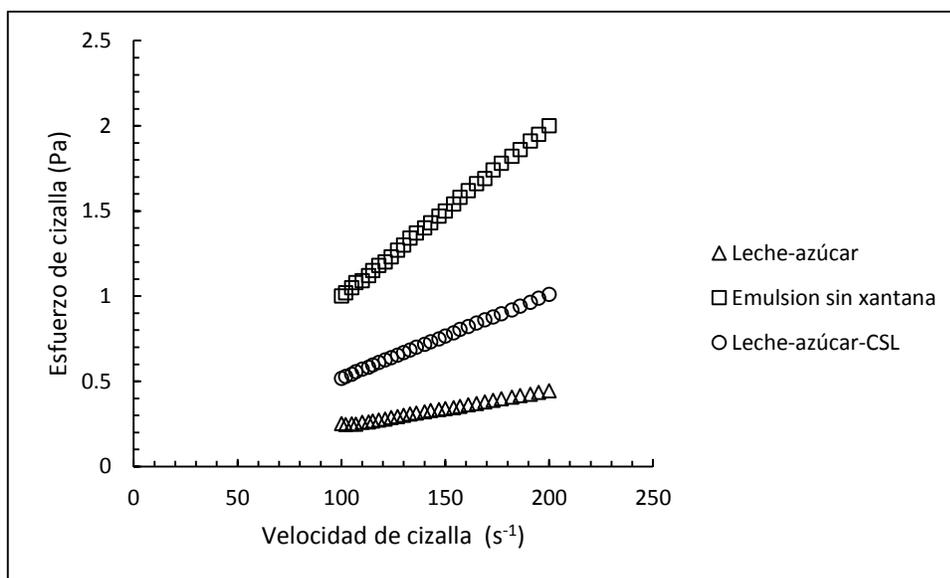


Figura 3.8 Curva de flujo de la fase de leche 10%-azúcar 5%, emulsión sin xantana y leche-azúcar-CSL.

Cuadro 3.8 Viscosidad de la fase leche-azúcar y emulsión sin xantana.

	Muestra	η (Pa.s)
Fase acuosa	Leche 10%, azúcar 5%	0.002
	σ	0.0002
	C.V. (%)	10
	Leche 10%, azúcar 5%, CSL 10%	0.005
	σ	0
	C.V. (%)	0
Emulsión sin xantana	Leche 10%, Azúcar 5%, CSL 10%, aceite 10%	0.010
	σ	0.001
	C.V. (%)	10

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

Materiales con comportamiento no newtoniano

Las muestras que presentaron un comportamiento no newtoniano fueron aquellas a las que se les adicionó goma xantana, estas muestras fueron cizalladas en dos etapas: la primera controlando el esfuerzo de cizalla de 0.1-10 Pa y de 10-0.1 Pa, la segunda etapa controlando la velocidad de cizalla de 1 a 300 s⁻¹ y de 300-1 s⁻¹. En la Figura 3.9 se presenta la viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la muestra de xantana sola en ambas etapas, se puede observar que para el primer segmento de ascenso donde se controló el esfuerzo de cizalla, el material presentó resistencia a fluir a velocidades de cizalla bajas (1 s⁻¹) típico de un comportamiento de Carreau-Yasuda. Después el material presentó una disminución de la viscosidad al incrementar la velocidad de cizalla, para los siguientes segmentos, por lo que la curva exhibió el comportamiento típico de un material adelgazante. Para el análisis de flujo de las muestras se tomó en cuenta sólo el primer segmento de ascenso que es el que presenta el comportamiento antes mencionado.

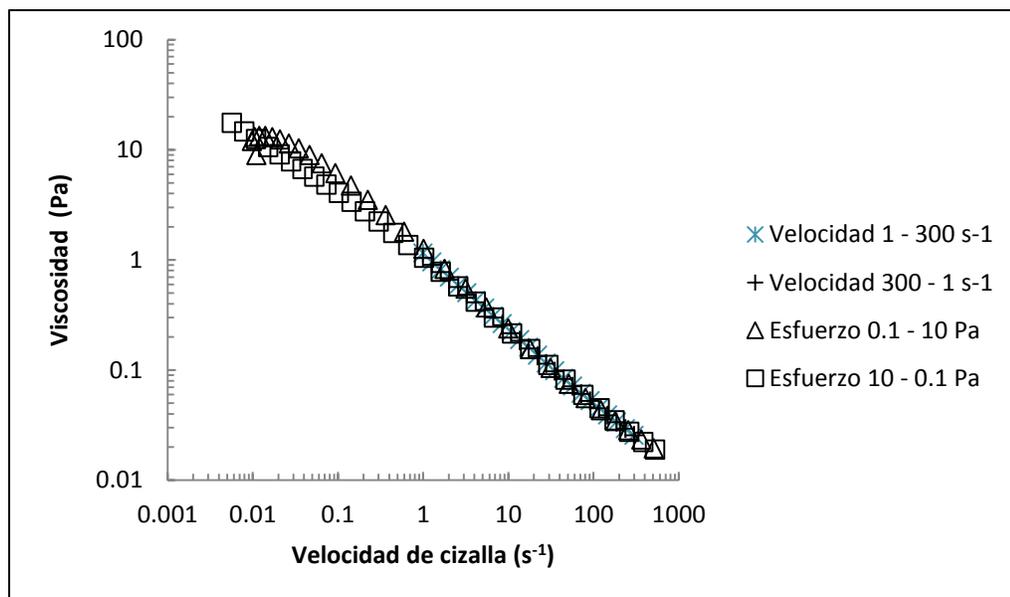


Figura 3.9 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla, de la muestra de xantana 0.25%.

En la Figura 3.10 se observa que para los sistemas acuosos xantana sola y leche - azúcar - xantana, la viscosidad a bajas velocidades de cizalla del polisacárido solo, es

mayor que para la mezcla. En estos dos sistemas el desarrollo de la viscosidad fue debido a la presencia del polisacárido, ya que éste aumentó la viscosidad de la fase acuosa por la interacción intermolecular entre las cadenas de la goma xantana tal y como lo reportan Sun y col. (2007) en sistemas acuosos que contienen proteína de suero de leche y goma xantana.

La viscosidad permanece constante a velocidades de cizalla bajas, en un intervalo de (0.01 a 0.1 s⁻¹) y al incrementar la velocidad de cizalla, la viscosidad disminuye comportándose como un fluido de la potencia. Los datos experimentales se ajustaron al modelo de Carreau-Yasuda tendencias similares reporta Garcia y col. (2004), en emulsiones con xantana.

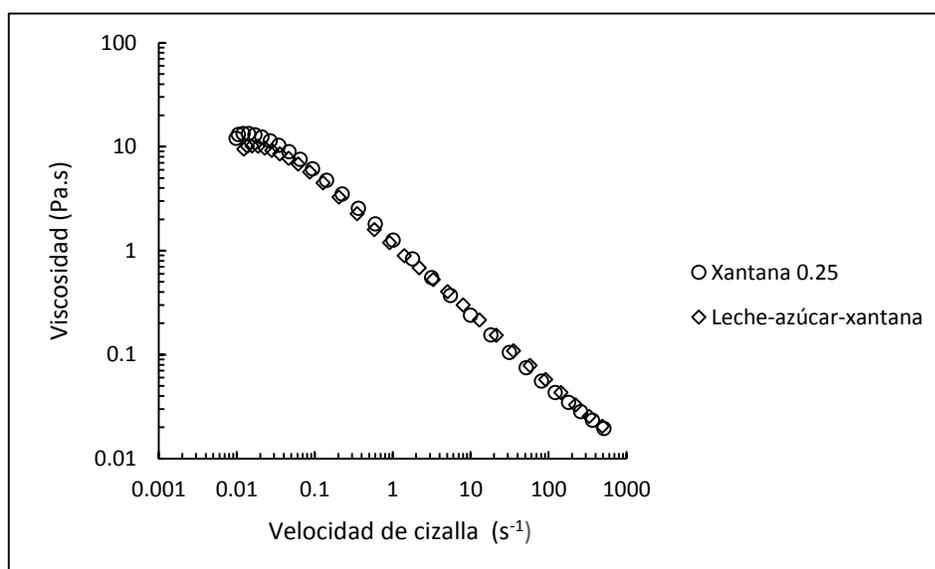


Figura 3.10 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla, comportamiento ajustado al modelo de Carreau-Yasuda.

En el Cuadro 3.9 se resumen los parámetros obtenidos del modelo de Carreau-Yasuda, donde η_0 de la goma xantana al 0.25% presentó el mayor valor, lo que implica una mayor resistencia a fluir al compararlo con el sistema que contiene leche-azúcar y xantana.

En cuanto al tiempo característico, T_c (determinado como el inverso de la velocidad de cizalla cuando el fluido comienza a ser fluidificante), en la disolución de la goma xantana sola (28.3 s) fue menor que el sistema que contiene leche, azúcar y xantana a la misma concentración, eso implica que la disolución de xantana comienza a ser fluidificante a una velocidad de cizalla mayor que el que contiene leche-azúcar y xantana.

El carácter fluidificante también se observa en el valor del índice de comportamiento al flujo n . Este fue menor en las muestras con xantana sola corroborándose el carácter más fluidificante del sistema.

Cuadro 3.9 Parámetros reológicos del modelo de Carreau-Yasuda en el primer segmento de ascenso.

Muestra	η_0 (Pa.s)	T_c (s)	n
Xantana 0.25%	13.4	28.3	0.28
σ	0.54	1.70	0.0023
C.V. (%)	4.0	6	0.82
Leche- azúcar-xantana	11.9	30.9	0.32
σ	1.42	1.86	0.022
C.V. (%)	12	6.0	6.9

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

Variación de aceite

La variación de aceite en las propiedades de flujo de la emulsión láctea se presenta en la Figura 3.11, donde la viscosidad se encuentra en función de la velocidad de cizalla.

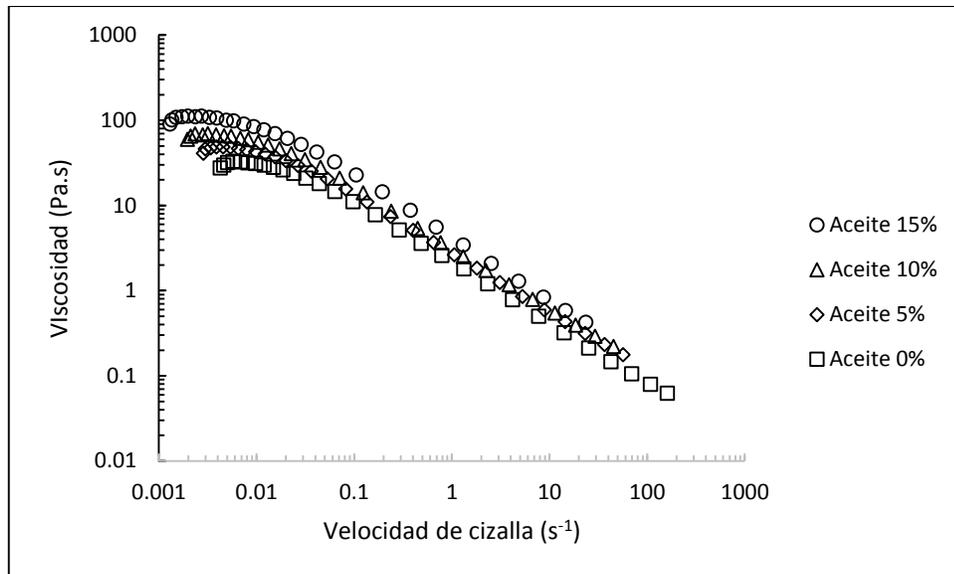


Figura 3.11 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla variación de aceite.

Se observa un comportamiento fluidificante, al igual que en las fases acuosas que tienen xantana, existe una zona de viscosidad constante a velocidades de cizalla bajas y aumenta con el contenido de aceite, debido a que las moléculas lipídicas tienen la capacidad de formar agregados e interactuar con otros componentes (Riera y col., 2014). El comportamiento presentado en la Figura 3.11 también es definido por modelo de Carreau-Yasuda.

En el Cuadro 3.10 se presenta el promedio de los parámetros reológicos de dicho modelo, se observa que el valor del índice de comportamiento al flujo se encuentra en un intervalo de 0.27 a 0.31. La viscosidad cero aumenta conforme se aumenta la concentración de aceite vegetal, a mayor cantidad de aceite y menor cantidad de agua provoca que las partículas se encuentren menos separadas mostrando como resultado un aumento en su viscosidad (Dolz y col., 2007). En relación al tiempo característico, la muestra que comienza a ser fluidificante a una velocidad de cizalla menor fue la que no contenía aceite (fase acuosa).

Cuadro 3.10 Parámetros reológicos del modelo de Carreau-Yasuda, variación de aceite vegetal.

Aceite	η_0 (Pa*s)	T_c (s)	n
0%	31.8	45.7	0.29
σ	1.5	2.51	0.0011
C.V.	4.7	5.5	0.4
5%	46.3	62.4	0.31
σ	2.5	4.18	0.0006
C.V.	5.4	6.7	0.2
10%	66.1	70.9	0.29
σ	1.99	7.52	0.001
C.V.	3.0	10.6	0.5
15%	103.9	84.8	0.27
σ	5.50	6.87	0.005
C.V.	5.3	8.1	1.7

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

Variación de concentrado de suero de leche

El efecto de la variación del concentrado de suero de leche en las emulsiones se presenta en la Figura 3.12. Se observó que para las diferentes concentraciones de suero de leche, la viscosidad en función de la velocidad de cizalla aumentó y se ajustó también al modelo antes mencionado.

En la misma figura, no se observa mucha diferencia entre las curvas a concentraciones de 0% y 5%, así como entre 10% y 15%, aunque los parámetros reológicos que definen esas curvas si son diferentes (Cuadro 3.11).

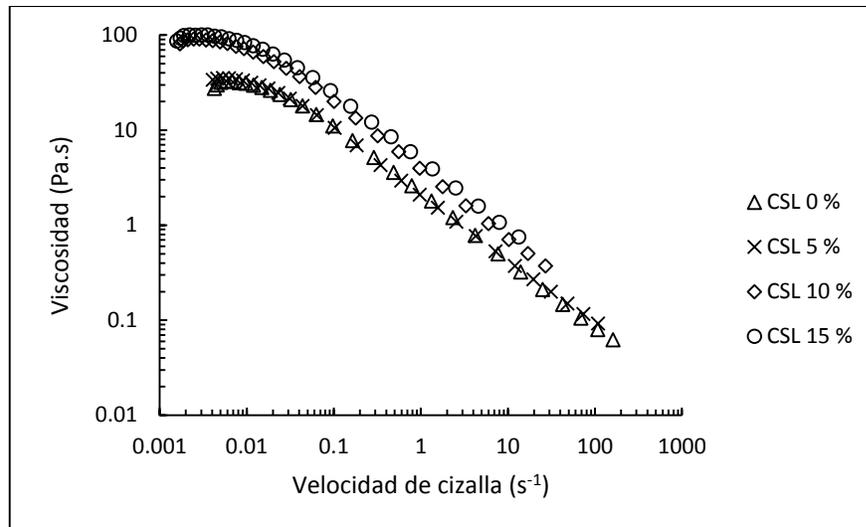


Figura 3.12 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla

En el Cuadro 3.11 se muestran los parámetros reológicos obtenidos en la emulsión láctea (10% aceite) variando el concentrado de suero de leche, donde el valor más elevado de la η_0 fue a la concentración de (15%), debido a que es el que tiene mayor cantidad de componentes. Considerando que la proteína tiene la habilidad de rodear las partículas de aceite, y éstas se pueden agregar, todo ello hace que la emulsión se vuelva más viscosa por el aumento de sólidos y la falta de movilidad de las partículas agregadas de aceite en la emulsión, aumentando su consistencia (Vega, 2006).

Así mismo, el tiempo característico de la emulsión conteniendo 15% CSL, presentó el valor más elevado (76.5 s), lo que indica que la emulsión comienza a ser fluidificante a velocidades de cizalla menores. El valor del índice de comportamiento al flujo n , se mantuvo en un intervalo de 0.28 a 0.31 corroborándose el carácter altamente fluidificante de la emulsión láctea, debido al rompimiento de partículas de aceite agregadas.

Cuadro 3.11 Parámetros reológicos del modelo de Carreau- Yasuda, variación de CSL.

CSL	η_0 (Pa*s)	T_c (s)	n
0%	26.95	53.1	0.31
σ	1.01	3.56	0.0012
C.V. (%)	3.7	6.7	0.4
5%	34.62	58.5	0.31
σ	2.02	4.68	0.0012
C.V. (%)	5.8	8.0	0.4
10%	80.86	73.9	0.28
σ	7.28	9.24	0.0036
C.V. (%)	9.0	12.5	1.3
15%	100.68	76.5	0.30
σ	1.61	2.45	0.0036
C.V. (%)	1.6	3.2	1.2

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

3.5 Estabilidad de la emulsión láctea

En la Figura 3.13 se presenta la gráfica representativa de la retrodispersión de luz (%) registrada en las emulsiones de estudio a lo largo de la longitud del tubo, donde estaba contenida la muestra en función del tiempo de almacenamiento (refrigeración). Es importante mencionar que las emulsiones no mostraron ningún cambio en el porcentaje de retrodispersión de luz (%) en 1560 horas, lo que representa alta estabilidad.

Después de transcurrido ese tiempo, se puede observar una ligera disminución del porcentaje de la retrodispersión de luz a lo largo del tubo, que puede asociarse con el aumento de tamaño de agregados o aumento de tamaño de partícula en función de tiempo de almacenamiento.

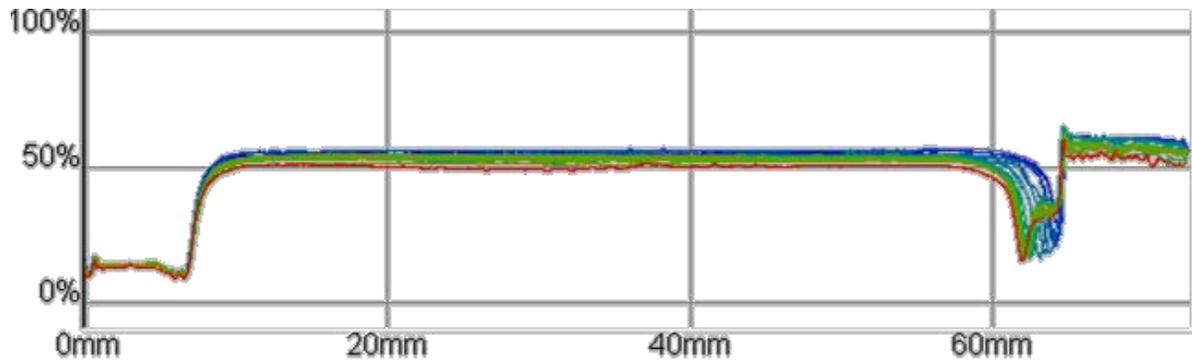


Figura 3.13 Retrodispersión de luz en función del tiempo de almacenamiento en refrigeración, en una emulsión láctea fortificada (10% aceite vegetal).

Los datos de retrodispersión de luz en función del tiempo de almacenamiento en refrigeración, seleccionados en una zona definida en el centro del tubo (20-40 mm), se exportaron a un archivo de Excel, los cuales se presentan en la Figura 3.14. Se observa una tendencia a disminuir, la cual se ajustó a una línea recta cuya pendiente representa la velocidad de disminución de la retrodispersión de luz. Esta velocidad está relacionada con el incremento de tamaño de agregados o de partículas. Todas las emulsiones de estudio presentaron una tendencia similar en función del tiempo.

En el Cuadro 3.12 se resumen las velocidades calculadas. Se puede observar que las velocidades cuando se varió la proporción de aceite, son muy pequeñas ($\sim 5 \times 10^{-5}$ mm/min). En cuanto al efecto de variación del concentrado de suero de leche, la menor velocidad se detectó en la mayor concentración de suero de leche, por el contrario, la mayor velocidad se detectó al 15% de aceite vegetal, aunque en orden de magnitud son similares.

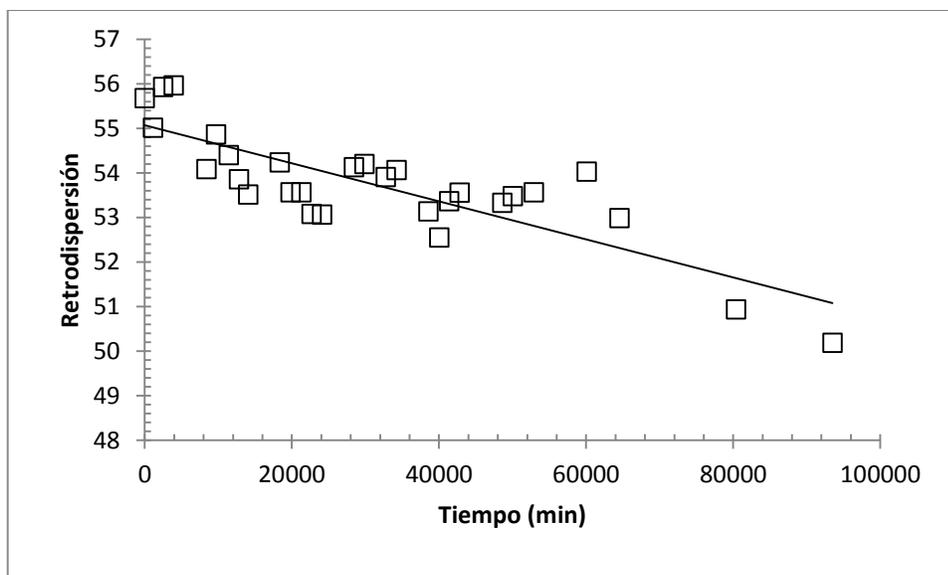


Figura 3.14 Disminución de la retrodispersión de luz en función de almacenamiento en refrigeración, en una emulsión láctea fortificada (10% aceite vegetal).

No se encontraron reportados en la literatura científica, valores de velocidad correspondientes al aumento de tamaño de partícula en emulsiones, por lo que se realizó una comparación somera con las velocidades detectadas en espumas de concentrado de suero de leche estabilizadas con goma xantana (~0.12 - 0.52) (Martínez-Padilla y col., 2015), lo que confirma que las emulsiones de estudio son sistemas dispersos estables, en cuanto al cambio de tamaño de los agregados o tamaño de partícula.

De acuerdo con lo reportado, entre más estable es una emulsión más lento cambian sus propiedades y dichos cambios pueden ser debidos a procesos físicos (agregación o floculación), observados en las emulsiones de estudio, por lo anterior, se puede concluir que la base de emulsión láctea desarrollada en este proyecto, es estable ya que la velocidad de agregación o incremento de tamaño de partícula fue mínima (McClements, 1999).

Cuadro 3.12 Velocidad de la disminución de la retrodispersión de luz en función del tiempo de almacenamiento.

Variación de aceite			
	Velocidad %/min	σ	C.V. (%)
5%	4.73E-05	8.50E-06	18
10%	5.04E-05	9.35E-06	19
15%	4.90E-05	1.47E-05	30
Variación de concentrado de suero de leche			
5%	2.94E-05	1.18E-06	4
10%	3.08E-05	7.40E-06	24
15%	2.93E-05	4.40E-06	15

Desviación estándar (σ), coeficiente de variación (C.V.)

CONCLUSIONES

En este proyecto se desarrolló una base de emulsión láctea fortificada con concentrado de suero de leche estable y versátil, es decir, útil para el desarrollo de productos nutritivos o funcionales con características deseadas dependiendo del consumidor a quien sea dirigido, donde la fuente de aceite vegetal puede ser modificada de acuerdo con los requerimientos del producto a desarrollar, por ejemplo con lípidos de mayor digestibilidad, mayor contenido de ácidos grasos omega 3 entre otros, así como, vitaminas, minerales que sean requeridos.

Como se pudo observar, el efecto de la adición de vitaminas a la emulsión base no fue considerable, ya que se obtuvo una distribución de tamaño de partícula similar a la formulación base sin vitaminas. Además, por la concentración baja en la que agregan, es poco probable que se modifique la reología de la misma. De acuerdo con los resultados de este proyecto, la formulación que se recomienda como emulsión base, es la que contiene 10% de aceite y 10% de concentrado de suero de leche, ya que además de ser estable permite la adición de otros componentes o nutrimentos.

Las emulsiones lácteas estudiadas se encuentran dentro de los estándares establecidos de pH de bebidas lácteas, en un intervalo de 6.12 a 6.77. La densidad relativa de las muestras varió en un intervalo de 1.00 a 1.11; en las muestras con mayor contenido de aceite vegetal se observó una menor densidad relativa.

La reología de la fase acuosa determinó la reología de la base de la emulsión láctea, de tal forma que, el comportamiento al flujo de las fases acuosas y la emulsión sin xantana fue newtoniano con una viscosidad entre 0.002 y 0.01 Pa.s. La adición de goma xantana (estabilizante indispensable en la formulación propuesta) a la fase acuosa y por lo tanto en la emulsión láctea, cambió el comportamiento a no newtoniano, ajustándose los datos experimentales al modelo de Carreau-Yasuda. La η_0 de dicho modelo aumentó al incrementarse la concentración de aceite vegetal (31.8 a 103.9 Pa.s) y con el incremento de la concentración de suero de leche (26.95 a

100.68 Pa.s). De igual manera, T_c se incrementó al aumentar la concentración tanto de aceite como de concentrado de suero de leche. El índice de comportamiento al flujo se encontró en un intervalo de 0.27 y 0.31.

En cuanto a la distribución del tamaño de partícula, relacionado indirectamente con la estabilidad de la base de la emulsión, se observaron agregados en las fases acuosas sin ultrasonido, diámetros de partícula por encima de los 130 μm , mientras que al aplicar ultrasonido las partículas se disgregaron (3 y 13 μm). El tamaño de partícula de las emulsiones, disminuyó con el aumento del concentrado de suero de leche hasta un valor de 2 μm , empleando 15%. Las emulsiones con diferente concentración de aceite presentaron una distribución de tamaño de partícula bimodal, sin la aplicación de ultrasonido (se seguían observando los agregados de la fase acusa) y monomodal con ultrasonido, permaneciendo constante el tamaño de partícula al aumentar la concentración de aceite vegetal, aproximadamente de 3 μm , correspondiendo probablemente a los glóbulos de aceite. Al adicionar vitaminas liposolubles se obtuvieron emulsiones con el menor diámetro de partícula (2 μm).

En general, las emulsiones con diferente concentración de aceite vegetal y concentrado de suero de leche fueron estables, no presentaron algún proceso de desestabilización durante un tiempo aproximado de 1560 horas. Con los resultados de retrodispersión de luz a través de la emulsión, en función del tiempo de almacenamiento, se evaluó indirectamente la velocidad de aumento del tamaño de partícula o la formación de agregados (flóculos) a lo largo del tubo, a través de la disminución del porcentaje de luz retrodispersa, obteniéndose velocidades despreciables ($5.04\text{E}-05$ %/min).

REFERENCIAS

- Alais Ch. 2003. Ciencia de la leche. 4ª ed. Editorial Reverté, S. A. España, pp. 23-25.
- Aranceta, M., Gil, A. 2009. Alimentos funcionales y la salud en las etapas infantil y juvenil. Panamericana, España, pp. 2-3.
- Auris, G. 2010. Evaluación de una bebida láctea instantánea a base de harina de arracacha con la adición de ácido fólico. Revista Chilena de Nutrición, 7, 1-3.
- Beristain F. 2012. Guía de uso rápido: Granulómetro Cilas 960L/D. Documento interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM.
- Botella M. R. 2005. Reología de suspensiones cerámicas. CSIC. España.
- Brenan, G.J., 2006. Food Processing Handbook. Wiley-Vch Verlag Gmbh & Co. KGaA, Germany.
- Bruzos, S., Candela, C., Nomdedeo, C., Bordonada, A. 2011. Nutrición salud y alimentos funcionales, UNED, España, pp. 15-17.
- Charalambous, G.D. 1989. Food Emulsifiers: Chemistry, technology, functional properties and applications. Elsevier, Holland.
- Cribb J. P. 2005. Las proteínas del suero de leche de los Estados Unidos y la nutrición en los deportes. U.S. Dairy Export Council. Disponible en <http://www.thinkusadairy.org>.
- Cubero A.M., Villalta J. 2002. Aditivos Alimentarios. Mundi-Prensa, España, pp 136-137.
- Dallant. Aromas para la alimentación, Flavours for food & beverage. 2013. Consultado agosto, 2013. Disponible en <http://www.dallant.com/productos/bases-lacteas/>.
- Delgado-Reyes, V.A. Guía de uso rápido: Densímetro DMA 38, Paar Physica. Documento interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM.
- Dickinson E. 1986. Food emulsions and foams. Woodhead Publishing Limited, England.
- Dolz M., Hernández J. M., Delegido J., Alfaro C. M., Muñoz J. 2007. Influence of xanthan gum and locust bean gum upon flow. Journal of food engineering, 8, 179- 186.

- Doublier L.J., Garnier C. Renard D., Sanchez C. 2000. Protein-Polysaccharide interactions. *Colloid & Interface Science*, 5, 202-214.
- Euston, R.S., Hirts, R.L., Hill, P.J. 1999. The emulsifying properties of β -lactoglobulin genetic variants A, B and C. *Food Hydrocolloids*, 12, 194-195.
- Fennema O. R. 1996. *Química de los alimentos*. 3ª ed. Marcel Dekker, New York.
- Friberg, S.T., Larsson, K., Sjoblo, J. 2005. *Food Emulsions* 4ª ed. Marcel Dekker, New York.
- García G., Quintero R., Lopez M. 2004. *Biotecnología Alimentaria*. Limusa Noriega Editores. México, D.F.
- Gil A. 2010 *Tratado de nutrición. Composición y calidad nutritiva de los alimentos Tomo II* 2ª ed. Médica panamericana, Madrid.
- Goh T. K., Sarkar A., Singh H. *Milk protein-polysaccharide interaction in Milk Proteins: From Expression to Food* (Thompson, A. Boland, M, Singh, H.) Elsevier, Holland.
- González-Sánchez J. 2012. *Guía de uso rápido: Turbiscan MA 2000, Formulation*. Documento interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM.
- Ibarz A., Barbosa-Cánovas V. G., 2005. *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Mundi-Prensa. México.
- Jambrack R.A., Manson J.T., Lelas V., Pniwnyk L., Herceg Z., 2014. Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight. of whey proteins, *Journal of Food Engineering*, 121, 15-23.
- Kinsella, J. E. 1982. Relationship between structure and functional properties of food proteins. En: P. F. Fox, & J. J. Condon, *Food proteins*. Applied Science Publishers, New York, pp. 51.
- Martínez M.J., 2010. *Impacto de la interacción entre β -lactoglobulina, caseinoglicomacropéptido y polisacáridos en coloides alimentarios*. Tesis Doctorado. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Martínez-Padilla L.P. 2012. *Guía de uso rápido: Reómetro Physica MCR 301, Anton Paar*. Documento interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM.

- McClements J. D. 1999. Food Emulsions principles, practice and techniques. CRC press. Washington, D.C.
- Mendez R.A., Ramos N.A., 2009. Comportamiento reológico de un fluido. Ciencia y Mar, 36, 36-37.
- Mendez S.A., Pérez T.L., Paniagua M.M. 2010. Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos. Latin-American Journal of Physics Education, 4 (1), 237-245.
- Multon, J. L. 2000. Aditivos y auxiliares de fabricación en las industrias alimentarias, 2ª ed, Acribia, España.
- NMX-F-317-S-1978. Determinación de pH en alimentos. Secretaria de comercio y fomento industrial. Norma Mexicana.
- NOM-243-SSA1-2010. Productos y servicios. Leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba. Norma Oficial Mexicana.
- NTE INEM 2564-2011 Bebidas lácteas. Requisitos. Norma Técnica Ecuatoriana. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Olagnero, G., Abad, A., Bendesky, S., Genevois, C., Granzella, L., Montonati, M. 2007. Alimentos funcionales: fibra, prebióticos, probióticos y simbióticos URL <http://www.fmed.uba.ar>.
- Panaras, G., Moatsou, G., Mandala, I.J. 2011. The influence of functional properties of different whey protein concentrates on the rheological and emulsification capacity of blends with xanthan gum. Food Hydrocolloids, 86, 433-434.
- Paquin, P.P. 2009. Funtional and Specialty Beverage Technology. CRC Press. Boca Raton, pp. 232-261.
- Pincay A.E, 2010. Elaboración de una Leche de Avena esterilizada utilizando diferentes estabilizadores y niveles de pimalac como conservante de la empresa Prolac. Tesis de licenciatura, Ingeniería en industrias agropecuarias. Escuela superior politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Ramirez-Navas. S. J., 2006. Introducción a la reología de los alimentos. Universidad del Valle. Colombia.

- Rao A. M. 1999. Rheology of fluids and semisolid foods principles and applications. Aspen Publication. U.S.A
- Riera, B.J., Salcedo, C.R., Alegret, L.P. 2004. Química y bioquímica de los alimentos II. Publicacions i Edicions, Barcelona.
- Sharma K. S., Mulvaney J. S., Rizvi H. S. S., 2007. Ingeniería de alimentos. Limusa Wiley. México. Pp. 51-53.
- Steffe F. J. 1996. Rheological methods in food process engineering. 2ª ed. Freeman Press. U.S.A
- Sun C., Gunasekarana, S., Richards, M. P. 2007. Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions. Food Hydrocolloids, 21, 555-564.
- Tcholakova, S., Denkov, D.N., Ivanov, B.I., Campbell, B. 2006. Coalescence stability of emulsions containing globular milk proteins. Advances in Colloid and Interface Science, 123-126, 259-293.
- Truong T., Bansal N., Sharma R., Palmer M., Bhandari B. 2014. Effects of emulsion droplet sizes on the crystallization of milk fat. Food Hydrocolloids, 145, 745-746.
- Vega C. 2006. Sobre las propiedades emulsificantes de las caseínas. Mundo lácteo y cárnico, 22, 14-17.
- Ye A. 2011. Functional properties of milk protein concentrates: Emulsifying properties, adsorption and stability of emulsions. Food Hydrocolloids, 21, 14-21.