



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE GOMA XANTANA O ARÁBIGA EN LAS  
PROPIEDADES DE FLUJO Y ESTABILIDAD DE EMULSIONES  
ELABORADAS CON PROTEÍNAS LÁCTEAS**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**PRESENTAN:**

Vázquez Solorio Sandra Carolina

Vega Méndez Darinka Deyanira

**ASESORAS:**

Dra. Laura Patricia Martínez Padilla

Dra. María Guadalupe Sosa Herrera



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.  
**ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS**

**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE**

**ATN:L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Efecto de la adición de goma xantana o arábica en las propiedades de flujo  
y estabilidad de emulsiones elaboradas con proteínas lácteas

Que presenta la pasante Sandra Carolina Vázquez Solorio

Con número de cuenta: 405032763 para obtener el título de: \_\_\_\_\_  
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**  
Cuautitlan Izcalli, Mex. a 7 de junio de 2011

<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dr. Juan Manuel Aceves Hernández</u>	
<b>VOCAL</b>	<u>Dra. Laura Patricia Martínez Padilla</u>	
<b>SECRETARIO</b>	<u>I.A. Francisco Javier López Martínez</u>	
<b>1er SUPLENTE</b>	<u>I.A. María Guadalupe Morales Cabral</u>	
<b>2º SUPLENTE</b>	<u>I.A. Maritza Rocandio Pineda</u>	<u>Maritza R.</u>



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE**



**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Efecto de la adición de goma xantana o arábica en las propiedades de flujo  
y estabilidad de emulsiones elaboradas con proteínas lácteas

Que presenta la pasante Darinka Deyanira Vega Méndez

Con número de cuenta: 302175259 para obtener el título de:

Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**

**Cuautitlan Izcalli, Mex. a 7 de junio de 2011**

<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dr. Juan Manuel Aceves Hernández</u>	
<b>VOCAL</b>	<u>Dra. Laura Patricia Martínez Padilla</u>	
<b>SECRETARIO</b>	<u>I.A. Francisco Javier López Martínez</u>	
<b>1er SUPLENTE</b>	<u>I.A. María Guadalupe Morales Cabral</u>	
<b>2º SUPLENTE</b>	<u>I.A. Maritza Rocandio Pineda</u>	<u>Maritza R.</u>

## *Agradecimientos*

*A mi madre y hermanos por su paciencia, cariño y apoyo incondicional, asimismo a mi padre que desde el cielo me acompaña en cada paso.*

*A la Dra. Paty por su valioso tiempo, paciencia, confianza y todos los conocimientos que compartió conmigo.*

*A mis amigos con cariño y admiración.*

*Finalmente agradezco al programa de apoyo a proyectos de investigación e innovación tecnológica (PAPIIT) ya que mediante el proyecto IN119110 (efecto de proteína láctea sola y en mezcla con polisacáridos sobre la estabilidad y reología de sistemas dispersos) parte de este trabajo fue financiado, asimismo a la universidad por darme la oportunidad de concluir una de las metas mas importantes de mi vida.*

*A mis padres por su apoyo y amor incondicional y por contribuir a la conclusión del proyecto más importante de mi vida.*

*A mi hermana por su paciencia y aliento.*

*A mi asesora la Doctora Paty por sus enseñanzas, apoyo y comprensión.*

*A mi tía Angélica por la motivación.*

*A mis amigos con afecto y aprecio.*

*Gracias por todo!*

## ÍNDICE

Índice de figuras	iv
Índice de cuadros	xi
Resumen	
Introducción	
Capítulo I. Antecedentes	6
1.1 Polisacáridos	6
1.1.1 Xantana	7
1.1.2 Goma arábica	9
1.2 Proteínas	11
1.2.1 Proteínas lácteas	13
1.2.1.1 Caseinato de sodio	14
1.2.1.2 Proteína de suero lácteo	16
1.3 Emulsiones	17
1.3.1 Solvatación de un biopolímero	19
1.3.2 Homogeneización	20
1.3.3 Distribución de ingredientes en emulsiones	22
1.3.4 Ingredientes de las emulsiones	23
1.3.5 Estabilidad de emulsiones	27
1.3.6 Migración de partículas	32
1.3.7 Dispersión de luz	33
1.4 Reología de emulsiones	36
1.4.1 Tipos de comportamiento viscoso	37
1.4.2 Medición de las propiedades reológicas	45

1.4.3	Propiedades reológicas de las emulsiones	48
1.4.4	Factores que influyen en la reología de las emulsiones	50
Capítulo II.	Metodología de investigación	54
2.1	Objetivos	54
2.2	Materiales	55
2.2.1	Materia prima	55
2.2.2	Prueba de humedad	55
2.3	Métodos	55
2.3.1	Preparación de muestras	55
2.3.1.1	Preparación de fase acuosa	56
2.3.1.2	Preparación de emulsiones aceite en agua	56
2.3.2	Pruebas reológicas en estado estacionario	58
2.3.3	Estabilidad por transmisión y retrodispersión de luz	59
Capítulo III.	Análisis de resultados	62
3.1	Determinación de parámetros reológicos	62
3.1.1	Concentrado de suero lácteo	62
3.1.2	Caseinato de sodio	64
3.1.3	Xantana	66
3.1.4	Concentrado de suero lácteo y xantana	69
3.1.5	Caseinato de sodio y xantana	71
3.1.6	Goma arábica	74
3.1.7	Concentrado de suero lácteo y goma arábica	76
3.1.8	Caseinato de sodio y goma arábica	78
3.2	Evolución de las propiedades de flujo y la viscosidad de emulsiones en función del tiempo de almacenamiento	81



3.2.1 Emulsión con goma arábica	81
3.2.2 Emulsión con concentrado de suero lácteo y xantana	83
3.2.3 Emulsión con caseinato de sodio y xantana	86
3.3 Estabilidad a través de la dispersión de luz	89
3.3.1 Concentrado de suero lácteo	90
3.3.2 Caseinato de sodio	91
3.3.3 Xantana	94
3.3.4 Concentrado de suero lácteo y xantana	98
3.3.5 Caseinato de sodio y xantana	102
3.3.6 Goma arábica	105
3.3.7 Concentrado de suero lácteo y goma arábica	108
3.3.8 Caseinato de sodio y goma arábica	112
Conclusiones	116
Referencias bibliográfica	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura química de la xantana.	8
Figura 1.2 Estructura química de la goma arábiga.	9
Figura 1.3 Representación esquemática de una emulsión aceite en agua.	19
Figura 1.4 Tipos de homogeneización.	21
Figura 1.5 Mecanismos fisicoquímicos de inestabilidad de las emulsiones alimenticias.	27
Figura 1.6 Etapas de los mecanismos de inestabilidad en emulsiones.	30
Figura 1.7 Representación esquemática del cremado.	32
Figura 1.8 Inversión de fase.	32
Figura 1.9 Dispersión de luz para monitorear la separación gravitacional.	34
Figura 1.10 Visualización de un barrido del reporte generado por el software del Analizador Turbiscan MA 2000.	35
Figura 1.11 Clasificación simple del comportamiento reológico.	38
Figura 1.12 Curva de flujo de fluidos independientes del tiempo.	43
Figura 1.13 Comportamiento de los fluidos dependientes del tiempo.	45
Figura 1.14 Arreglo de partículas en sistemas dispersos.	50
Figura 3.1 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S).	63

Figura 3.2 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C).	65
Figura 3.3 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 0.3% de xantana (X).	67
Figura 3.4 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 0.5% de xantana (X).	68
Figura 3.5 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S) y 0.3% de xantana (X).	70
Figura 3.6 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S) y 0.5% de xantana (X).	70
Figura 3.7 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C) y 0.3% de xantana (X).	72
Figura 3.8 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C) y 0.5% de xantana (X).	73
Figura 3.9 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 7.5% de goma arábica (A).	75

Figura 3.10 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 10% de goma arábica (A).	75
Figura 3.11 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S) y 7.5% de goma arábica (A).	77
Figura 3.12 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S) y 10% de goma arábica (A).	77
Figura 3.13 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C) y 7.5% de goma arábica (A).	79
Figura 3.14 Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C) y 10% de goma arábica (A).	80
Figura 3.15 Relación de la viscosidad en función del tiempo de almacenamiento de las emulsiones con 7.5% de goma arábica.	82
Figura 3.16 Relación de la viscosidad en función del tiempo de almacenamiento de las emulsiones con 10% de goma arábica.	82
Figura 3.17 Variación de los parámetros reológicos de la ley de la potencia de las emulsiones con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.3% de xantana en función del tiempo de almacenamiento. a) índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), b) índice de consistencia ( $k$ ).	84

Figura 3.18 Variación de los parámetros reológicos de la ley de la potencia de las emulsiones con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.5% de xantana en función del tiempo de almacenamiento. a) índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), b) índice de consistencia ( $k$ ).	85
Figura 3.19 Variación de los parámetros reológicos de la ley de la potencia de las emulsiones con 2% de caseinato de sodio y 0.3% de xantana en función del tiempo de almacenamiento. a) índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), b) índice de consistencia ( $k$ ).	86
Figura 3.20 Variación de los parámetros reológicos de la ley de la potencia de las emulsiones con 2% de caseinato de sodio y 0.5% de xantana en función del tiempo de almacenamiento. a) índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), b) índice de consistencia ( $k$ ).	87
Figura 3.21 Transmisión y retrodispersión de luz en el tiempo inicial o de referencia en una muestra escaneada en el Analizador Turbiscan MA 2000.	89
Figura 3.22 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo en modo referencia.	91
Figura 3.23 Espesor absoluto en la zona de 0 a 30.3 mm de la emulsión con concentrado de suero lácteo al 2%.	91
Figura 3.24 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio en modo referencia.	93
Figura 3.25 Espesor absoluto en la zona de 8.38 a 35.3 mm en la emulsión con caseinato de sodio al 2%.	93
Figura 3.26 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 0.3% de xantana en modo referencia.	96

Figura 3.27 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 0.5% de xantana en modo referencia.	97
Figura 3.28 Espesor absoluto en la zona de 0 a 32.4 mm en la emulsión con xantana al 0.3%.	97
Figura 3.29. Espesor absoluto en la zona de 0 a 1.34 mm en la emulsión con xantana al 0.5%.	98
Figura 3.30 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.3% de xantana en modo absoluto.	100
Figura 3.31 Transmisión y retrodispersión de luz en de la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.3% de xantana en modo referencia.	101
Figura 3.32 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.5% de xantana en modo absoluto.	101
Figura 3.33 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.5% de xantana en modo referencia.	102
Figura 3.34 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 0.3% de xantana en modo absoluto.	103
Figura 3.35 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 0.3% de xantana en modo referencia.	104

Figura 3.36 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 0.5% de xantana en modo absoluto.	104
Figura 3.37 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 0.5% de xantana en modo referencia.	105
Figura 3.38 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 7.5% de goma arábica en modo referencia.	106
Figura 3.39 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 10% de goma arábica en modo referencia.	107
Figura 3.40 Espesor absoluto en la zona de 0 a 20.2 mm en la emulsión con goma arábica al 7.5%.	107
Figura 3.41 Espesor absoluto en la zona de 0 a 8.53 mm en la emulsión con goma arábica al 10%.	108
Figura 3.42 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 7.5% de goma arábica en modo referencia.	110
Figura 3.43 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 10% de goma arábica en modo referencia.	110
Figura 3.44 Espesor absoluto en la zona de 0 a 23.1 mm en la emulsión con concentrado de suero lácteo al 2% y goma arábica al 7.5%.	111
Figura 3.45 Espesor absoluto en la zona de 0 a 25.68 mm en la emulsión con concentrado de suero lácteo al 2% y goma arábica al 10%.	111

Figura 3.46 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 7.5% de goma arábica en modo referencia.	113
Figura 3.47 Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 10% de goma arábica en modo referencia.	114
Figura 3.48 Espesor absoluto en la zona de 0 a 12.82 mm en la emulsión con caseinato de sodio al 2% y goma arábica al 7.5%.	114
Figura 3.49 Espesor absoluto de la zona de 0 a 11.2 mm en la emulsión con caseinato de sodio al 2% y goma arábica al 10%.	115



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1 Tiempo de homogeneización para cada muestra realizada.	57
Cuadro 3.1 Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo.	63
Cuadro 3.2 Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de caseinato de sodio.	65
Cuadro 3.3 Valores de parámetros reológicos de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 0.3% y 0.5% de xantana.	68
Cuadro 3.4 Valores de parámetros reológicos de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo en mezcla con 0.3% y 0.5% de xantana.	71
Cuadro 3.5 Valores de parámetros reológicos de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de caseinato de sodio en mezcla con 0.3% y 0.5% de xantana.	73
Cuadro 3.6 Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con goma arábica a 7.5 y 10%.	76
Cuadro 3.7 Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo en mezcla con goma arábica a 7.5% y 10%.	78
Cuadro 3.8 Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con goma arábica a 7.5% y 10% en mezcla con 2% de caseinato de sodio.	80

Cuadro 3.9 Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de la emulsión con caseinato de sodio a 2% de concentración.	94
Cuadro 3.10 Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de la emulsión con xantana a 0.3% de concentración.	98
Cuadro 3.11 Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de la emulsión con goma arábica a 7.5% y 10% de concentración.	108
Cuadro 3.12 Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de las emulsiones con concentrado de suero lácteo a 2% y goma arábica a 7.5% y 10% de concentración.	112
Cuadro 3.13 Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de las emulsiones con caseinato de sodio a 2% y goma arábica a 7.5% y 10% de concentración.	115

## RESUMEN

En este estudio se prepararon sistemas acuosos y emulsiones de las mezclas de proteínas lácteas (caseinato de sodio y concentrado de suero lácteo) empleadas a una concentración de 2% con xantana (0.3 y 0.5%) y goma arábiga (7.5 y 10%). Asimismo, se elaboraron emulsiones de cada uno de los sistemas acuosos de proteínas y polisacáridos sin estar en mezcla, con la finalidad de tener controles y de esta forma comparar el comportamiento de cada biopolímero solo y en mezcla. Las emulsiones aceite en agua se prepararon en un porcentaje de 30% (p/p) de aceite y 70% (p/p) de fase acuosa. Se caracterizaron en un reómetro de cilindros concéntricos y en un analizador de dispersión de luz a temperatura ambiente, se efectuaron por triplicado pruebas de esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla y velocidad de migración de partículas respectivamente, para obtener el comportamiento al flujo y la estabilidad de las emulsiones y se realizó un seguimiento en función del tiempo de almacenamiento en refrigeración, así como de las propiedades reológicas y la transmisión y retrodispersión de luz de cada emulsión realizada para observar su evolución, hasta que se presentó una separación de fases. Las emulsiones de proteínas lácteas y la goma arábiga solas y en mezcla, presentan un comportamiento newtoniano y fueron inestables presentando una separación de fases visible, una clarificación bien definida y cremado. Las emulsiones de xantana sola y en mezcla con las proteínas lácteas tuvieron un comportamiento fluidificante a la cizalla. La emulsión con xantana sola fue inestable, pero a concentración de 0.5%, no muestra una separación de fases evidente. Mientras que las emulsiones de xantana en mezcla con ambas proteínas lácteas, presentaron una buena estabilidad, considerándola la mejor opción para la estabilización de las emulsiones estudiadas.

## INTRODUCCIÓN

En la industria de alimentos, las proteínas son generalmente usadas como emulsificantes por su capacidad para facilitar la formación de emulsiones y aumentar la estabilidad en emulsiones aceite en agua (Hemar y col., 2001; McClements, 2004). Las proteínas son moléculas de superficie activa, las cuales son adsorbidas hacia la superficie recién formada por los glóbulos, donde éstas facilitan una desorganización de los mismos por la disminución de la tensión interfacial y retardan la coalescencia formando una membrana protectora que impide que los glóbulos se junten demasiado para agregarse (McClements, 2004).

Las proteínas de origen lácteo han sido ampliamente utilizadas como emulsificantes debido a que son moléculas de superficie activa (Moschakis y col., 2005), por ejemplo, la proteína de suero contiene regiones hidrofílicas que pueden ser rápidamente adsorbidas en la interfase aceite-agua en forma de una película protectora, otorgando soporte estructural para los glóbulos de aceite a través de la combinación de interacciones electrostáticas y estéricas (Sun y col., 2007).

El caseinato de sodio es también muy usado como emulsificante en sistemas alimenticios, debido a que las caseínas presentes contienen regiones hidrofóbicas (prolina) e hidrofílicas, las cuales adsorben rápidamente la interfase aceite en agua, a través de una combinación de interacciones electrostáticas y estéricas. Sin embargo, la estabilidad de las emulsiones elaboradas con caseinato de sodio es sensible a la concentración de proteína

(caseinato) y concentración iónica (Hemar y col., 2001; Friberg y Larsson, 1997).

Además, los polisacáridos son agentes espesantes o gelificantes usados para incrementar la viscosidad o gelificar, retardando el movimiento de los glóbulos de aceite (Sun y col., 2007). Dentro de los polisacáridos de mayor uso en la industria de los alimentos se encuentra la xantana que es un polisacárido aniónico de origen bacteriano sintetizado por la bacteria *Xanthomonas campestris*, su propiedad más importante es su alta viscosidad a bajas velocidades de cizalla y su carácter fluidificante a altas velocidades, que se ha utilizado con la finalidad de producir un incremento de la viscosidad en emulsiones (Sun y col., 2007; Sun y Gunasekaran, 2009).

Otro biopolímero que ha destacado por su aplicación en emulsiones (principalmente bebidas carbonatadas y productos bajos en grasa) es la goma arábica, la cual es un polisacárido de alto peso molecular, en donde se ha demostrado que la fracción que contiene proteína se adsorbe fuertemente a la interfase aceite en agua (Prakash y col., 1990), por lo tanto, la goma arábica no sólo aumenta la viscosidad del medio acuoso como muchos otros polisacáridos sino que también forma una capa molecular alrededor de los glóbulos de la emulsión, resultando en una buena estabilización estérica. Sin embargo, es un emulsificante débil comparado con proteínas alimenticias (Ibanoglu, 2002).

Aunado a lo anterior, se ha reportado que la funcionalidad de las proteínas y polisacáridos individuales se pueden mejorar mediante las interacciones

sinérgicas entre ellos, repercutiendo en la estabilidad, textura y vida de anaquel de muchos productos alimenticios, entre ellos las emulsiones (Pérez y col., 2009).

Algunas investigaciones realizadas por Hemar y col., (2001) y Moschakis y col., (2005), donde se estudiaron emulsiones al 30% p/p de aceite de soya, con 1 ó 3% de caseinato de sodio y 0.01 y 0.2% de xantana, se analizó la microestructura de la emulsión formada, a través de microscopía confocal, sus propiedades de flujo y la estabilidad a través de un método óptico de separación de fases. Concluyeron que en concentraciones moderadamente bajas de xantana, se induce la floculación por agotamiento (la proteína excluye al polisacárido, formando flóculos de glóbulos y zonas concentradas de hidrocoloide) y una separación de fases. Sin embargo, un incremento en la concentración de xantana, causa inmovilización de la estructura debido a un incremento en la viscoelasticidad local.

Estudios recientes sobre interacciones de polisacáridos con proteína láctea, determinaron en emulsiones al 20% v/v de aceite, conteniendo 2% de suero de leche y 0-0.5% de xantana, la influencia en el tamaño de partícula, la microestructura, la estabilidad oxidativa y el cremado (visualmente), así como las propiedades de flujo (Sun y col., 2007). Concluyeron que en diferentes niveles de concentración de xantana se presentaba floculación (0.2% de xantana). Sin embargo, a concentraciones de 0.5% no se observó floculación, pero sí un efecto que favorece la oxidación.

Sun y Gunasekaran (2009) recientemente investigaron emulsiones con suero

de leche (0.2, 1 y 2%) en mezcla con xantana (0.2%) en tres niveles de fracción volumen (5, 20 y 40%). Se determinó también la distribución del tamaño de partícula, la carga superficial, la estabilidad oxidativa y la reología. Encontraron que al aumentar la concentración de proteína de suero de leche, se afectaba significativamente el tamaño de partícula de la emulsión, la carga superficial y la estabilidad oxidativa, pero tuvo poco efecto en la estabilidad (obtenida visualmente) con respecto al cremado y las propiedades de flujo de las emulsiones. Por otro lado, se encontró que las proteínas lácteas son eficaces para estabilizar emulsiones a concentraciones de 0.3-2% en una fracción de aceite que va desde 10% a 45% (Tippetts y Martini, 2009).

Considerando el interés de comparar el efecto de diferentes polisacáridos bajo las mismas condiciones de preparación y concentración de aceite, utilizando proteína de suero lácteo y caseinato de sodio, con el objeto de valorar las posibles interacciones y aplicaciones de tipo tecnológico y considerando que aún existen interrogantes en cuanto a la estabilidad en emulsiones proporcionada por la xantana en mezcla con caseinato de sodio, en concentraciones superiores al 0.3% y que existen actualmente métodos no-ópticos de seguimiento de la estabilidad de emulsiones, se propone en este estudio monitorear la estabilidad de las emulsiones conteniendo goma xantana o arábica en mezcla con proteínas lácteas, a través de la dispersión de luz y un método reológico.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES

### **1.1 Polisacáridos**

Los polisacáridos son biopolímeros de monosacáridos. Las propiedades funcionales de los biopolímeros alimenticios (solubilidad, actividad superficial, espesamiento y gelificación) son determinadas por sus características moleculares (peso molecular, conformación, flexibilidad, polaridad, hidrofobicidad e interacciones con otros componentes). Estas características moleculares son determinadas por el tipo, número y secuencia de los monómeros que forman la cadena del polímero. Los monómeros varían de acuerdo a su polaridad (iónico, polar, no polar o anfifílico), dimensiones físicas, interacciones moleculares y grupos reactivos. Si un polímero contiene sólo un tipo de monómero se conoce como homopolímero (ejemplo amilosa o celulosa), pero si contiene diferentes tipos de monómeros se conoce como heteropolímero (ejemplo, goma arábiga, pectina, y todas las proteínas) (Lapasin y Pricl, 1999).

Las proteínas y los polisacáridos tienen uniones covalentes entre los monómeros en torno al cual la cadena polimérica puede girar en determinados ángulos bien definidos. En la práctica, los biopolímeros tienden a adoptar conformaciones bien definidas en el intento de minimizar la energía libre del sistema en las condiciones ambientales prevalecientes. Esta conformación está determinada por el delicado equilibrio de fenómenos fisicoquímicos, incluyendo las interacciones hidrofóbicas y electrostáticas, enlaces de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals y entropía configuracional (Dumitriu,



2005).

Finalmente ha de hacerse mención que los biopolímeros pueden someterse a transiciones de una conformación a otra, o de un estado de agregación a otro, si su ambiente es alterado por ejemplo por pH, fuerza iónica, composición del solvente, o temperatura. La conformación y el estado de agregación de los biopolímeros juegan un papel importante en la determinación de sus atributos funcionales (Lapasin y Pricl, 1999).

### 1.1.1 Xantana

La xantana es un polisacárido extracelular sintetizado por la bacteria *Xantomonas campestris*, es una molécula de alto peso molecular (Dumitriu, 2005). Su estructura primaria (Figura 1.1), está basada en una cadena principal lineal de unidades D-glucosa unidas por enlaces  $\beta$ -1,4 que llevan cadenas laterales cada dos residuos de glucosa sobre el carbono C(3), hay un trisacárido cargado en la cadena lateral que tiene residuos de ácido glucurónico entre dos unidades de manosa. La terminal  $\beta$ -D-manosa unida por enlaces  $\beta$ -1,4 al ácido glucurónico, el cual, a su vez está unido por enlaces  $\alpha$ -1,2 a la  $\alpha$ -D-manosa. Alrededor de la mitad de los residuos de manosa terminales están enlazados a un ácido pirúvico en las posiciones O(4) y O(6). Los grupos acetilo están presentes como sustitutos en la posición O(6) de la D-manosa no terminal (Lapasin y Pricl, 1999).

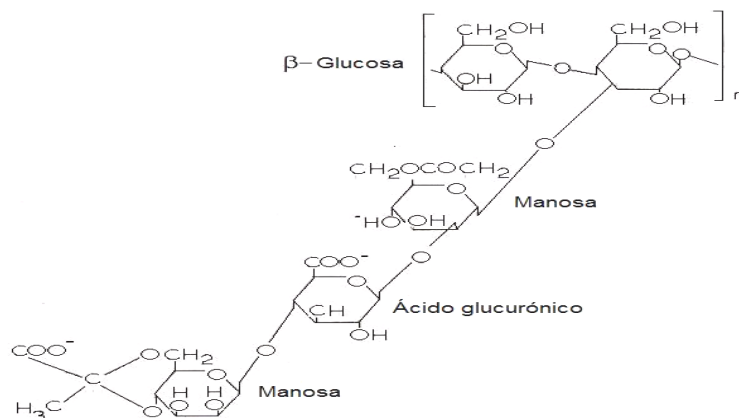


Figura 1.1. Estructura química de la xantana (Fenema, 1985).

La goma xantana es ampliamente utilizada en aplicaciones alimenticias. Es completamente soluble tanto en agua caliente como en fría y es estable en un amplio intervalo de soluciones y condiciones ambientales como pH, fuerza iónica, calentamiento, ciclos de congelación y descongelación, y mezclado. Forma disoluciones altamente viscosas a concentraciones relativamente bajas porque sus moléculas son bastante rígidas y está muy extendida en fase acuosa (Dumitriu, 2005).

Cuando se dispersa en agua, forma complejos agregados a través de puentes de hidrógeno y polímeros entrelazados, debido a estas redes altamente ordenadas y entrelazadas, las disoluciones de xantana presentan una alta viscosidad a bajas velocidades de cizalla y baja viscosidad a altas velocidades de cizalla, debido a la desagregación de las redes y la alineación de las macromoléculas individuales en la trayectoria de la cizalla. Sin embargo, cuando la cizalla termina, los agregados se reforman rápidamente. En las emulsiones aceite en agua, la adición de xantana en concentraciones bajas (0.01%), han mostrado un aumento en la velocidad de cremado de los glóbulos en la emulsión, que es aparentemente debido a la floculación de los

glóbulos dispersos. Aunque la causa exacta de floculación no se sabe, el agotamiento es el mecanismo que ha sido sugerido. La adición de concentraciones de xantana alrededor de 0.2% a emulsiones, disminuye la velocidad de cremado, por el incremento en la viscosidad aparente de la fase continua, la cual retarda el movimiento de los glóbulos de aceite dispersos (Hemar y col., 2001; Dumitriu, 2005).

### 1.1.2 Goma arábica

La goma arábica, se obtiene del exudado de la corteza de arboles *Acacia senegal*, es un polisacárido que consiste de una rama de heteropolímeros de arabinogalactano (Ibanoglu, 2002). El grupo central está constituido de D-galactopiranososa, unido por enlaces  $\beta$ -1,6 y  $\beta$ -1,4; lleva cadenas laterales de D-galactopiranososa, L-arabinosa, L-ramnosa y ácido D-glucurónico, unidas por enlaces 1-3 (Figura 1.2) (Belitz y Grosch, 1997; Baltes, 2007).

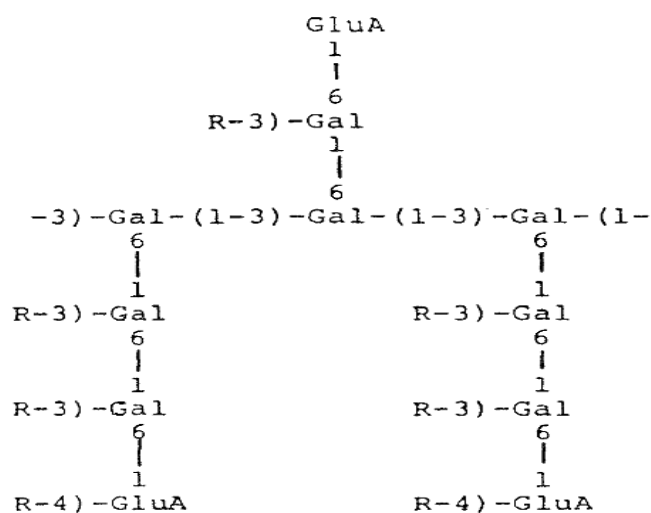


Figura 1.2. Estructura química de la goma arábica, en la cual Gal es D-Galactopiranososa, GluA es  $\beta$ -D-Acido glucurónico y R es uno de los siguientes radicales: L-Ara-(1-; L.Ra-(1-;  $\alpha$ -D-Gal-)1-3)-L-Ara; o  $\beta$ -L-Ara (1-3)-L-Ara-(1-) (Belitz y Grosch, 1997).

La goma arábica es un hidrocoloide único debido a su alta solubilidad en agua y por tener propiedades tensoactivas. A pesar de esto, pequeñas partículas en solución pueden formar agregados que no se disuelven fácilmente a menos que en la suspensión sean completamente mezclados o agitados. Esta insolubilidad es causada por el agua que solubiliza la capa exterior de los agregados formando un gel el cual reduce extremadamente la penetración del agua. Para prevenir esta condición, la goma arábica se puede mezclar con otros ingredientes secos antes de la adición del agua o también con etil alcohol o glicerol antes de adicionarse a una solución acuosa (Charalambous y Doxastakis, 1989; Belitz y Grosch, 1997).

La goma arábica consta de tres fracciones de biopolímeros de alto peso molecular. La fracción de superficie activa, se cree que consta de ramificaciones de arabinogalactosa unida a una cadena de polipéptido. La cadena hidrofóbica del polipéptido, se cree que se ancla a las moléculas de la superficie de los glóbulos, mientras que los bloques hidrofílicos de la arabinogalactosa se extienden sobre la solución. La membrana interfacial formada por la goma arábica se cree que proporciona estabilidad contra la agregación de los glóbulos, principalmente a través de repulsiones estéricas, pero con una pequeña contribución de repulsiones electroestáticas (McClements, 2005).

Las disoluciones de goma arábica se pueden usar en muchos productos alimenticios en combinación con proteínas alimenticias, debido a que la actividad de superficie de la goma arábica es ligeramente baja, se puede usar también como realzador de estabilidad en emulsiones formadas por proteínas,

las cuales necesitan presentar baja viscosidad (Baltes, 2007). Son las menos viscosas entre los polisacáridos de grado natural en los alimentos, muestran un comportamiento reológico newtoniano típico a concentraciones hasta de 40%, sin embargo, la disolución se convierte en fluidificante a la cizalla a concentraciones por arriba de 40%, es decir, que la viscosidad disminuye con el incremento de la velocidad de cizalla (Charalambous y Doxastakis, 1989; Cheftel y col., 1989a).

La goma arábica tiene, además, una afinidad relativamente baja por la interfase aceite-agua comparada con la mayoría de otros biopolímeros de superficie activa lo que significa que tiene que ser utilizada en concentraciones altas (50%) para formar emulsiones estables. Por esta razón su aplicación como emulsificante es restringida a productos que tengan una concentración relativamente baja de glóbulos, como las bebidas gaseosas emulsificadas (Belitz y Grosch, 1997).

## **1.2 Proteínas**

Las proteínas son ingredientes de productos alimenticios que por sus propiedades funcionales, ayudan a establecer la estructura y propiedades finales del alimento. Las proteínas son polímeros de aminoácidos. Los aminoácidos presentan características que se deben fundamentalmente a su naturaleza iónica anfotérica ácido-base (Cheftel y col., 1989b).

La estructura primaria de una proteína corresponde a la secuencia de los aminoácidos ligados entre sí por enlaces covalentes llamados enlaces peptídicos. La estructura secundaria de una proteína corresponde a la

disposición espacial adoptada por la cadena polipeptídica. La estructura terciaria corresponde a la organización tridimensional de la cadena polipeptídica conteniendo zonas de estructura secundaria bien definidas (hélice  $\alpha$ , curvaturas  $\beta$ , hojas plegadas  $\beta$ ) o mal definidas (desorden estadístico). La estructura cuaternaria, corresponde a la distribución geométrica entre las diversas cadenas polipeptídicas unidas entre sí por los enlaces que, en la mayoría de los casos, no son covalentes (Cheftel y col., 1989b).

La solubilidad de las proteínas en agua es mayor que en disolventes polares, propiedad típica de sustancias estabilizadas por fuerzas de atracción entre grupos de carga opuesta, como ocurre con los cristales de sales (Badui, 2006). Desde el punto de vista termodinámico, la solubilización corresponde a una disociación simultánea de las moléculas del disolvente y de las moléculas de proteínas, previa a una dispersión de estas últimas en el disolvente, con una superficie interfacial de máximo contacto entre la proteína y el disolvente. Por tanto, para que una proteína pueda solubilizarse será necesario que reaccione, en todo lo posible, con el disolvente (enlaces hidrógeno, interacciones dipolo-dipolo e iónicas). La solubilidad depende fundamentalmente del pH, fuerza iónica, tipo de disolvente y temperatura (Cheftel y col., 1989b).

Las proteínas globulares son capaces de adsorberse rápidamente en la interfase aceite-agua y formar espesas membranas viscoelásticas cercanas a sus puntos isoeléctricos, pero ellas no formarán emulsiones estables porque la repulsión electrostática entre los glóbulos es insuficiente para prevenir la agregación de éstos. Las membranas interfaciales formadas por proteínas son relativamente

delgadas y cargadas eléctricamente, por lo tanto el principal mecanismo preventivo de la floculación de glóbulos en emulsiones estabilizadas por proteínas es la repulsión electrostática. Consecuentemente, las emulsiones estabilizadas por proteínas son particularmente sensibles al pH y a los efectos de la fuerza iónica, y tienden a flocular en valores de pH cercanos al punto isoeléctrico de las proteínas adsorbidas y cuando la fuerza iónica excede ciertos niveles. Las emulsiones estabilizadas por proteínas globulares son también particularmente sensibles a tratamientos térmicos, porque estas proteínas se desdoblán cuando la temperatura excede un valor crítico exponiendo al reactivo no polar y grupos sulfhidrilo (McClements, 2005).

Las proteínas se adsorben en la interfase de la emulsión entre las gotitas de aceite disperso y la fase continua y aportan propiedades físicas y reológicas (espesamiento, viscosidad, elasticidad-rigidez) que determinan la resistencia de las gotitas a la coalescencia. Generalmente, las proteínas son estabilizantes mediocres de las emulsiones agua/aceite. Esto puede atribuirse a la naturaleza fundamentalmente hidrófila de la mayoría de las proteínas, lo que hace que la mayor parte de una molécula proteínica adsorbida se encuentre en la zona acuosa de la interfase. La característica más importante responsable de las propiedades emulsionantes de una proteína soluble, es su actitud a difundirse hacia la interfase aceite/agua y adsorberse (Cheftel y col., 1989b).

### 1.2.1 Proteínas lácteas

Se han empleado ingredientes proteínicos aislados de la leche bovina como emulsificantes en una extensa variedad de emulsiones-base en productos alimenticios, incluyendo bebidas, postres fríos, helados, suplementos

deportivos, formulas infantiles y aderezos. Las proteínas de la leche son de dos tipos: la caseína, en suspensión coloidal, y las del suero, principalmente la  $\beta$ -lactoglobulina y la  $\alpha$ -lactoalbúmina; la caseína constituye el 80% aproximadamente de las proteínas de la leche, y las disueltas en el suero el 20% restante, llamadas “proteínas solubles” (Primo, 1998). Las proteínas individualizadas pertenecen a seis grupos principales: 4 para las caseínas ( $\alpha_{s1}$ ,  $\alpha_{s2}$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$ ) y 2 para las proteínas solubles ( $\beta$ -lactoglobulina,  $\alpha$ -lactoalbúmina) (Cheftel y col., 1989b).

Una variedad de ingredientes de proteína de leche están disponibles para ser usados como emulsificantes en alimentos, incluyendo leche entera, proteínas de suero, y caseínas. Estos ingredientes se encuentran usualmente en forma de polvo, el cual, tiene una apariencia de crema de color clara a blanco y tiene un sabor suave. Estos polvos están normalmente disponibles en la forma de proteínas concentradas (25-80% proteína) o proteínas aisladas (>90% proteína) (McClements, 2005).

#### 1.2.1.1 Caseinato de sodio

El caseinato de sodio es una mezcla de cuatro caseínas ( $\alpha_{s1}$ ,  $\alpha_{s2}$ ,  $\beta$  y  $\kappa$ ), constituye el 90% de la masa de la caseína micelar de la leche de vaca y casi el 80% del total de proteína de la leche (Hemar y col., 2001; Friberg y Larsson, 1997). La habilidad de las caseínas para actuar como modificadores de textura es determinada principalmente por la habilidad de las moléculas de caseína de asociarse unas con otras bajo adecuadas condiciones (Friberg y Larsson, 1997). Todas las caseínas individuales, excepto k-caseínas, muestran una fuerte tendencia a adsorber las interfaces (aire-agua y agua-aceite), y por



lo tanto, su uso es importante en la fabricación de emulsiones estables (por ejemplo, helados, licores, crema batida, blanqueadores de café, productos para la nutrición infantil, etcétera), donde la estabilidad de las mismas a largo plazo es esencial. Las propiedades espumantes y emulsificantes de los caseinatos se derivan de las estructuras de las cuatro caseínas. En las espumas y emulsiones elaboradas de caseinato, las caseínas individuales parecen ser adsorbidas en la interfase líquida en proporción a su incorporación en la solución (Carrera y Rodríguez, 2005). Las caseinas tienen muchos grupos polares agrupados (Friberg y Larsson, 1997) y fracciones significantes de grupos no polares a lo largo de su cadena polipeptídica, lo cual favorece su auto-asociación a través de interacciones hidrofóbicas (Cheftel y col., 1989b).

En general, la auto-asociación de caseínas está influenciada por las interacciones electrostáticas entre las moléculas y son sensibles al pH y fuerza iónica. Las moléculas de caseína pueden formar agregados para dar origen a soluciones viscosas o geles (McClements, 2005).

Una serie de estudios recientes (Dickinson & Holding, 1997; Euston & Hirst, 1999; Srinivasan, Singh, & Munro, 2000) han demostrado que cuando la concentración de proteína en una emulsión al 30% (p/p) es estabilizada con caseinato de sodio por encima de 2%, sufre un rápido cremado. Este efecto se ha atribuido al agotamiento de los glóbulos de aceite, debido a la presencia del caseinato que no fue adsorbido en la fase acuosa. Caseinato al 1% es la concentración requerida para cubrir completamente la superficie, las emulsiones elaboradas a esta concentración generalmente muestran buena estabilidad en contra del cremado (Hemar y col., 2001).

A pesar de la excelente estabilidad a la coalescencia sobre cierta concentración crítica de proteína, las emulsiones con base de caseinato, pueden mostrar cremado pronunciado o separación de suero, debido al agotamiento inducido por el exceso de proteína sin adsorber en la fase continua (Moschakis y col., 2005).

#### 1.2.1.2 Proteína de suero lácteo

El suero contiene más de la mitad de los sólidos presentes en la leche, incluyendo 20% de la proteína y la mayoría de la lactosa, minerales y vitaminas solubles en agua. (Charalambous y Doxastakis, 1989). Los principales constituyentes de esta proteína son  $\beta$ -lactoglobulina y  $\alpha$ -lactoalbúmina; contienen puentes disulfuro y grupos funcionales tiol los cuales pueden eliminar los radicales libres para inhibir la oxidación de los lípidos (Sun y col., 2007). Son muy sensibles a las temperaturas altas y en menor grado al pH ácido, debido a que están muy hidratadas y no tienen tanta carga eléctrica externa. Contienen la mayoría de los aminoácidos y presentan un mejor balance de éstos que las propias caseínas, por lo que su valor nutritivo es superior (Badui, 2006).

La  $\beta$ -lactoglobulina ejerce una influencia decisiva en la estabilidad térmica de los productos lácteos. Suma aproximadamente 45% del total de las proteínas del suero y existe como dímero unido no covalentemente, en el pH normal de la leche; los cambios de pH provocan que se convierta en dos monómeros mediante una reacción reversible. Al igual que con otras proteínas globulares, sus aminoácidos hidrófilos y los ionizables se encuentran distribuidos de manera homogénea provocando que los apolares (tirosina, triptófano, leucina,

fenilalanina, etcétera), establezcan una alta hidrofobicidad en el centro de la molécula; esta característica hace que se hidrate fuertemente en el exterior y que no se puedan unir entre ellas en forma hidrófoba (Cheftel y col., 1989b).

La  $\alpha$ -lactoalbúmina es por orden de importancia, la segunda proteína del suero y tiene actividad biológica, ya que es parte constitutiva del sistema enzimático requerido para la síntesis de la lactosa. No tiene grupos sulfhidrilo libres, pero sí cuatro disulfuros provenientes de cistinas, lo que la hace tener 2.5 veces más azufre que las caseínas. Entre sus características se cuentan su bajo peso molecular, su alto contenido de triptófano y una secuencia de aminoácidos bastante parecida a la lisozima del huevo (Badui, 2006).

Estas proteínas son compactas, globulares, con un peso molecular que varía entre  $1.4 \times 10^4$  y  $1.0 \times 10^6$  daltons, son solubles en un intervalo de pH muy amplio (incluso a pH ácidos, siempre y cuando no se hayan desnaturalizado por el calor) y son de superficie activa y pueden ser adsorbidas en la superficie de los glóbulos de aceite en forma de monocapa (Badui, 2006; Sun y col., 2007).

### **1.3 Emulsiones**

Una emulsión es una mezcla de dos o más líquidos inmiscibles, uno está presente en el otro en forma de glóbulos. En cualquier emulsión, es importante tener en cuenta que los glóbulos suspendidos son referidos a la fase dispersa mientras que el medio en el cual están suspendidos es la fase continua (Charalambous y Doxastakis, 1989). La fase dispersa se obtiene al romper uno de los líquidos por medios mecánicos en pequeños glóbulos, entre 0.1 y 10

$\mu\text{m}$ , que se distribuyen en la fase continua o dispersante (Badui, 2006). Es posible formar una emulsión homogeneizando aceite y agua puros, pero las dos fases se separan rápidamente ya que tienden a romperse con el tiempo a fin de minimizar el área interfacial entre la fase acuosa y la fase de aceite (Novales y col., 2003), dentro de un sistema que al final de la separación, el sistema consiste de una capa de aceite (baja densidad) en la parte superior y una capa de agua (alta densidad) en la parte inferior; esto debido a que los glóbulos tienden a coalescer con glóbulos cercanos cuando colisionan unos con otros, ya que el contacto entre las moléculas de aceite y agua es energéticamente desfavorable (McClements, 2005). Así que esta emulsión es termodinámicamente inestable y al dejarla reposar por algún tiempo, los glóbulos se agregan pasando primero por la floculación para luego producir la coalescencia y, por último, la separación de dos fases inmiscibles y diferenciables (Carrera y Rodríguez, 2005; Badui, 2006 y Pizzino y col., 2009). Sin embargo, las emulsiones se pueden hacer cinéticamente estables mediante la adición de emulsificantes o agentes espesantes superando la energía de activación del sistema (Sun y col, 2007; Sun y Gunasekaran, 2009).

Las emulsiones se pueden clasificar convenientemente de acuerdo a la distribución de las fases de aceite y agua (McKenna, 2003; Novales y col., 2003):

- 1.- Emulsiones aceite en agua consisten en pequeños glóbulos de aceite como fase dispersa contenidas en el agua como fase continua o dispersante (mayonesa, leche, crema, sopas y salsas) (Figura 1.3).
- 2.- Emulsiones agua en aceite donde los glóbulos pequeños de agua se encuentran dispersos en una fase continua de aceite (margarinas y

mantequillas).

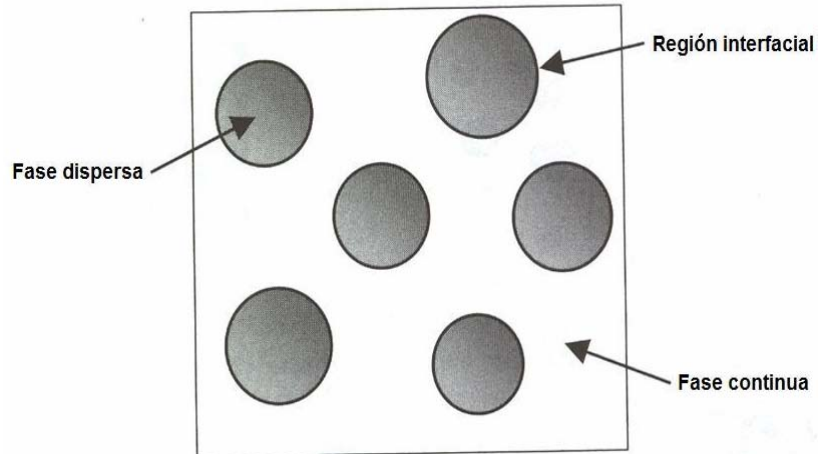


Figura 1.3. Representación esquemática de una emulsión aceite en agua (McKenna, 2003).

Las emulsiones aceite en agua son generalmente blancas y cremosas, mientras que las emulsiones agua en aceite son más oscuras y grasosas (Charalambous y Doxastakis, 1989). Las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de una emulsión alimentaria en particular dependen del tipo y concentración de ingredientes que ésta contenga, así como el método usado para crearla (McClements, 2005).

### 1.3.1 Solvatación del biopolímero

Antes de realizar la emulsión, es necesario dispersar los ingredientes considerando que los solubles en agua como proteínas, polisacáridos, azúcares, sales, vitaminas, colores, antioxidantes y surfactantes, son usualmente mezclados con el agua y los ingredientes solubles en aceite, como vitaminas, colores, antioxidantes y surfactantes, son usualmente mezclados con él. La intensidad y duración del proceso de mezclado depende del tiempo

requerido para solvatar y distribuir uniformemente los ingredientes. Una solvatación adecuada es importante para la funcionalidad de los componentes alimenticios (las propiedades emulsificantes de proteínas son usualmente mejoradas, al permitirles hidratarse en agua por unos minutos u horas antes de la homogeneización) (McClements, 2005).

Los biopolímeros deben dispersarse completamente y disolverse en la solución acuosa antes de que sean capaces de exhibir sus propiedades emulsificantes, este proceso normalmente implica un número de etapas, incluyendo dispersión, remojo, hinchamiento y disolución. La efectividad y velocidad de disolución depende de varios factores, incluyendo la naturaleza del ingrediente (líquido, polvo o granulado), tipo y conformación del biopolímero, pH, fuerza iónica, temperatura y composición de la fase acuosa, así como la aplicación de esfuerzos de cizalla. Después de que los componentes del biopolímero han sido adecuadamente disueltos en la fase acuosa es importante asegurar que la solución y las condiciones ambientales (pH, fuerza iónica, temperatura y composición del solvente) no promuevan la agregación de los glóbulos durante la homogeneización o después de formada la emulsión (McClements, 2005).

### 1.3.2 Homogeneización

La formación de una emulsión puede implicar un número de pasos consecutivos, dependiendo de la naturaleza del material de partida y el método usado para crearla. La homogeneización es el proceso para convertir dos líquidos inmiscibles en una emulsión y se lleva a cabo con un dispositivo llamado homogeneizador. Para crear una emulsión, es necesario suministrar

energía a fin de interrumpir y entremezclar las fases de aceite y agua, los cuales son usualmente alcanzados por agitación mecánica (McClements, 2005). Se ha observado que si la fase continua se adiciona gradualmente, en lugar de toda a la vez, el tiempo requerido para formar la emulsión será menor (Badui, 2006).

La creación de un tipo particular de emulsiones alimentarias puede involucrar el uso de uno u otro de los tipos de homogeneización, como se muestra en la Figura 1.4 (McClements, 2005):

- 1.- Homogeneización primaria, la creación de una emulsión directamente de dos líquidos inmiscibles.
- 2.- Homogeneización secundaria, es la reducción en el tamaño de los glóbulos en una emulsión.

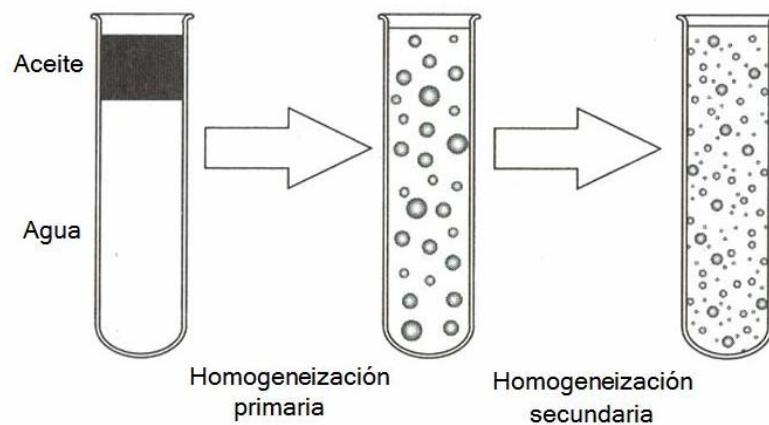


Figura 1.4. Tipos de homogeneización (McClements, 2005).

Los glóbulos de aceite formados durante la aplicación de agitación mecánica están constantemente en movimiento y frecuentemente chocan y coalescen

con los glóbulos cercanos. Si este proceso continúa, los grandes glóbulos formados se mueven hacia la superficie del recipiente debido a la gravedad y se mezclan para formar una capa separada. Como consecuencia, el sistema vuelve a su estado inicial. Las fuerzas termodinámicas conductoras para este proceso son de efecto hidrofóbico, las cuales favorecen la minimización del área de contacto entre el aceite y el agua, y la gravedad, la cual favorece el movimiento hacia arriba del aceite (McClements, 2005).

El tamaño de los glóbulos producidos durante la homogeneización depende de dos procesos (McClements, 2005):

- 1.- La generación inicial de glóbulos de tamaño pequeño.
- 2.- La rápida estabilización de estos glóbulos contra la coalescencia una vez que éstos son formados.

### 1.3.3 Distribución de ingredientes en emulsiones

De acuerdo a lo reportado por McClements (2005) y Leal-Calderón y col. (2007), la mayoría de las emulsiones alimentarias convenientemente pueden considerarse que consisten de tres fases las cuales tienen diferentes propiedades fisicoquímicas: la fase dispersa, la fase continua, y la interfase. La interfase se puede componer de proteínas o de pequeños emulsificantes como monoglicéridos, fosfolípidos, ácidos grasos o mezclas de estas moléculas en la superficie activa. La fase acuosa puede contener iones y biomoléculas tales como polisacáridos o proteínas, las cuales pueden ejercer efectos estabilizadores o desestabilizadores. Las moléculas en una emulsión se distribuyen ellas mismas en medio de estas tres regiones de acuerdo a su concentración y polaridad. Las moléculas no polares tienden a localizarse



principalmente en la fase de aceite, las moléculas polares en la fase acuosa, y las moléculas anfifílicas sobre la interfase. Esto debe notarse aún en el equilibrio, esto es un cambio continuo de moléculas entre las diferentes regiones el cual ocurre a una velocidad que depende del transporte de masa de las moléculas a través del sistema. Las moléculas pueden también moverse de una región a otra cuando hay algunas alteraciones en las condiciones en el medio de una emulsión (por ejemplo, el cambio en la temperatura). La posición y el transporte de masa de las moléculas dentro de una emulsión tienen una influencia significativa en el aroma, sabor, textura, y estabilidad fisicoquímica de productos alimenticios.

#### 1.3.4 Ingredientes de las emulsiones

McClements (2005) reporta que las emulsiones contienen una gran variedad de constituyentes, por ejemplo, aceite, emulsificantes, agentes espesantes, conservadores, antioxidantes, colorantes, saborizantes, entre otros. Cada uno de estos constituyentes tiene su propia característica molecular y funcional. Las características fisicoquímicas y sensoriales de los productos dependen del tipo de constituyente presente, de su localización física y su interacción con los otros ingredientes.

#### Grasas y aceites

Las grasas y aceites son parte de un grupo conocido como lípidos. Por definición, los lípidos son solubles en solventes orgánicos pero insolubles o parcialmente solubles en agua. Contiene un gran número de diferentes tipos de moléculas, incluyendo acilglicéridos, ácidos grasos y fosfolípidos. Los triglicéridos son los lípidos más comunes en alimentos y este tipo de molécula

es usualmente referida como grasa o aceite. El sabor percibido en las emulsiones es fuertemente influido por el tipo y concentración del lípido presente.

La apariencia característica y la reología de las emulsiones es en gran parte el resultado de la inmiscibilidad del aceite y el agua, ya que esto conduce en un sistema a que los glóbulos de una fase se dispersen en la otra. Las emulsiones alimenticias usualmente parecen turbias y opacas por que el paso de la luz a través de ellas se dispersa por los glóbulos. La intensidad de la dispersión de la luz depende de la concentración de los glóbulos presentes, de este modo tanto el color y opacidad de las emulsiones es fuertemente influido por su contenido de grasa.

### Agua

El agua juega un papel importante en la determinación de la mayor parte de las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de las emulsiones alimenticias. Sus propiedades moleculares y estructurales en gran medida determinan la solubilidad, conformación e interacciones con otros componentes presentes en las soluciones acuosas. Por lo tanto, es crucial para la ciencia de los alimentos entender la contribución que el agua hace a todas las propiedades de las emulsiones alimenticias.

### Emulsificantes

Los emulsificantes, también se conocen como agentes de superficie activa, o surfactantes (Charalambous y Doxastakis, 1989). Son agentes anfílicos constituidos por dos fracciones diferentes: una parte hidrófila que se solubiliza

en agua, y otra hidrófoba o lipófila, que lo hace mejor en los lípidos (Badui, 2006), forman una capa protectora que evita la agregación de los glóbulos (McKenna, 2003), son los componentes interfaciales que son usados para aumentar la estabilidad de la emulsión, ayudan a estabilizar la emulsión disminuyendo la tensión interfacial entre el agua y el otro líquido. Este cambio en la tensión interfacial puede causar la formación de una barrera física alrededor de cada glóbulo para impedir la coalescencia (Charalambous y Doxastakis, 1989).

Hay dos tipos de agentes emulsificantes utilizados en alimentos, los de bajo peso molecular como fosfolípidos (lecitina), digliceridos, sorbitán monoestereato, polioxyetileno de sorbitán monoestereato, etcétera y los de alto peso molecular como las proteínas y ciertas gomas. A concentraciones similares (peso/volumen), los surfactantes de bajo peso molecular disminuyen la tensión superficial en mayor grado que los surfactantes macromoleculares, esta diferencia se debe principalmente a la diferencia en orientación y configuración de estos surfactantes en la interfase. En el caso de los surfactantes de bajo peso molecular todas las moléculas se adsorben e instantáneamente se orientan a sí mismas, así que la cabeza del grupo hidrofílico se sumerge en la fase acuosa y la cadena de carbono lipofílica se sumerge en la fase no polar (Damodaran y Paraf, 1997).

Esta división de las moléculas entre las dos fases facilita una máxima reducción de la tensión superficial (McKenna, 2003). Su eficacia está ligada a su solubilidad en cada fase, y para ejercer una mejor acción debe ser más soluble en la fase continua (Badui, 2006). Estos emulsificantes varían

ampliamente en su habilidad de formar y estabilizar emulsiones dependiendo de sus características fisicoquímicas y moleculares (McClements, 2005).

En ocasiones, los emulsionantes se emplean conjuntamente con hidrocoloides como gomas, pectinas, proteínas y derivados celulósicos que estabilizan las emulsiones aceite en agua; estos polímeros incrementan la viscosidad de la fase acuosa continua y además forman películas alrededor de los glóbulos de aceite, mejorando la estabilidad de las emulsiones (Badui, 2006).

### Agentes espesantes

La función primordial de los agentes espesantes en emulsiones de alimentos es incrementar la viscosidad de la fase acuosa de emulsiones aceite en agua. Esta viscosidad mejorada modifica la textura y la palatabilidad de los productos alimenticios (espesamiento), así como la reducción de la velocidad a la cual las partículas sedimentan o creman (estabilización). Los agentes espesantes son usualmente vendidos como polvos o granulares de forma individual o en mezcla con otros tipos de biopolímeros. Los biopolímeros encontrados en agentes espesantes usualmente existen como una molécula altamente hidratada y extendida o en agregados moleculares en fase acuosa (McClements, 2005).

Su habilidad de incrementar la viscosidad de soluciones, depende principalmente de su peso molecular, grado de ramificación, conformación, y flexibilidad (McClements, 2005).

### 1.3.5 Estabilidad de emulsiones

El término “estabilidad de emulsiones” se refiere a la capacidad de una emulsión a resistir cambios en sus propiedades con el tiempo: mientras más estable sea la emulsión, más lentamente cambiarán sus propiedades. Una emulsión puede volverse inestable debido a un número de diferentes tipos de procesos físicos y químicos. La inestabilidad física resulta en una alteración en la distribución espacial u organización estructural de las moléculas, debido a que la inestabilidad química resulta en una alteración en la estructura química de las moléculas (McClements, 2005).

El cremado, floculación, coalescencia, coalescencia parcial, inversión de fases, son ejemplos de inestabilidad física (Figura 1.5). En la práctica dos o más de estos mecanismos pueden estar presentes. Esto es, por lo tanto, importante para la ciencia de los alimentos para identificar la importancia relativa de cada mecanismo, la relación entre ellos y los factores que influyen en ellos, así que estos medios efectivos para controlar la estabilidad y propiedades fisicoquímicas de emulsiones pueden ser establecidas (McClements, 2005).

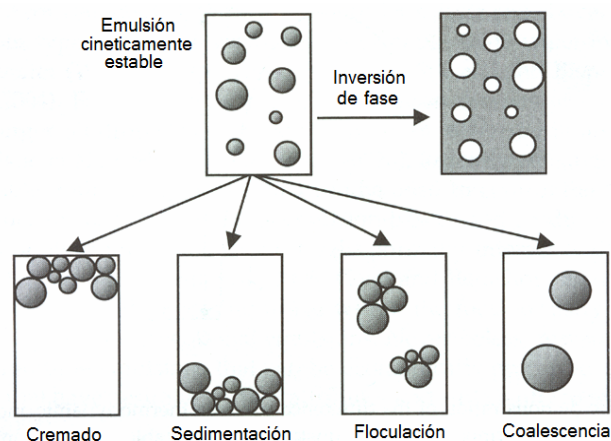


Figura 1.5. Mecanismos fisicoquímicos de inestabilidad de las emulsiones alimenticias (McClements, 2005).

La duración de tiempo que una emulsión debe permanecer estable depende de la naturaleza del producto alimenticio. Algunas emulsiones alimenticias son formadas como pasos intermedios durante el proceso de manufacturación y por lo tanto, sólo necesitan permanecer estables por unos segundos, minutos u horas, mientras otras deben permanecer estables por días, meses o incluso años antes de su consumo. Por otro lado, la producción de algunos alimentos involucra una desestabilización controlada de una emulsión durante su proceso de manufactura (McClements, 2005).

La velocidad a la que una emulsión se rompe, y el mecanismo por el cual este proceso ocurre, depende de su composición y microestructura, así como de las condiciones del medio ambiente a las que ésta esté expuesta durante su tiempo de vida (variaciones de temperatura, agitación mecánica y condiciones de almacenamiento) (McClements, 2005) y de diferentes factores físicos y químicos (distribución de tamaño de glóbulo, viscosidad de la fase continua, volumen de fase dispersa, temperatura, fuerza iónica, pH) y de la clase de emulsionante usado para estabilizar la película interfacial entre la fase continua y la fase dispersa (Novales y col., 2003).

Teniendo en cuenta la estabilidad de una emulsión, es extremadamente importante distinguir entre su estabilidad termodinámica y su estabilidad cinética. La termodinámica predice si un proceso determinado se producirá o no, mientras que la cinética predice la velocidad a la cual éste se desarrollará si es que ocurre (McClements, 2005). Todas las emulsiones alimenticias son termodinámicamente sistemas inestables y finalmente se romperán si se les deja el tiempo suficiente (McClements, 2005; Carrera y Rodríguez, 2005).

La estabilidad de un sistema disperso se caracteriza por el comportamiento constante en el tiempo de sus parámetros base, es decir, la dispersión y la distribución de la fase dispersa en el medio. El problema de la estabilidad es uno de los más importantes y complicados de la química de coloides. A pesar de su inestabilidad termodinámica, muchas emulsiones son cinéticamente estables y sin cambios apreciables por un periodo prolongado de tiempo (algunas veces por décadas). Estos sistemas existen en el estado metaestable, esto es, la barrera potencial que previene la agregación de las partículas es suficientemente alta (Sjöblom, 2006). Para entender las razones de su relativa estabilidad, es necesario primero determinar la estabilidad y mecanismos de desestabilización. La estabilidad de sedimentación se distingue de la estabilidad de la fase dispersa con respecto a la fuerza de gravedad (Sjöblom, 2006). La separación de fase debida a la sedimentación es un fenómeno típico de los glóbulos grandes dispersos en emulsiones resultantes en la solución (o flotante) de los glóbulos.

#### Mecanismos de inestabilidad de emulsiones

La inestabilidad de emulsiones es un proceso complejo que involucra varios mecanismos diferentes (Figura 1.6), contribuyendo a la transformación de una emulsión dispersa de manera uniforme a un sistema de fases separadas totalmente (Friberg y Larsson, 1997; Novales y col., 2003).

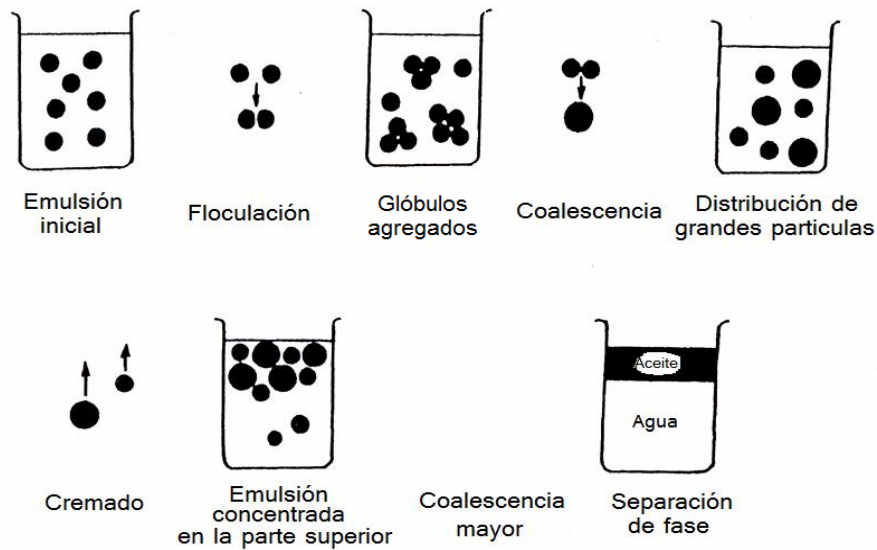


Figura 1.6. Etapas de los mecanismos de inestabilidad en emulsiones (Sjöblom, 2006).

Los glóbulos de la emulsión (la fase dispersa) están en continuo movimiento en una emulsión y chocan unos con otros frecuentemente. Después del choque, los glóbulos pueden separarse otra vez (emulsión estable), pueden pegarse unos con otros con una delgada película entre ellos (floculación) que puede producir cremado, o pueden unirse a un gran glóbulo (coalescencia) (Friberg y Larsson, 1997). Consecuentemente, con agitación suave, la emulsión es restaurada.

La floculación y coalescencia son dos tipos de agregación de glóbulos (Charalambous y Doxastakis, 1989). En la floculación, los glóbulos dispersos se agregan, o se juntan formando agrupaciones, aún conservan su identidad. Toma lugar cuando la energía cinética liberada durante las colisiones atrae a los glóbulos por encima de la barrera de la fuerza repulsiva dentro de una región donde las fuerzas atractivas operan y causan que los glóbulos se unan unos con otros. Como en el caso de cremado, una agitación muy ligera puede



fácilmente redispersar estas agrupaciones. En la coalescencia, la cual es irreversible, los glóbulos de una agrupación se unen y pierden su identidad, para formar grandes glóbulos. Además, la coalescencia requiere que la película interfacial se vuelva muy delgada para que se rompa. En consecuencia, la emulsión está completamente rota (Charalambous y Doxastakis, 1989).

En general, los glóbulos en una emulsión tienen diferente densidad a la del líquido que los rodea, y así una red de fuerza gravitacional actúa sobre ellos. Si los glóbulos tienen una menor densidad que el líquido que los rodea, ellos tienden a moverse hacia arriba, lo cual se conoce como cremado. A la inversa, si ellos tienen una mayor densidad que el líquido que los rodea, tienden a moverse hacia abajo, lo cual se conoce como sedimentación (McKenna, 2003; Novales y col., 2003). La densidad de muchos aceites comestibles (en su estado líquido) es más baja que la del agua, y es por esto que el aceite tiende a acumularse en la parte de arriba de la emulsión y el agua en la parte de abajo (McClements, 2005).

Se considera usualmente que el cremado (Figura 1.7) tiene efectos adversos en la calidad de las emulsiones alimenticias. Los atributos texturales de un producto son también afectados negativamente por el cremado, debido a que la capa rica en glóbulos tiende a ser más viscosa de lo que se espera. Es también un problema, debido a que entra en un estrecho contacto durante periodos prolongados, lo cual puede conducir a una mayor floculación o coalescencia (McClements, 2005).

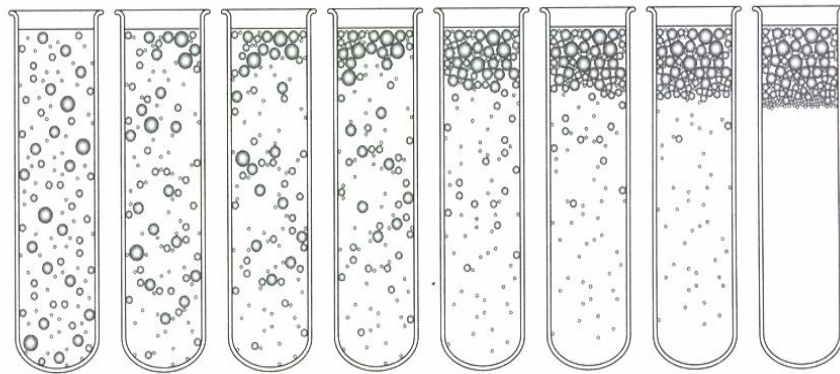


Figura 1.7. Representación esquemática del cremado (McClements, 2005).

Otro fenómeno de inestabilidad es la inversión de fases, el cual se muestra en la Figura 1.8. Es el proceso de acuerdo con el cual una emulsión aceite en agua se convierte a una emulsión agua en aceite o viceversa (McKenna, 2003).

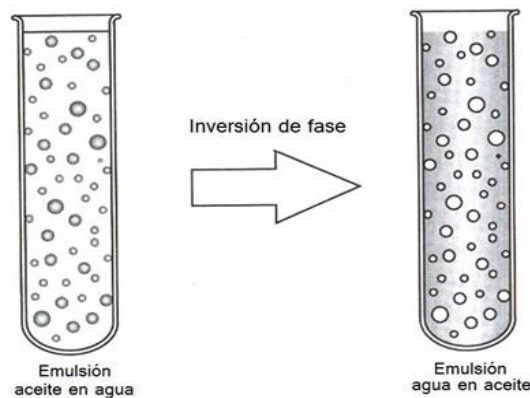


Figura 1.8. Inversión de fase (McClements, 2005).

### 1.3.6 Migración de partículas

La distribución del tamaño de los glóbulos se puede medir por microscopio, barrido microscópico con luz, pulsos eléctricos o métodos ultrasónicos. Las propiedades reológicas de la fase continua se pueden caracterizar usando varios tipos de viscosímetros y reómetros. En principio, es posible predecir la estabilidad a largo plazo de una emulsión alimenticia y esto es conocido por

sus propiedades fisicoquímicas y su adecuado modelo matemático. En la práctica, este método tiene un uso limitado porque los modelos matemáticos actuales no son suficientemente sofisticados para poner en cuenta la complejidad de las emulsiones alimenticias. Por esta razón, es más apropiado medir directamente la separación gravitacional de los glóbulos en una emulsión.

### 1.3.7 Dispersión de luz

El método más sofisticado de monitorear la separación gravitacional es usar un barrido con luz (McClements, 2005). El cabezal detector se mueve hacia arriba y hacia abajo a lo largo de un tubo de vidrio cilíndrico vertical de fondo plano, está compuesto de un pulso cercano a una fuente de luz infrarroja (longitud de onda  $\lambda = 850$  nm) y dos detectores sincrónicos de transmisión y retrodispersión, que miden la luz en la dirección incidente (intensidad transmitida) como se muestra en la Figura 1.9 (Mengual y col., 1999; Lemarchand y col., 2003; Carrera y Rodríguez, 2005). Establece medidas de porcentaje de luz transmitida y retrodispersada por la emulsión en función de su altura (Maldonado y col., 2008).

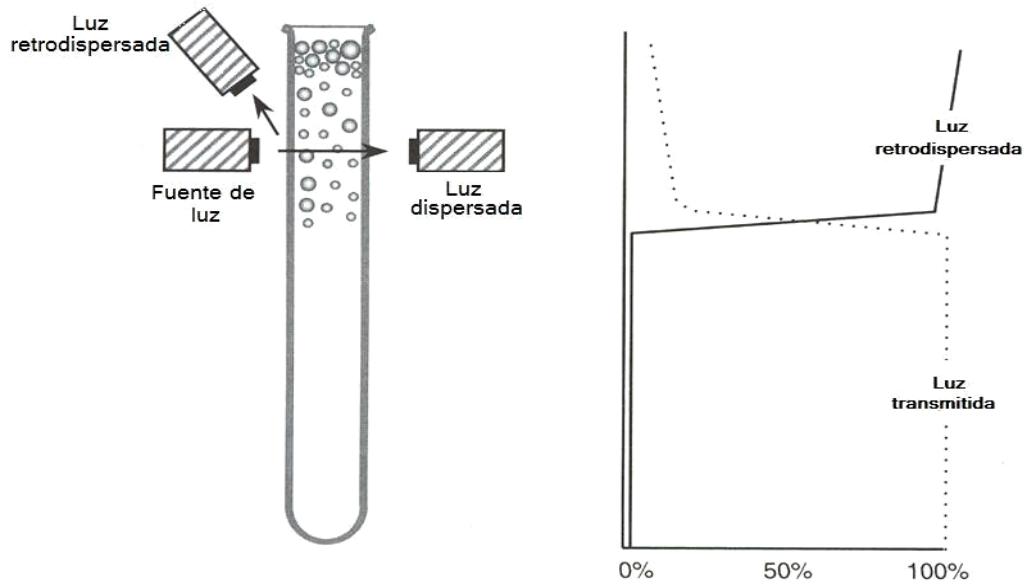


Figura 1.9. Dispersión de luz para monitorear la separación gravitacional (McClements, 2005).

El software del microprocesador integrado controla la adquisición de datos, la conversión análoga a digital, almacenamiento de datos, el control del motor y el diálogo con el equipo (Mengual y col., 1999). El tubo de vidrio es barrido en forma vertical por el cabezal detector, pero en el software del instrumento se genera un reporte en el cual el tubo que contiene la muestra se visualiza en modo horizontal (Figura 1.10) y se divide en dos gráficos, en la parte superior se visualiza la transmisión y en la parte inferior la retrodispersión de luz.

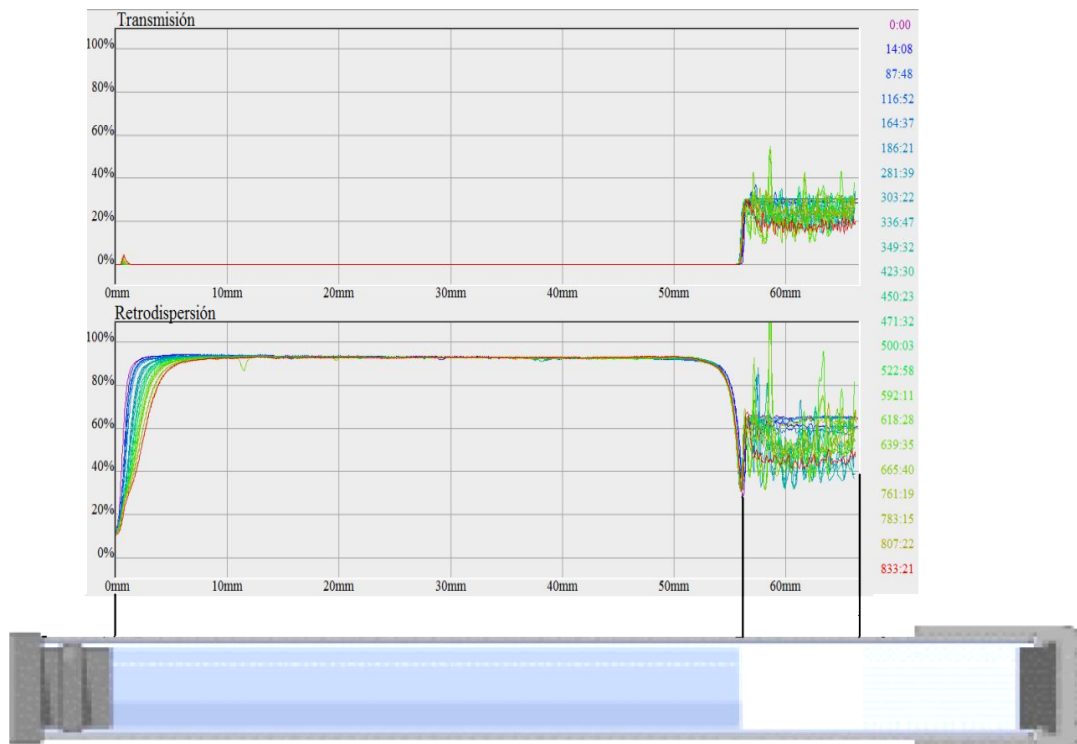


Figura 1.10. Visualización de un barrido del reporte generado por el software del Analizador Turbiscan MA 2000.

La variación en la concentración de los glóbulos con respecto a la altura de la emulsión se puede deducir a partir del porcentaje de luz transmitida o retrodispersa en función de la altura de la muestra, en mm mediante la interpretación de las curvas obtenidas. Esta técnica se puede usar para medir el tamaño y la concentración de los glóbulos a cualquier altura mediante la dependencia angular de la intensidad de la luz retrodispersa (Tippetts y Martini, 2009; McClements, 2005; Mengual y col., 1999). La adquisición a lo largo de la muestra se repite obteniendo una superposición de las impresiones dactilares de la muestra, las cuales caracterizan la estabilidad o inestabilidad de la misma (es decir, la más idéntica a las lecturas, la más estable del sistema, entre otras) (Tippetts y Martini, 2009; Wulff y col., 2009).

Se ha incrementado el uso de esta técnica para caracterizar la separación gravitacional en las emulsiones alimenticias debido al hecho de que son instrumentos analíticos totalmente automatizados y están disponibles comercialmente. Las principales desventajas de esta técnica son: que no es adecuado para monitorear la separación gravitacional en algunas emulsiones concentradas y la dificultad para determinar precisamente el perfil completo de la concentración de glóbulos respecto a una altura de la emulsión (McClements, 2005).

#### **1.4 Reología de emulsiones**

Reología es el estudio de la manera en la cual los materiales responden a una tensión o esfuerzo aplicados, en donde generalmente se deforman o fluyen. Todos los materiales tienen propiedades reológicas (Steffe, 1996).

La reología puede auxiliar a la industria de alimentos, a través del estudio de la deformación y flujo de materias primas, productos intermedios y finales. Además una serie de operaciones para el procesamiento de alimentos dependen en gran medida de las propiedades reológicas del producto en la etapa intermedia del proceso de manufactura, y esto a su vez tiene un gran efecto en las cualidades del producto terminado (Bourne, 1982). También puede ayudar en la explicación de la estructura y la evaluación de la estabilidad durante el almacenamiento. Por lo tanto, existen varias áreas donde los resultados reológicos son imprescindibles para la industria de los alimentos incluyendo: diseño de plantas, selección de bombas y tuberías, control de calidad y evaluación sensorial (McKenna, 2003).

Las propiedades reológicas de un material son establecidas por un análisis entre la relación del esfuerzo aplicado y el flujo resultante o deformación. La vida útil de muchas emulsiones de alimentos depende de las características reológicas de los componentes de las fases (McClements, 2005). Por ejemplo, la eficiencia del rompimiento de los glóbulos en un homogeneizador depende de la viscosidad de los componentes individuales. Las emulsiones de alimentos en estructura y composición son materiales complejos que pueden presentarse en un amplio intervalo de diferentes comportamientos reológicos, desde un fluido de baja viscosidad (leche y jugos de frutas), geles viscoelásticos (yogurt y postres) y sólidos (margarina y mantequilla refrigeradas) (McClements, 2005).

#### Esfuerzo de cizalla

Es el componente de esfuerzo aplicado tangencialmente al plano en que actúa la fuerza. Es expresado en unidades de fuerza por unidad de área. Es un vector de fuerza que posee magnitud y dirección (Bourne, 1982).

#### Velocidad de cizalla

Es el gradiente de velocidad establecido en un espesor definido en un fluido como resultado de la aplicación de un esfuerzo de corte. Se expresa en unidades recíproco de segundo (1/s) (Bourne, 1982).

#### 1.4.1 Tipos de comportamiento viscoso

En la Figura 1.11 se esquematiza la clasificación de los fluidos:

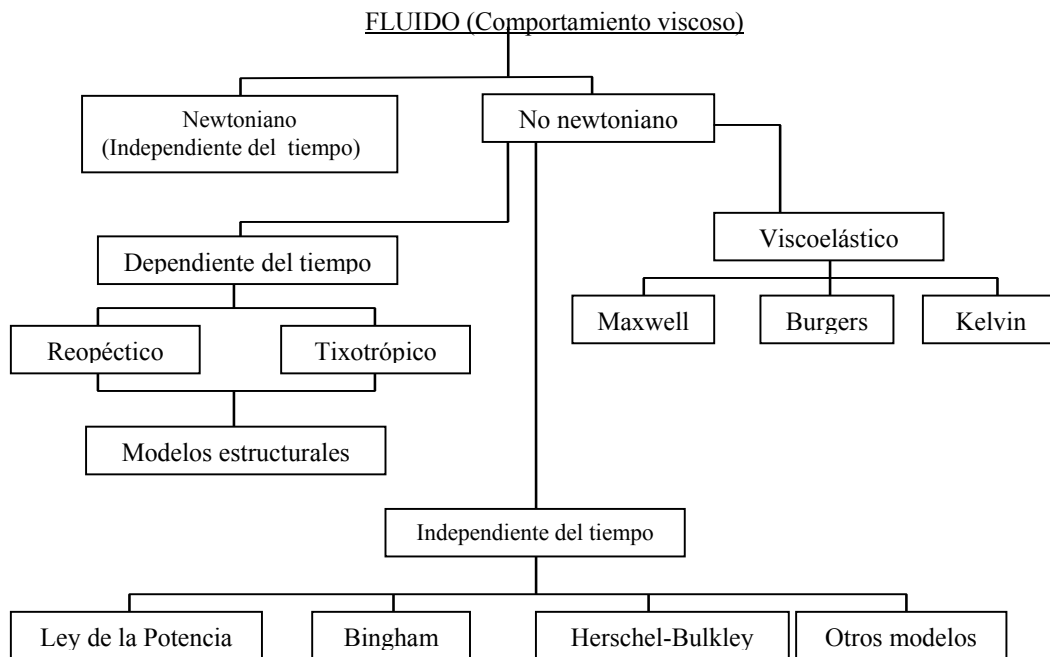


Figura 1.11. Clasificación simple del comportamiento reológico (Steffe, 1996).

### Fluido newtoniano

Es el fluido en el que la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) es directamente proporcional al esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) y la viscosidad ( $\eta$ ) es dependiente de la velocidad de cizalla dentro del intervalo de flujo laminar. La curva de esfuerzo de cizalla y velocidad de cizalla parte del origen y la viscosidad está dada por la pendiente. Un fluido newtoniano posee las propiedades más simples de flujo. Las características de este tipo de fluido son adecuadamente descritas en la ecuación (Bourne, 1982):

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

La viscosidad se mantiene constante con el cambio de velocidad de cizalla y



durante un periodo de tiempo (Bourne, 1982). El concepto de viscosidad es la resistencia friccional que un fluido en movimiento opone a un esfuerzo de cizalla. Puede ser comprendido considerando a un líquido que está contenido entre dos placas paralelas, la placa inferior se encuentra en reposo, mientras que la placa superior se mueve en la dirección  $x$  con una velocidad constante  $v$ . Se asume que el líquido contenido entre las placas consiste en una serie infinitesimal de capas delgadas. Las capas en contacto directo con la placa inferior tienden a tener una velocidad igual a cero (Cheftel y col., 1989a).

Cuando un esfuerzo de cizalla se aplica a un líquido ideal, éste continúa fluyendo conforme el esfuerzo se aplica. Una vez que el esfuerzo aplicado se remueve, el líquido continúa fluyendo hasta que la energía cinética almacenada se disipa como calor y fricción. En este caso, no hay recuperación elástica del material una vez que el esfuerzo aplicado se retira, esto es, no regresa a su forma original. La viscosidad de un líquido es una medición de la resistencia que opone al flujo: entre mayor es la viscosidad, mayor será la resistencia. En el fluido ideal viscoso el esfuerzo de cizalla es proporcional a la velocidad (McClements, 2005). Un fluido newtoniano posee las propiedades más simples de flujo (Bourne, 1982).

### Fluidos no newtonianos

Muchos de los fluidos y semifluidos en alimentos caen dentro de alguna de las clases de fluidos no newtonianos (Bourne, 1982). La viscosidad ( $\eta$ ) del líquido depende de la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ), del tiempo en el cual el esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) se está aplicando, o el fluido puede exhibir propiedades tanto elásticas como viscosas (McClements, 2005). La viscosidad aparente define la

viscosidad de un fluido no newtoniano, la cual disminuye cuando incrementa la velocidad de cizalla (Bourne, 1982).

- Independientes del tiempo
  - Plástico (Bingham). Un mínimo esfuerzo de cizalla conocido como esfuerzo inicial ( $\sigma_0$ ) se debe exceder antes de que comience el flujo, después fluye con un comportamiento newtoniano (Steffe, 1996).

$$\sigma = \sigma_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (2)$$

- Adelgazante a la cizalla (fluidificante o pseudoplástico). En este tipo de fluido incrementando el esfuerzo de cizalla ( $\sigma$ ) se obtiene un incremento en la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) y la viscosidad ( $\eta$ ) descende, pero la curva comienza en el origen (Bourne, 1982; Lapasin y Pricl, 1999). La viscosidad aparente de estos fluidos depende de la velocidad de cizalla, en donde por lo general, la viscosidad aparente disminuye cuando esta última aumenta (Bourne, 1982). Se puede representar por una función potencial (Steffe, 1996):

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

donde  $n$  es el índice de comportamiento al flujo y  $k$  es el índice de consistencia. Los aderezos para ensalada son un buen ejemplo de este tipo de fluido. Este comportamiento puede ocurrir por una variedad de razones en emulsiones alimenticias, por ejemplo, la distribución espacial de los glóbulos puede ser alterada por un campo de corte, glóbulos no esféricos pueden alinearse con el campo

de flujo, puede existir floculación o pueden ser deformados y destruirse. En estos casos  $n$  puede variar entre 0 y 1.

Muchos fluidos pseudoplásticos muestran también un comportamiento casi lineal a bajas y a altas velocidades de cizalla. Se puede representar por el modelo de Cross que involucra una viscosidad constante a bajas ( $\eta_0$ ) y altas ( $\eta_\infty$ ) velocidades de cizalla (Lapasin y Prici, 1999; Steffe, 1996).

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + k_1 (\dot{\gamma})^{2/3}} \quad (4)$$

donde  $k_1$  es la constante del modelo de Cross (Lapasin y Prici, 1999).

- Espesante a la cizalla (reoespesante o dilatante). La curva de esfuerzo de cizalla–velocidad de cizalla parte del origen, en este caso, la viscosidad incrementa con la velocidad de cizalla (Bourne, 1982; Lapasin y Prici, 1999). Este tipo de fluido sólo se encuentra en líquidos que contengan una alta proporción de partículas rígidas insolubles en suspensión. La viscosidad aparente se incrementa con el aumento de la velocidad de cizalla. Este tipo de fluidos es descrito como “dilatante” porque es asociado con un incremento en el volumen del fluido cuando éste fluye, y sólo ocurre en suspensiones altamente concentradas. Los fluidos dilatantes son raros en la industria de los alimentos, al igual que en productos terminados

(Bourne, 1982), donde  $n$  puede variar entre 1 e  $\infty$  (Steffe, 1996).

Este tipo de comportamiento puede ser observado en emulsiones concentradas o suspensiones, donde los glóbulos están demasiado cerca. Una de las razones más comunes para este tipo de comportamiento es que la cizalla incrementa tanto la frecuencia como la eficiencia de las colisiones entre partículas, los cuales conducen a mejorar la agregación, y consecuentemente a un incremento de la viscosidad aparente respecto al tiempo (McClements, 2005).

- Herschel-Bulkley. Una característica importante de este tipo de fluido es la presencia de un esfuerzo inicial,  $(\sigma_0)$  el cual representa un esfuerzo de cizalla infinito requerido para conseguir un fluido, donde  $n$  puede variar entre 0 y  $\infty$  (Steffe, 1996). Ejemplos típicos de este fluido son, cátsup, mayonesa, crema batida y clara de huevo (Bourne,1982).

$$\sigma = \sigma_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (5)$$

En la Figura 1.12 se muestra la representación esquemática de los fluidos independientes del tiempo de cizalla, previamente descritos.

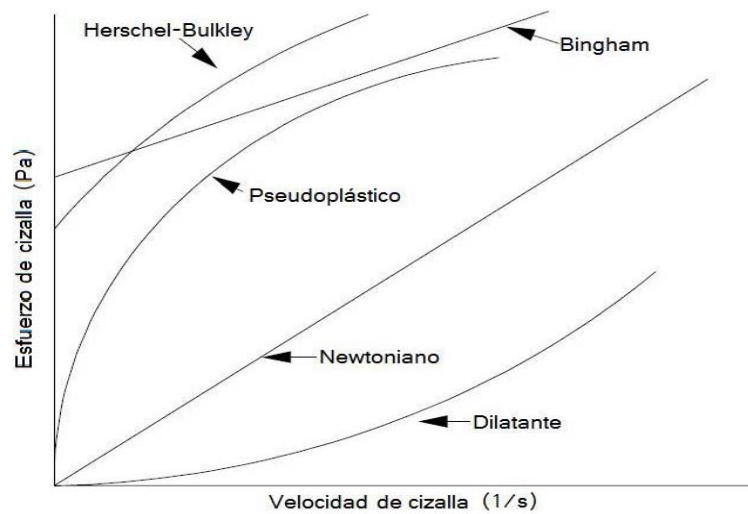


Figura 1.12. Curva de flujo de fluidos independientes del tiempo (Steffe, 1996).

- Dependientes del tiempo. Existen muchas emulsiones alimenticias en las cuales la viscosidad aparente incrementa o disminuye conforme al tiempo que dura la aplicación de la fuerza de cizalla. En algunos casos este cambio es reversible y el fluido recupera sus características reológicas originales, en otros casos el cambio en la muestra es irreversible y no se pueden recuperar las características originales (McClements, 2005). Dentro de estos se encuentran:
  - Tixotrópico. Es el adelgazamiento dependiente del tiempo (Steffe, 1996). La viscosidad aparente disminuye con el tiempo de cizalla a una velocidad de cizalla constante, pero el cambio es reversible, esto es, que el fluido en reposo volverá a su estado original (Bourne, 1982; Lapasin y Pricl, 1999).

Las emulsiones que exhiben este tipo de comportamiento a menudo contienen partículas que están agregadas por fuerzas débiles. El

cizallamiento del material provoca que las partículas agregadas se deformen progresivamente y destruyan con lo cual disminuye la resistencia a fluir y por lo tanto con el tiempo causa una reducción en la viscosidad aparente (Lapasin y Pricl, 1999).

- Anti-tixotrópico (reopéctico). En este tipo de fluidos la viscosidad aparente aumenta con el tiempo de cizalla a velocidad de cizalla constante y el cambio es reversible, esto es, después de reposar el producto regresa a su viscosidad aparente original. Es raro encontrar este tipo de comportamiento en sistemas alimenticios (Lapasin y Pricl, 1999).

En la práctica muchas emulsiones tienen viscosidades que dependen de la velocidad de cizalla y del tiempo en que los sistemas son cizallados. La viscosidad de una emulsión puede incrementar o disminuir conforme la velocidad de cizalla incrementa, más allá de permanecer constante como en un fluido newtoniano, en estos sistemas, la viscosidad a una velocidad de corte en particular es conocida como viscosidad aparente (McClements, 2005).

En la Figura 1.13 se muestra la representación esquemática de los fluidos dependientes del tiempo de cizalla.

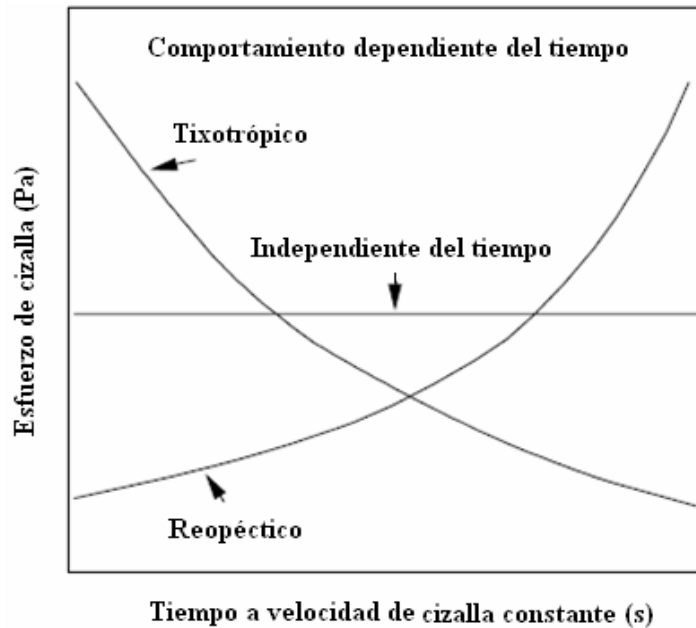


Figura 1.13. Comportamiento de los fluidos dependientes del tiempo (Steffe, 1996).

#### 1.4.2 Medición de las propiedades reológicas

Las emulsiones alimenticias pueden exhibir un amplio intervalo de comportamientos reológicos (líquido, sólido plástico, viscoelástico), consecuentemente han sido implementados una variedad de métodos instrumentales para caracterizar sus propiedades reológicas. Los instrumentos varían de acuerdo al tipo de deformación que se aplica a la muestra (cizalla, compresión, elongación, o algunas combinaciones), las propiedades reológicas que se puedan medir, la naturaleza de la muestra, su costo, sensibilidad, intervalo de esfuerzo o velocidad de cizalla entre otras cosas (McClements, 2005).

#### Reómetros

Estos instrumentos son usualmente controlados por computadora y llevan a cabo pruebas en función del tiempo, temperatura, velocidad de cizalla,

frecuencias oscilatorias entre otras. Básicamente la muestra a analizar se coloca en una celda termorregulada, la cual se somete a un esfuerzo de cizalla o velocidad de cizalla. El resultado de esta velocidad o esfuerzo se mide por el instrumento, así las propiedades reológicas de la muestra pueden ser determinadas mediante la relación del esfuerzo con la velocidad de cizalla (McClements, 2005).

En un viscosímetro rotatorio el producto es puesto entre dos superficies, una de las cuales posteriormente se somete a un movimiento de rotación aplicada. Dependiendo como las superficies de rotación son controladas, estos viscosímetros pueden ser clasificados como de velocidad controlada o esfuerzo controlado. En los instrumentos de velocidad controlada la velocidad de rotación de una de las superficies es la cantidad controlada y el torque transmitido se registra en la medición de la superficie, mientras que para los instrumentos de esfuerzo controlado un torque controlado es aplicado en una de las superficies y la velocidad de rotación resultante es posteriormente registrada (McKenna, 2003).

La descripción de las propiedades reológicas de los fluidos no newtonianos, no obstante, requiere de la obtención de información cuantitativa más sofisticada en el comportamiento de funciones de diferentes materiales. Por ejemplo, el comportamiento de un fluido newtoniano en general (que es, un fluido viscoso puro sin memoria) es determinado una vez que la dependencia de la viscosidad (o esfuerzo de cizalla) sobre la velocidad de cizalla es conocida. Al contrario, cuando tratan con fluidos que muestran efectos de memoria, sus propiedades dependientes del tiempo deben ser estudiadas con



cuidado y, si los materiales son viscosos, se debe ser capaz de determinar la dependencia en la velocidad de cizalla y no sólo en la viscosidad en su caracterización a fondo (Lapasin y Pricl, 1999).

Las pruebas pueden ser divididas en dos diferentes tipos:

- Esfuerzo constante. Se aplica un esfuerzo constante a la muestra y el resultado es la medida de la deformación o la velocidad de cizalla (McClements, 2005).
- Deformación constante. Se aplica una deformación bajo cizalla o velocidad de cizalla constante y se mide el esfuerzo generado en la muestra (McClements, 2005).

Diferentes tipos de celdas de medición pueden ser usadas para contener la muestra durante un experimento (McClements, 2005):

- Cilindros concéntricos. El fluido es colocado en el angosto espacio entre los dos cilindros concéntricos. Las condiciones de flujo pueden ser establecidas aplicando un torque controlado o también una velocidad angular al cilindro interno o al cilindro externo (Lapasin y Pricl, 1999).
- Placas paralelas. La muestra es colocada entre dos placas paralelas, se tiene la ventaja de espesores flexibles. El plato inferior es estacionario, mientras que la superior puede girar. Un torque constante es aplicado en la placa superior y la deformación o fuerza de deformación resultante es medida dependiendo si está analizando una muestra sólida o líquida. El arreglo de placas paralelas es por tanto adecuado sólo para muestras que tengan propiedades que sean independientes de la velocidad de

cizalla, y por tanto es inadecuado para analizar líquidos no ideales o sólidos. La limitante de la geometría de placas paralelas es que la velocidad de cizalla tiene que estar por debajo de 500 1/s (McKenna, 2003).

- Cono y placa. Consiste en un cono de ángulo pequeño, normalmente menor de 3 grados y con una punta truncada que casi toca la placa plana. La muestra para la evaluación es colocada en el espacio intermedio y diferentes velocidades angulares (en un instrumento de velocidad controlada) o torques (en un instrumento de esfuerzo controlado) son aplicados al cono o a la placa (más comúnmente al cono) (McKenna, 2003).
- Aspa o paleta. Consiste en una barra con múltiples hojas que son colocadas en la muestra y después gira en su eje. Se ha incrementado el uso de este método para caracterizar emulsiones semisólidas por que supera algunos de los problemas asociados con las geometrías de medición convencionales, como la ruptura de la estructura de la muestra durante la inserción dentro del dispositivo y el deslizamiento en la pared (McClements, 2005).

#### 1.4.3. Propiedades reológicas de las emulsiones

De acuerdo a lo reportado en McClements, las emulsiones alimenticias exhiben diferentes propiedades reológicas. El comportamiento reológico de un alimento en particular depende del tipo y la concentración de los ingredientes que contiene, así como del proceso y las condiciones de almacenamiento a las

cuales es sometido.

Uno de los factores de mayor influencia en las propiedades reológicas de las dispersiones coloidales es el arreglo de las partículas en el sistema, clasificándose como:

- Sistemas diluidos en donde la fracción volumen ( $\phi$ ) es menor a 0.05. Las partículas se encuentran suficientemente separadas por lo que no interactúan unas con otras. La emulsión es un fluido con una viscosidad relativamente baja, la cual es dominada por la viscosidad de la fase continua.
- Sistemas concentrados ( $0.05 < \phi < 0.49$ ): Las partículas interactúan apreciablemente entre ellas a través de interacciones hidrodinámicas y colisiones de partículas, lo cual impide su movimiento. La emulsión es todavía fluida con una viscosidad que comienza a incrementarse conforme la concentración de las partículas aumenta.
- Sistemas parcialmente cristalinos ( $0.49 < \phi < 0.54$ ): En este intervalo de concentración las partículas están separadas en dos distintas fases: una fase cristalina que consiste de agregados muy estrechos de partículas y una fase fluida con agregados de partículas que se mueven libremente.
- Sistemas vítreos ( $0.58 < \phi < 0.64$ ): El movimiento de las partículas es severamente restringido debido al estrecho acercamiento entre éstas, y las partículas se consideran atrapadas en redes, donde pueden tener movimiento vibratorio pero no pasar libremente entre ellas, pueden vibrar pero no moverse fácilmente. Este tipo de emulsión puede presentar ambos comportamientos tanto sólido como fluido, actuando como sólido a bajos esfuerzos de cizalla y como fluido una vez que el

esfuerzo de cedencia ha sido superado y las partículas pueden moverse libremente pasando de una a otra.

- Sistemas cristalinos ( $\phi > 0.64$ ): Las partículas están agregadas tan estrechamente entre ellas que no pueden tener movimiento vibracional ni traslacional. Este tipo de dispersiones coloidales se comportan como un sólido elástico.

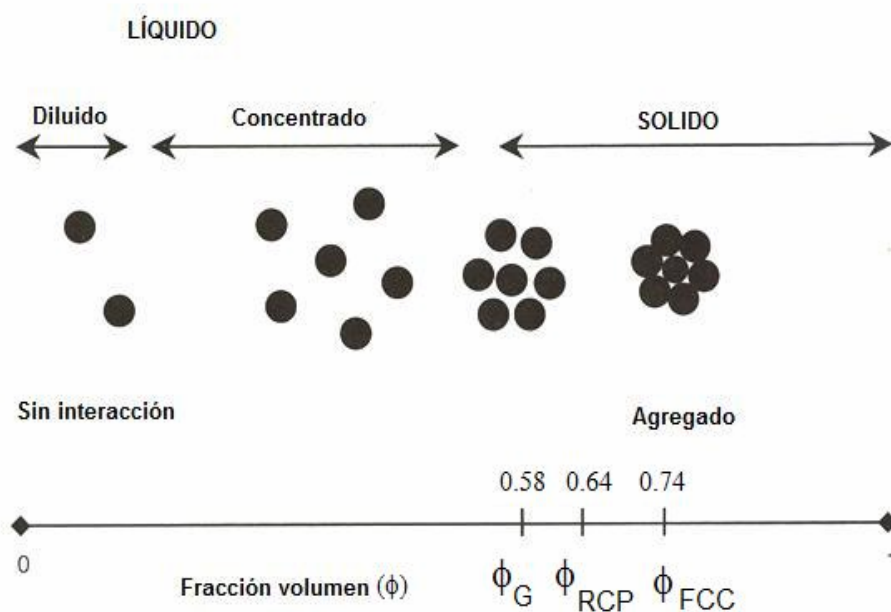


Figura 1.14. Arreglo de partículas en sistemas dispersos (McClements, 2005).

#### 1.4.4. Factores que influyen en la reología de las emulsiones

De acuerdo a lo resumido en la literatura, a continuación se describen los principales factores que influyen en la reología de las emulsiones (McClements, 2005):

- Fracción volumen ( $\phi$ ) de la fase dispersa

La viscosidad de una emulsión no floculada incrementa con la fracción

volumen de la fase dispersa, debido a que la presencia de glóbulos incrementa la disipación de energía asociada al flujo del fluido. A bajas concentraciones de glóbulos la viscosidad incrementa linealmente conforme a la fracción volumen, pero a altas concentraciones la viscosidad se incrementa poco a poco. Alrededor de una fracción volumen crítica de la fase dispersa, los glóbulos están tan estrechamente agregados que no puede fluir fácilmente; a esta concentración de glóbulos la viscosidad de la emulsión incrementa abruptamente hasta adquirir propiedades de gel como elasticidad, viscoelasticidad y plasticidad. La naturaleza precisa de la dependencia de la viscosidad respecto a la fracción volumen está principalmente determinada por las interacciones coloidales entre los glóbulos.

- Reología de las fases

Teóricamente la viscosidad de una emulsión fluida es directamente proporcional a la viscosidad de la fase continua. Consecuentemente cualquier alteración en la reología de la fase continua tendrá una influencia correspondiente sobre la reología de la emulsión. Para emulsiones alimenticias el modo más efectivo de modificar su reología es adicionar agentes texturales o gelificantes, es por esta razón que polisacáridos y proteínas son incorporadas a la fase acuosa de las emulsiones alimenticias para modificar su textura o incrementar su estabilidad.

- Tamaño del glóbulo

La influencia del tamaño y distribución de los glóbulos sobre la reología de una emulsión depende de la fracción volumen de la fase dispersa y de la naturaleza de las interacciones coloidales. En ausencia de interacciones

coloidales apreciables, el tamaño del glóbulo altera la reología de las emulsiones debido a su influencia sobre la movilidad Browniana y los efectos del esfuerzo de cizalla; este efecto es solo apreciable en emulsiones con una concentración relativamente alta.

- Interacciones coloidales

La naturaleza de las interacciones coloidales entre los glóbulos en una emulsión es uno de los factores más importantes que determinan el comportamiento reológico. Cuando las interacciones son grandes y repulsivas la fracción volumen efectiva de la fase dispersa puede ser significativamente mayor que su fracción volumen real y de esta manera la viscosidad incrementa. Cuando las interacciones entre los glóbulos son suficientemente atractivas la fracción volumen efectiva de la fase dispersa incrementa debido a la floculación de los glóbulos, lo que resulta también en un incremento de la viscosidad de la emulsión. Las propiedades reológicas de una emulsión dependen de la magnitud relativa y el intervalo de las interacciones de tracción o repulsivas entre los glóbulos. La manipulación de las interacciones coloidales entre los glóbulos puede ser usada para controlar efectivamente las propiedades reológicas de las emulsiones.

- Carga de la partícula

Muchas emulsiones alimenticias contienen glóbulos con carga eléctrica debido a la adsorción de componentes ionizables de superficie activa, tales como surfactantes iónicos, proteínas o polisacáridos. La carga de los glóbulos puede influenciar la reología de una emulsión en diferentes formas. Uno de los efectos más apreciables es que si el pH de la fase continua se altera para que la

repulsión electrostática entre los glóbulos no sea lo suficientemente duradera para favorecer las interacciones de atracción, los glóbulos floccularán. Una flocculación de los glóbulos causa un apreciable incremento en la viscosidad de la emulsión.

## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

#### **2.1 Objetivos**

##### Objetivo general

Evaluar las propiedades de flujo y estabilidad de emulsiones almacenadas en refrigeración, elaboradas con proteínas lácteas (concentrado de suero lácteo o caseinato de sodio) en mezcla con dos polisacáridos (xantana o goma arábica) por medio de pruebas rotacionales en flujo estacionario y la transmisión y retrodispersión de luz a través de la muestra, para determinar que mezcla otorga mayor estabilidad.

##### Objetivos particulares

- Determinar, modificando el tipo de polisacárido, el comportamiento al flujo de sistemas acuosos elaborados con proteínas lácteas mediante pruebas de cizalla estacionaria, para compararlas con las propiedades reológicas de sus respectivas emulsiones.
- Evaluar el comportamiento al flujo de las emulsiones elaboradas a partir de los sistemas acuosos de proteínas lácteas en mezcla con xantana o goma arábica mediante pruebas de cizalla estacionaria, periódicamente durante un mes de almacenamiento en refrigeración.
- Determinar la estabilidad de emulsiones almacenadas en refrigeración, elaboradas con proteínas lácteas en mezcla con xantana o goma arábica, mediante el seguimiento durante un mes de la transmisión y retrodispersión de luz a través de la muestra.



## **2.2 Materiales**

### **2.2.1 Materia prima**

La materia prima requerida para las disoluciones acuosas fue: xantana lote KTLF22533K, fabricada por Kelco, EUA, goma arábica, fabricada por Colloides Naturels de México, S.A. de C.V., concentrado de suero lácteo (WPC 34), fabricado por Dairy Gold, Mitchelstown, Reino Unido y caseinato de sodio elaborado por Lactoprot, Alemania.

### **2.2.2 Prueba de humedad**

Se hicieron pruebas de humedad a las proteínas y a los polisacáridos, para determinar su contenido de agua y calcular el porcentaje de sólidos secos, y así conocer la cantidad de proteínas y polisacáridos necesaria para obtener la concentración adecuada, de acuerdo a los valores obtenidos en los cálculos. La prueba se realizó por triplicado, en una termobalanza digital marca Ohaus modelo MB45. Las humedades obtenidas fueron: 8.51% ( $\pm 0.2$ ) de la xantana, 10.77% ( $\pm 0.1$ ) de la arábica, 4.85% ( $\pm 0.03$ ) del concentrado de suero lácteo y 6.74% ( $\pm 0.02$ ) del caseinato de sodio.

## **2.3 Métodos**

### **2.3.1 Preparación de muestras**

Las muestras en polvo se dispersaron en agua purificada marca E-pura (desmineralizada) para la obtención de la fase acuosa. En el caso de las emulsiones se empleó aceite vegetal puro de canola marca Great Value. Las emulsiones se elaboraron con una proporción en fracción peso-peso 30% aceite y 70% disolución acuosa.

### 2.3.1.1 Preparación de fase acuosa

El tamaño de cada muestra fue de 300 g (p/p), se prepararon a 23 °C. Se pesaron la proteína y los polisacáridos en una balanza digital marca Ohaus, Adventurer y se dispersaron los polvos en agitadores magnéticos marca Magnestir, a velocidad 2 de una escala de 6. Para preparar las fases acuosas; el polisacárido y la proteína se dispersaron por separado al doble de la concentración. Los polvos fueron adicionados al agua de manera pausada y en muy pequeñas cantidades mediante la ayuda de una espátula, con la finalidad de que se llevara a cabo una mejor hidratación. El agua estaba contenida en un vaso de precipitados de 400 ml. Cuando ya no había presencia de grumos, se mezclaron en partes iguales para formar la fase acuosa y se le agregó el conservador (0.03% de azida de sodio); se dejó en agitación por 10 minutos más, evitando en lo posible generar burbujas en la fase acuosa. Las fases acuosas se agitaron durante 1 minuto a una velocidad de 24000 rpm en un homogeneizador de alta velocidad marca Ika-Werke, modelo Ultra-Turrax T25 basic. Una vez elaboradas las disoluciones acuosas, éstas se mantuvieron en refrigeración durante 24 horas a 5 °C, aproximadamente.

### 2.3.1.2 Preparación de emulsiones aceite en agua

El tamaño de muestra fue de 200 g (p/p). Las emulsiones se prepararon con aceite puro de canola a temperatura ambiente (23 °C ±1). Éstas se prepararon en una fracción del 30% (p/p) de aceite y 70% (p/p) de fase acuosa, misma que se mantuvo 24 horas en refrigeración a una temperatura de 5 °C aproximadamente. Los dos líquidos se pusieron en un vaso de precipitados de 600 ml. Para lograr la unión de las dos fases se empleó un homogeneizador de alta velocidad marca Ika-Werke, modelo Ultra-Turrax T25 basic, a velocidad

6 (24000 rpm) de una escala de 6. Con la finalidad de saber el tiempo necesario para obtener una emulsión de color blanco opaco que indicara que las fases interactuaban uniéndose, al no haber presencia de glóbulos grandes de aceite en la parte superior, se realizaron mediciones del tiempo con un cronómetro cada 30 segundos mientras se agitaba mecánicamente y se observaba la formación de la emulsión y la apariencia de ésta. El tiempo que se estableció como apropiado para cada muestra se resume en el Cuadro 2.1. Durante estos tiempos, las emulsiones formadas no se “rompieron”, término que describe cuando una emulsión se forma y por exceso de velocidad proporcionada, las fases tienden a separarse nuevamente.

Cuadro 2.1. Tiempo de homogeneización para cada muestra realizada.

<b>Emulsión</b>	<b>Tiempo (min)</b>
Concentrado de suero lácteo 2%	4
Caseinato de sodio 2%	3
Xantana 0.3%	5
Xantana 0.5%	5
Concentrado de suero lácteo 2% y xantana 0.3%	4
Concentrado de suero lácteo 2% y xantana 0.5%	4
Caseinato de sodio 2% y xantana 0.3%	3
Caseinato de sodio 2% y xantana 0.5%	3
Goma arábica 7.5%	4
Goma arábica 10%	4
Concentrado de suero lácteo 2% y goma arábica 7.5%	4
Concentrado de suero lácteo 2% y goma arábica 10%	4
Caseinato de sodio 2% y goma arábica 7.5%	4.5
Caseinato de sodio 2% y goma arábica 10%	4.5

### 2.3.2 Pruebas reológicas en estado estacionario

La caracterización reológica de las muestras se realizó en un reómetro de cilindros concéntricos marca Physica LS100, equipado con un compresor de aire tipo industrial marca Jun-Air, que mantiene el motor en suspensión, a una presión de 100 lb/in<sup>2</sup> y de un baño maría marca Julabo F20, manteniendo la temperatura a 25 °C. Se usó un software US200 con modalidad de prueba rotacional, obteniendo curvas de flujo de velocidad de cizalla en función del esfuerzo de cizalla.

El tamaño de la muestra fue de 8 ml, el programa utilizado consta de tres ciclos, en el primero se mantiene una velocidad de 100 1/s durante 60 segundos, obteniéndose 30 puntos representativos, en este ciclo se proporciona un precizamiento a la muestra (ciclo 1). El segundo ciclo fue un descenso de velocidad de 100 1/s a 1 1/s obteniéndose 30 puntos (ciclo 2) y finalmente un ciclo de ascenso de 1 1/s hasta 100 1/s (ciclo 3), de igual forma con 30 puntos. Este método se seleccionó para asegurar la homogeneidad de la muestra. Para el cálculo de la viscosidad y parámetros reológicos, se utilizó un intervalo de 10-100 1/s en el concentrado de suero lácteo, en las otras muestras se utilizó el intervalo completo.

Las pruebas de cada fase acuosa y emulsión se realizaron por triplicado. Una vez elaboradas las soluciones acuosas, éstas se mantuvieron en refrigeración durante 24 horas y posteriormente se llevó a cabo su caracterización reológica después de atemperarse a una temperatura ambiente por 30 minutos aproximadamente. Se llevó a cabo la caracterización reológica de las emulsiones recién elaboradas, sin dejarlas reposar, es decir, se sometieron a

pruebas en cuanto se terminó de homogeneizarlas. Se realizó el seguimiento una vez a la semana durante un mes.

Se calcularon el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los resultados de cada uno de los niveles de variación.

### 2.3.3 Estabilidad por transmisión y retrodispersión de luz

El estudio y seguimiento de la estabilidad de las emulsiones se realizó mediante una prueba de dispersión de luz a través de la muestra en un Analizador Turbiscan MA 2000, Formulation.

Las muestras respectivas con cada tipo de biopolímero se colocaron en tubos de vidrio cilíndricos verticales de fondo plano especiales de 140 mm de altura y 12.33 mm de diámetro interno (Carrera y Rodriguez, 2005; Maldonado y col., 2008; Wulff y col., 2009), a 23 °C ( $\pm 1$ ), una vez que fueron preparadas las emulsiones, se tomó la primer lectura inmediatamente después de ser homogeneizadas, se consideró ese momento como el tiempo cero. Los perfiles de transmisión y retrodispersión obtenidos a diferentes intervalos de tiempo se trazan en relación con el perfil obtenido al tiempo cero (delta transmisión y delta retrodispersión, respectivamente) para determinar los cambios que ocurren durante el tiempo total de la medición (Sharma y col., 2002). Se requirieron sólo 7 ml de emulsión por tubo, se realizaron tres réplicas por preparación de muestras y a cada una se le determinaron 2 repeticiones.

Se usó un software Turbisoft, en el que el cabezal de detección realiza un barrido en toda la altura de la muestra (aproximadamente 65 mm), la

adquisición de los datos de curvas de flux de luz de transmisión y retrodispersión (en porcentaje), se obtienen cada 40  $\mu\text{m}$  (Mengual y col., 1999; Tippetts y Martini, 2009; Wulff y col., 2009). Los detectores de transmisión reciben la luz que viaja a través de la muestra (a  $0^\circ$  desde el haz incidente), mientras que el detector de retrodispersión recibe la luz retrodispersada por la muestra (a  $135^\circ$  desde el haz de luz incidente) (Mengual y col., 1999; Sharma y col., 2002; Pizzino y col., 2009; Tippetts y Martini, 2009). La retrodispersión, es decir, la dispersión hacia atrás, pasa a través de un máximo de tamaño de aproximadamente 0.5  $\mu\text{m}$  (Pizzino y col., 2009).

Al escanear una muestra, el software del instrumento genera un reporte que se divide en dos gráficos, en la parte superior se visualiza la transmisión y en la parte inferior la retrodispersión de luz; la visualización del reporte se puede representar en modo absoluto y en modo referencia (Figura 1.10). En el modo absoluto, se obtienen los datos ya sea en transmisión y/o en retrodispersión en su forma absoluta, es decir, la cantidad de luz transmitida y/o retrodispersada por la celda de medición en los 80 mm que recorre el cabezal. El modo referencia, son los datos obtenidos ya sea en transmisión y/o retrodispersión en comparación con alguna lectura en específico. Este modo se utiliza para determinar fácilmente los cambios que ocurren en una muestra en función del tiempo. Los barridos obtenidos a los diferentes tiempos se analizaron en modo referencia, comparándolos con el tiempo inicial (cero) como lectura en específico.

Las emulsiones se mantuvieron en refrigeración después de que se hizo el barrido al tiempo cero y posteriormente se realizó un seguimiento diario a cada muestra hasta que se presentó una separación de fases. Antes de realizar el escaneo se dejaron atemperar las emulsiones a temperatura ambiente durante 30 minutos aproximadamente.

Se calcularon el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las variables de las regresiones de cada una de las emulsiones estudiadas.

## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1 Determinación de parámetros reológicos**

A continuación se muestran las curvas de flujo que representan el comportamiento reológico de los sistemas estudiados utilizando el programa descrito en la metodología. Para el cálculo de los parámetros reológicos y la viscosidad de los sistemas estudiados se utilizaron únicamente los valores de la curva de flujo de ascenso, ya que se obtuvieron menores diferencias entre réplicas. En la nomenclatura de cada muestra, en las Figuras se indica al final el número del ciclo de cizalla al que corresponde; 2 se relaciona al ciclo de descenso y el 3 al ciclo de ascenso.

##### **3.1.1 Concentrado de suero lácteo**

En la Figura 3.1 se presenta una curva de flujo característica de la fase acuosa de proteína al 2% y su emulsión respectiva. Los sistemas elaborados sólo con concentrado de suero lácteo eran fluidos y sin consistencia, como se esperaba, por la baja concentración utilizada. A pesar de los bajos esfuerzos de cizalla registrados, se observa que coinciden los valores entre el ascenso y descenso de la velocidad de cizalla. Cabe mencionar que se utilizó un intervalo de velocidad de cizalla de 10 a 100 1/s para la curva de ajuste, con la finalidad de que los datos obtenidos se encontraran dentro del intervalo de medida del instrumento. La fase acuosa y la emulsión respectiva, presentan un comportamiento de un fluido newtoniano de baja viscosidad, la fase acuosa con un valor cercano al del agua y la emulsión un valor cuatro veces mayor (Cuadro 3.1).



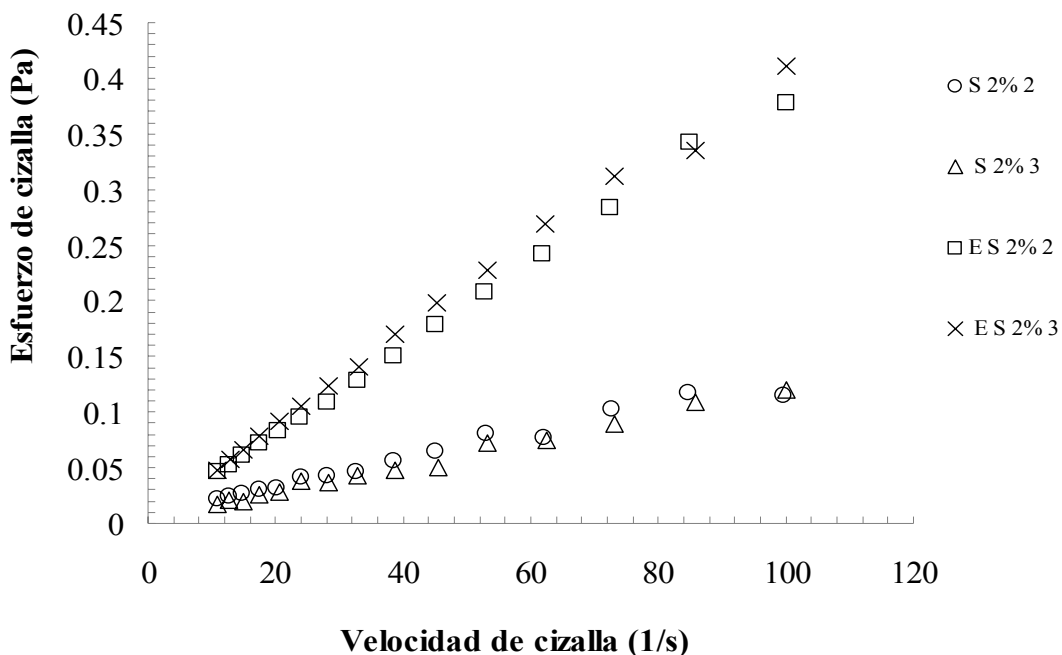


Figura 3.1. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S).

Cuadro 3.1. Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo.

	Concentrado de suero lácteo (2%)	Intervalo de velocidad de cizalla
	$\eta$ (Pa s)	(1/s)
<b>Fase acuosa</b>		
Promedio	0.0012	10-100
Desviación estándar	0.0001	
Coefficiente de variación (%)	12.4	
<b>Emulsión</b>		
Promedio	0.0039	10-100
Desviación estándar	0.0001	
Coefficiente de variación (%)	3.0	

### 3.1.2 Caseinato de sodio

En la Figura 3.2 se muestran las curvas de flujo de la fase acuosa preparada a la concentración de 2% de caseinato de sodio y su emulsión, ambas presentan un comportamiento newtoniano. En el Cuadro 3.2 se resumen los valores de viscosidad y se observa que la viscosidad de la fase acuosa es cercana a la del agua y en la emulsión es casi 6 veces mayor.

Estas emulsiones presentaron separación de fases, esto puede deberse a que la estabilidad de las emulsiones elaboradas con caseinato de sodio son sensibles a la concentración de la proteína (caseinato), ya que se recomienda una concentración del 1% para cubrir todos los glóbulos (30% de aceite), al 2% es posible que la proteína se encuentre en exceso provocando cremado, este efecto ha sido atribuido al agotamiento de los glóbulos de aceite, debido a la presencia del caseinato que no fue adsorbido en la fase acuosa (Hemar y col, 2001).

Es importante remarcar que la viscosidad obtenida con el caseinato de sodio fue mayor que la obtenida en el concentrado de suero lácteo.

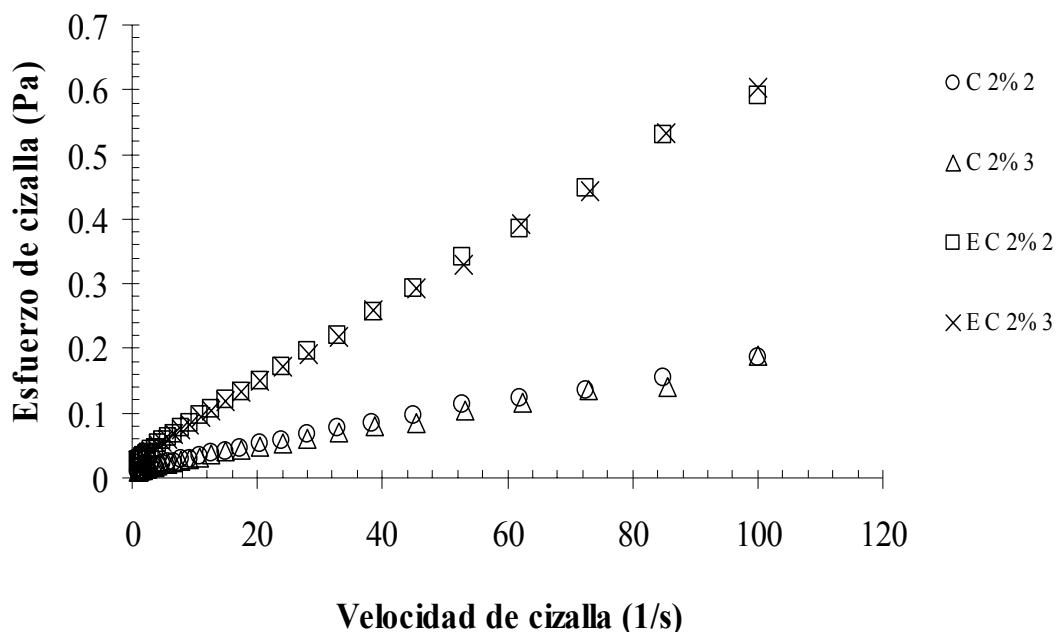


Figura 3.2. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C).

Cuadro 3.2. Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de caseinato de sodio.

	Caseinato de sodio (2%)	Intervalo de velocidad de cizalla
	$\eta$ (Pa s)	(1/s)
<b>Fase acuosa</b>		
Promedio	0.0017	1-100
Desviación estándar	0.0002	
Coefficiente de variación (%)	13.3	
<b>Emulsión</b>		
Promedio	0.0058	1-100
Desviación estándar	0.0003	
Coefficiente de variación (%)	6.0	

### 3.1.3 Xantana

En las Figuras 3.3 y 3.4 se presentan las curvas de flujo de la fase acuosa de xantana y su emulsión respectiva a las dos concentraciones estudiadas (0.3 y 0.5%). En este caso el comportamiento reológico que se observa es no-newtoniano, del tipo fluidificante a la cizalla, que se puede modelar con una función de tipo potencia. Se observó que coinciden mejor las curvas de ascenso-descenso de las fases acuosas a ambas concentraciones, al compararlas con sus respectivas emulsiones. Mientras que en la emulsión con 0.5% de xantana, se aprecia dependencia con el tiempo, ya que en la curva de flujo hay una ligera separación entre las curvas de descenso (2)-ascenso (3), a partir de la velocidad 8.9 1/s, que se acentúa al aumentar la concentración.

Los parámetros reológicos de cada muestra se resumen en el Cuadro 3.3. En las fases acuosas, el índice de comportamiento al flujo disminuye al incrementar la concentración de polisacárido y el índice de consistencia aumenta. En el caso de la xantana a concentración de 0.3% el índice de consistencia aumentó 1.33 veces y en la xantana a concentración de 0.5% 1.28 veces, lo que muestra que aumentaron en la misma proporción de una concentración a otra. En las emulsiones ocurrió lo mismo, el índice de comportamiento al flujo disminuyó al aumentar la concentración de polisacárido y el índice de consistencia aumentó, pero esto ocurrió en mayor proporción que en las fases acuosas. Al comparar el índice de consistencia de las emulsiones a las dos concentraciones (0.3% y 0.5%), se observa que al incrementar la concentración de xantana aumenta al doble, 2.77 veces, esto se puede atribuir a la contribución de la fase dispersa, ya que posee mayor viscosidad.

Lo anterior puede justificarse ya que cuando se dispersa la xantana en agua, forma dobles hélices que se agregan en complejos o redes simples a través de puentes de hidrógeno y polímeros entrelazados. Debido a estas estructuras altamente ordenadas y entrelazadas, las disoluciones de xantana presentan una alta viscosidad a bajas velocidades de cizalla y baja viscosidad a altas velocidades de cizalla, debido a la desagregación y la alineación de las macromoléculas individuales en la trayectoria de la cizalla. Sin embargo, cuando la cizalla termina, los agregados se reforman rápidamente (Hemar y col, 2001). Teóricamente la viscosidad de una emulsión fluida es directamente proporcional a la viscosidad de la fase continua. Consecuentemente cualquier alteración en la reología de la fase continua tendrá una influencia correspondiente sobre la reología de la emulsión (McClements, 2005).

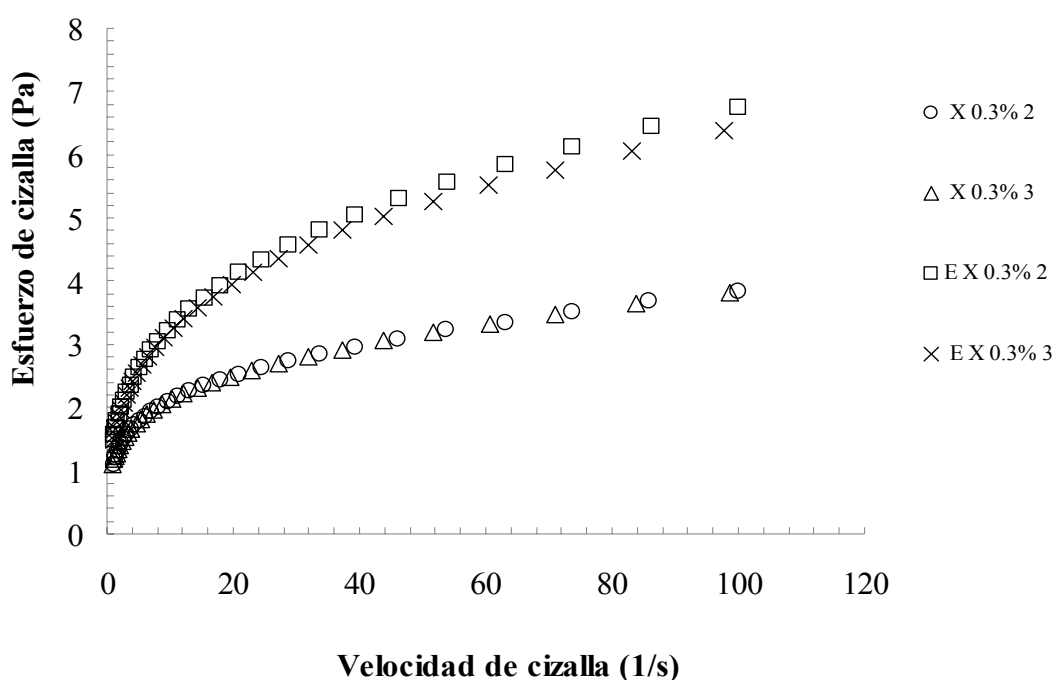


Figura 3.3. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 0.3% de xantana (X).

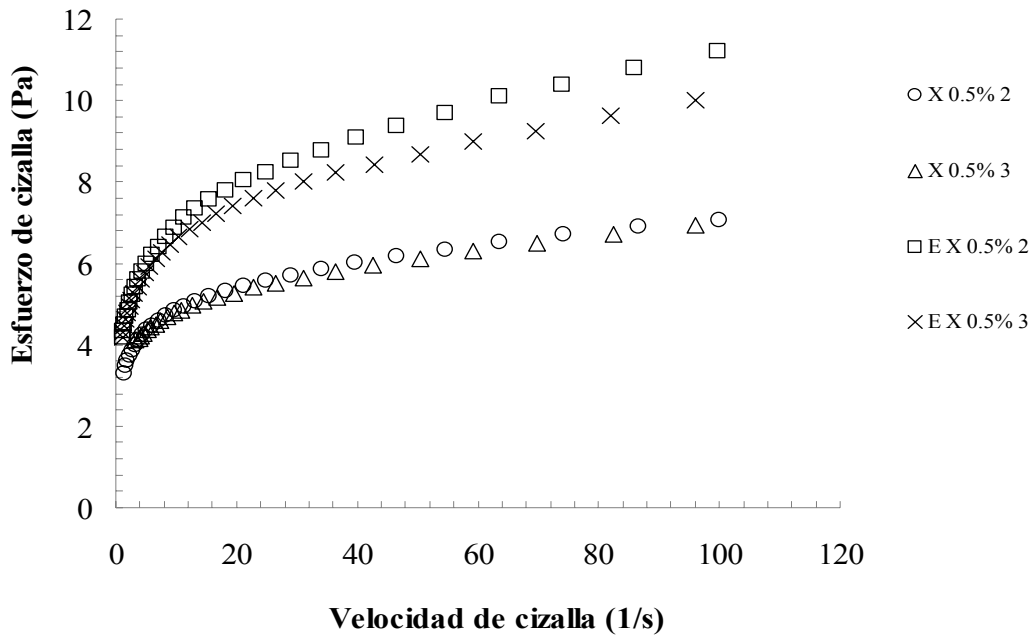


Figura 3.4. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 0.5% de xantana (X).

Cuadro 3.3. Valores de parámetros reológicos de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 0.3% y 0.5% de xantana.

	Xantana (0.3%)		Xantana (0.5%)		Intervalo de velocidad de cizalla (1/s)
	$n$	$k$ (Pa s <sup>n</sup> )	$n$	$k$ (Pa s <sup>n</sup> )	
<b>Fase acuosa</b>					
Promedio	0.26	1.13	0.16	3.26	1-100
Desviación estándar	0.012	0.07	0.008	0.07	
Coefficiente de variación (%)	4.8	6.0	4.6	2.2	
<b>Emulsión</b>					
Promedio	0.32	1.50	0.19	4.16	1-100
Desviación estándar	0.004	0.053	0.005	0.12	
Coefficiente de variación (%)	1.2	3.5	2.9	2.9	

#### 3.1.4 Concentrado de suero lácteo y xantana

En fase acuosa, al comparar el efecto en mezcla del concentrado de suero lácteo con xantana (0.3%) (Figura 3.5), se observa un comportamiento fluidificante a la cizalla, característico de la xantana. También en las emulsiones elaboradas con esa fase acuosa, se observa el mismo carácter fluidificante, lo que se atribuye al comportamiento reológico del polisacárido, pero una mayor consistencia por los glóbulos de aceite.

En la Figura 3.6 se realiza la misma comparación con una concentración de xantana mayor (0.5%), observándose básicamente el mismo efecto, pero presentando la emulsión una mayor consistencia. Cabe destacar el dominio de la xantana en fase acuosa (a pesar de estar en menor concentración) atribuible a que su molécula es mucho mayor que la del suero lácteo. En la emulsión la contribución de los glóbulos de aceite es adicional.

En este caso, la diferencia entre la curva de descenso (2)-ascenso (3) en las emulsiones que contienen concentrado de suero lácteo y xantana es menor que en las emulsiones que contienen únicamente xantana.

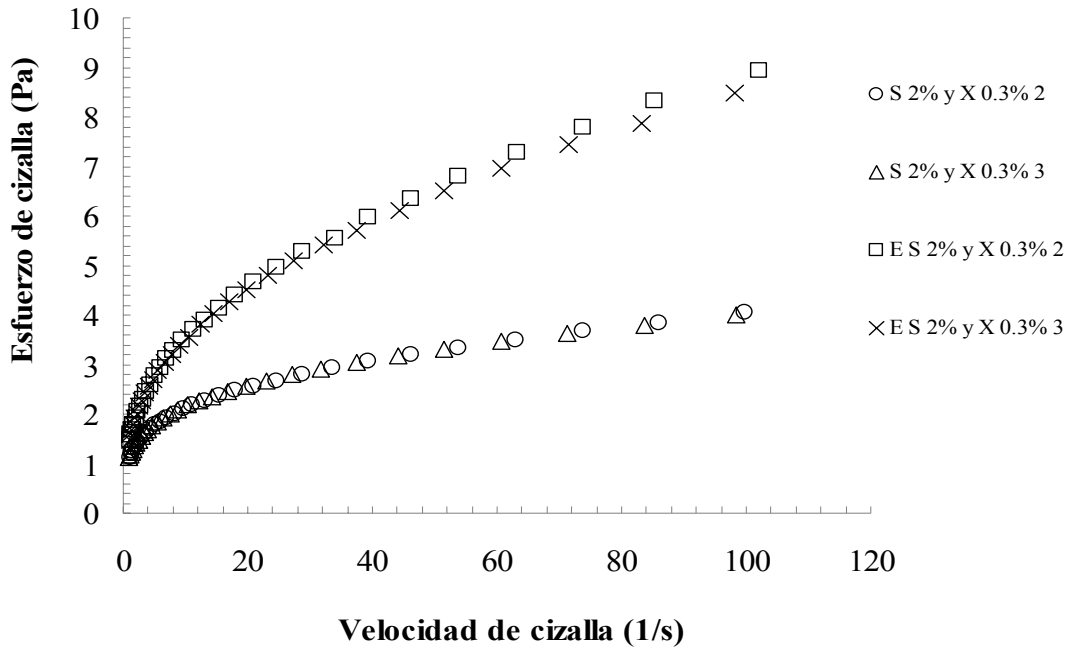


Figura 3.5. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S) y 0.3% de xantana (X).

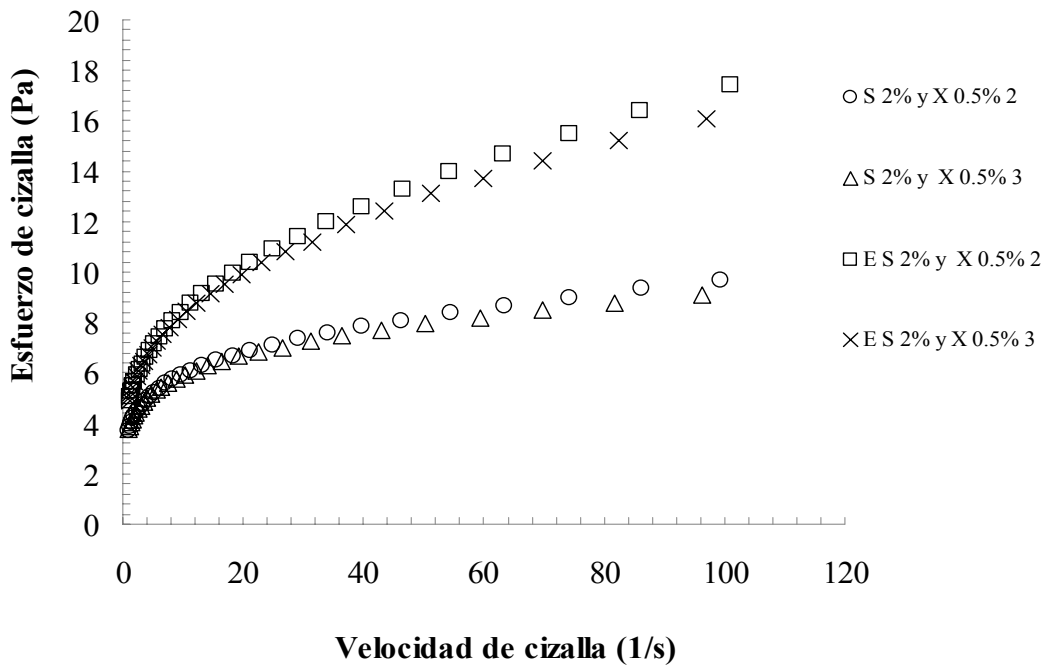


Figura 3.6. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S) y 0.5% de xantana (X).



Cuadro 3.4. Valores de parámetros reológicos de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo en mezcla con 0.3% y 0.5% de xantana.

	Xantana (0.3%) y Concentrado de suero lácteo (2%)		Xantana (0.5%) y Concentrado de suero lácteo (2%)		Intervalo de velocidad de cizalla (1/s)
	$n$	$k$ (Pa s <sup>n</sup> )	$n$	$k$ (Pa s <sup>n</sup> )	
<b>Fase acuosa</b>					
Promedio	0.27*	1.19*	0.19*	3.62*	1-100
Desviación estándar	0.006	0.057	0.003	0.11	
Coefficiente de variación (%)	2.1	4.7	1.7	3.1	
<b>Emulsión</b>					
Promedio	0.37	1.36	0.25	3.67	1-100
Desviación estándar	0.004	0.16	0.013	1.07	
Coefficiente de variación (%)	1.2	11.5	5.1	29.2	

\*Promedio de 2 repeticiones.

### 3.1.5 Caseinato de sodio y xantana

Al comparar el comportamiento al flujo de las fases acuosas de xantana con la otra proteína estudiada, caseinato de sodio (Figuras 3.7 y 3.8) en el intervalo completo de velocidad de cizalla, se observa un comportamiento como un líquido fluidificante, similar al de la fase acuosa de la xantana sola. Al comparar sus emulsiones respectivas a concentración de 0.3% xantana con 2% de caseinato de sodio y 0.5% xantana y 2% caseinato, las medidas reológicas muestran que tienen el mismo comportamiento que las fases acuosas, pero aumenta la viscosidad debido a la presencia de los glóbulos de aceite, similar al comportamiento reportado en el concentrado de suero lácteo.

En el Cuadro 3.5 se muestran los valores obtenidos con la aplicación del modelo de la potencia a la fase acuosa a 0.3% xantana y 2% caseinato y a la

fase acuosa 0.5% xantana y 2% caseinato, del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) en las fase acuosas disminuye al incrementar la concentración de polisacárido. Se observa también que conforme la concentración de xantana se incrementa, la pseudoplasticidad de la emulsión disminuye, es decir  $n$  aumenta. El índice de consistencia ( $k$ ) es un indicador de la naturaleza viscosa del sistema y éste incrementa con el aumento en concentración de polisacárido (Ibanoglu, 2002), tanto en la fase continua como en la emulsión.

En este caso se observaron menos diferencias entre la curva de flujo descenso (2)-ascenso (3) en las emulsiones preparadas con caseinato de sodio y xantana, al compararlas con las de la fase continua.

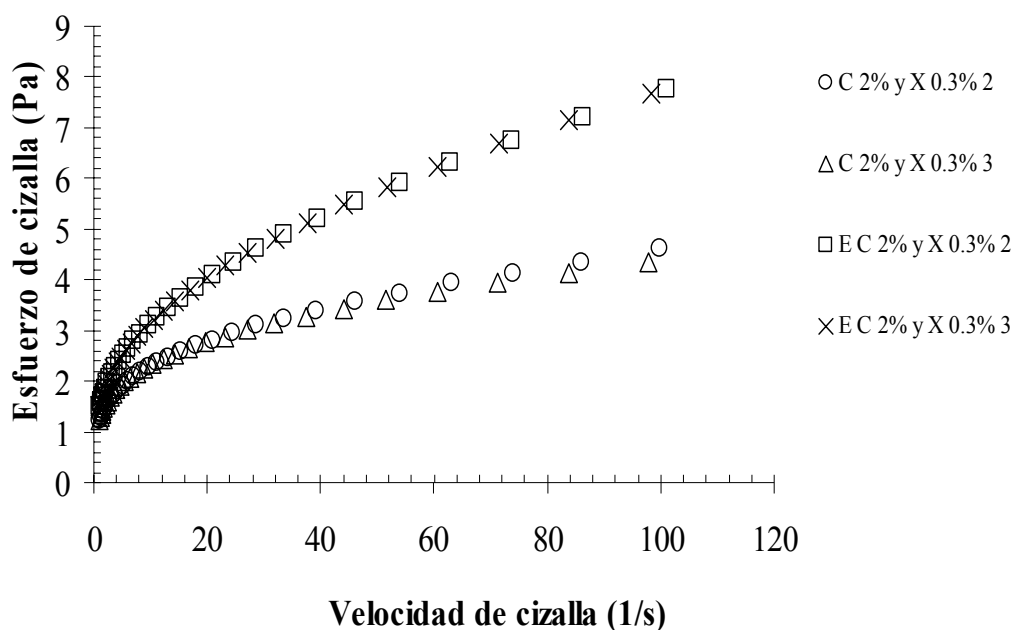


Figura 3.7. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C) y 0.3% de xantana (X).

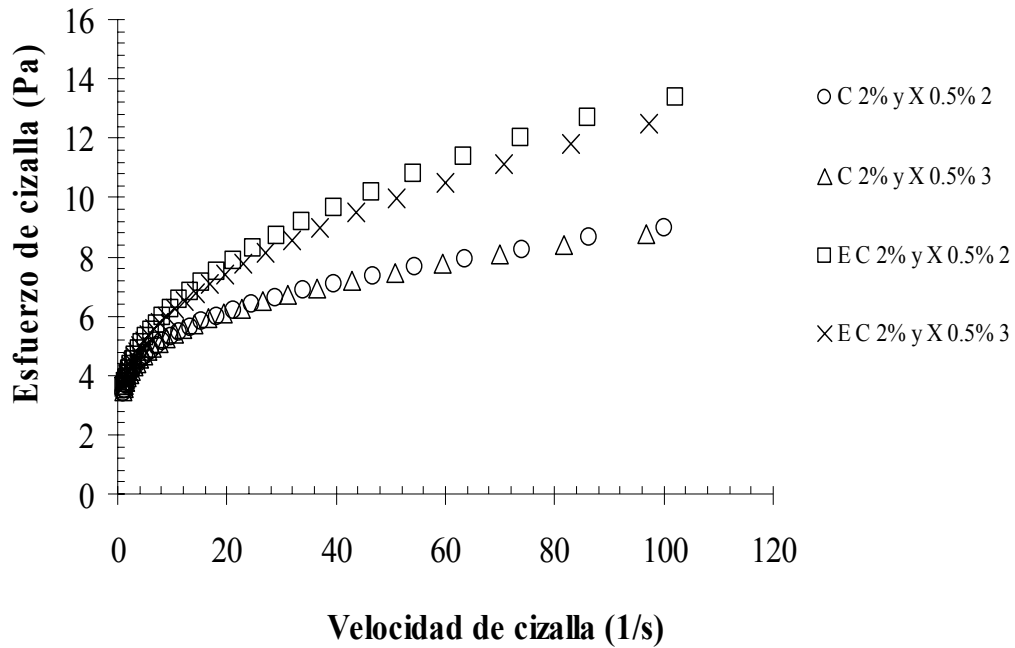


Figura 3.8. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C) y 0.5% de xantana (X).

Cuadro 3.5. Valores de parámetros reológicos de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de caseinato de sodio en mezcla con 0.3% y 0.5% de xantana.

	Xantana (0.3%) y Caseinato de sodio (2%)		Xantana (0.5%) y Caseinato de sodio (2%)		Intervalo de velocidad de cizalla (1/s)
	<i>n</i>	<i>k</i> (Pa s <sup>n</sup> )	<i>n</i>	<i>k</i> (Pa s <sup>n</sup> )	
<b>Fase acuosa</b>					
Promedio	0.27	1.28	0.19	3.72	1-100
Desviación estándar	0.005	0.043	0.002	0.344	
Coefficiente de variación (%)	1.9	3.3	1.2	9.3	
<b>Emulsión</b>					
Promedio	0.35	1.49	0.26	3.39	1-100
Desviación estándar	0.006	0.109	0.006	0.18	
Coefficiente de variación (%)	1.7	7.3	2.2	5.3	

### 3.1.6 Goma arábica

En las Figuras 3.9 y 3.10 se muestran las curvas de flujo de la fase acuosa y emulsión elaboradas con goma arábica a 7.5 y 10%.

Las fases acuosas de goma arábica sola, presentaron comportamiento newtoniano, de baja viscosidad, la cual aumentó al incrementarse la concentración (Cuadro 3.6), comportamiento diferente al presentado por el otro polisacárido estudiado (xantana), ya que en menor concentración proporcionó mayor viscosidad y comportamiento no-newtoniano. Se ha reportado que la goma arábica muestra un comportamiento reológico newtoniano hasta concentraciones de 40% con una baja viscosidad (Charalambous y Doxastakis, 1989; Cheftel y col., 1989a). En emulsiones con la fase acuosa respectiva, se presenta una viscosidad cuatro veces mayor pero se conserva el carácter newtoniano, la goma arábica no sólo aumenta la viscosidad del medio acuoso como muchos otros polisacáridos, sino que además puede contribuir a la formación de la capa macromolecular alrededor de los glóbulos de la emulsión, resultando en una buena estabilización estérica. Sin embargo, es un emulsificante débil comparado con proteínas alimenticias (Ibanoglu, 2002).

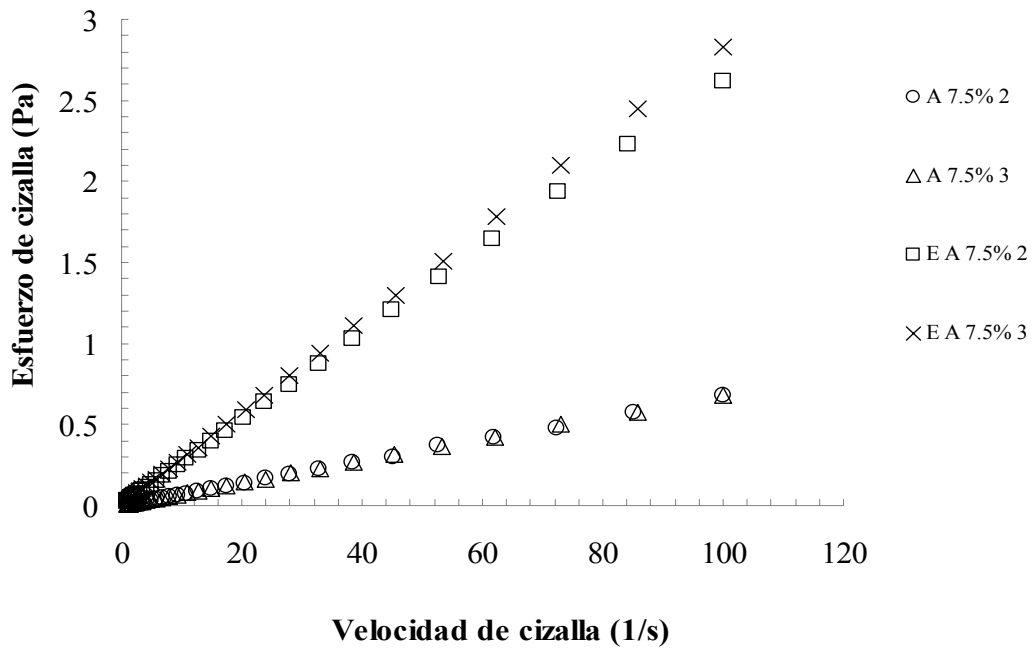


Figura 3.9. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 7.5% de goma arábica (A).

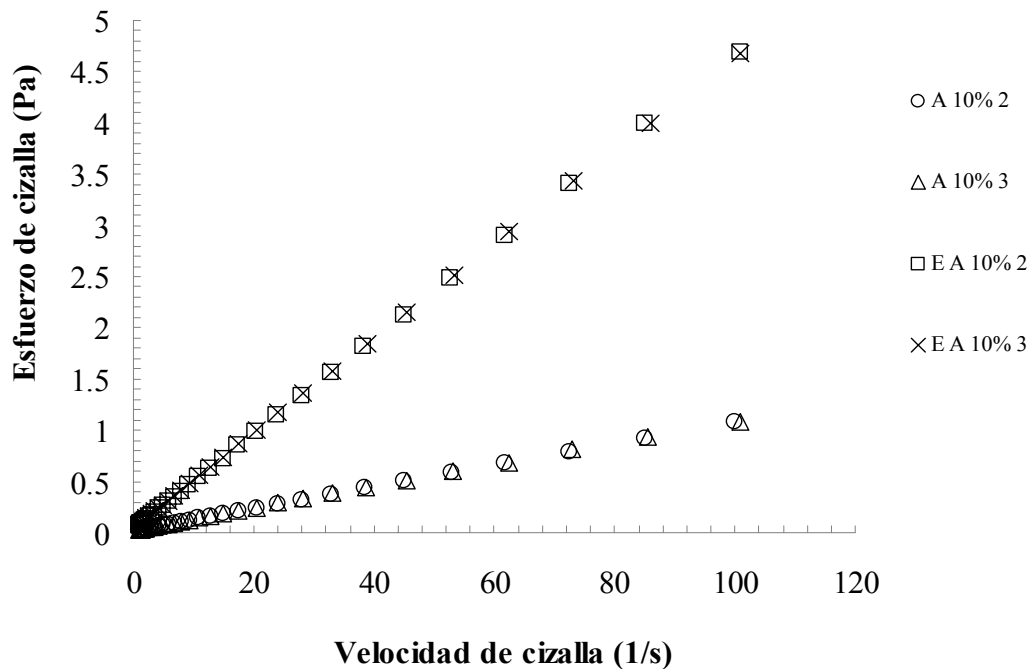


Figura 3.10. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 10% de goma arábica (A).

Cuadro 3.6. Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con goma arábica a 7.5 y 10%.

	Goma arábica (7.5%)	Goma arábica (10%)	Intervalo de velocidad de cizalla
	$\eta$ (Pa s)	$\eta$ (Pa s)	(1/s)
<b>Fase acuosa</b>			
Promedio	0.007	0.011	1-100
Desviación estándar	0.0003	0.0001	
Coefficiente de variación (%)	4.6	1.2	
<b>Emulsión</b>			
Promedio	0.029	0.046	1-100
Desviación estándar	0.001	0.002	
Coefficiente de variación (%)	4.0	3.8	

### 3.1.7 Concentrado de suero lácteo y goma arábica

En las Figuras 3.11 y 3.12 se muestran las curvas de flujo de la fase acuosa y emulsión elaboradas con concentrado de suero lácteo en mezcla con goma arábica al 7.5% y 10%, respectivamente. Las fases acuosas de goma arábica en presencia de concentrado de suero lácteo, también presentan comportamiento newtoniano, y la misma viscosidad que la fase acuosa de goma arábica sola (Cuadro 3.7), lo que indica que esta proteína no tuvo gran efecto sobre ella. Sin embargo, en emulsiones elaboradas con la mezcla de goma arábica y concentrado de suero lácteo, se presenta mayor viscosidad que en la emulsión formada únicamente con goma arábica y ésta aumenta al incrementar la concentración de goma arábica, este aumento en la viscosidad se puede deber a la contribución de los glóbulos de aceite.

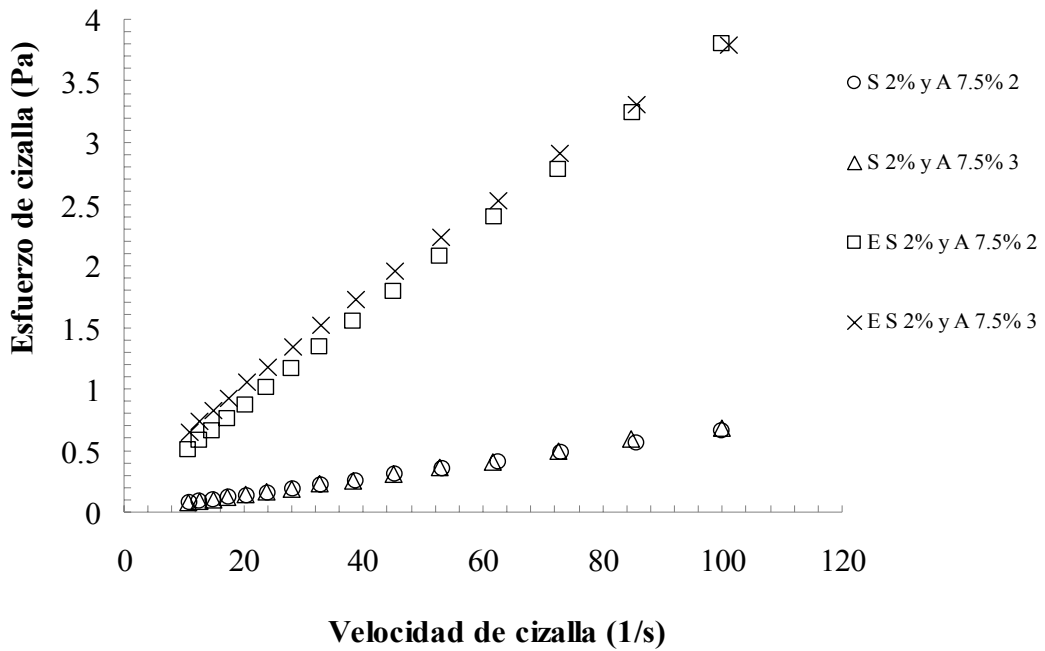


Figura 3.11. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S) y 7.5% de goma arábica (A).

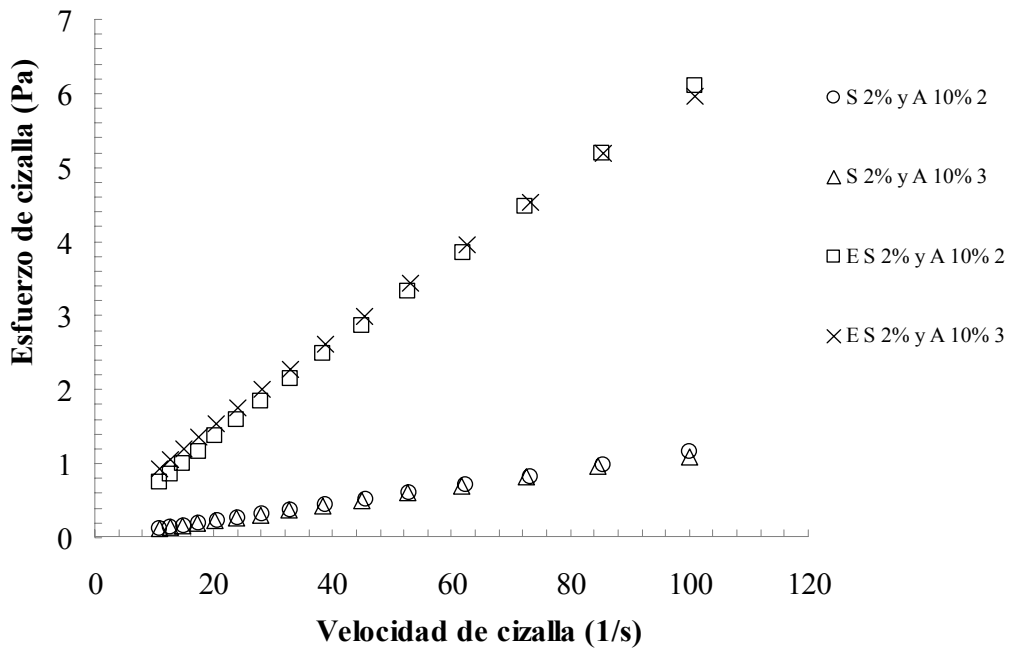


Figura 3.12. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo (S) y 10% de goma arábica (A).

Cuadro 3.7. Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con 2% de concentrado de suero lácteo en mezcla con goma arábica a 7.5% y 10%.

	Goma arábica (7.5%) y Concentrado de suero lácteo (2%)	Goma arábica (10%) y Concentrado de suero lácteo (2%)	Intervalo de velocidad de cizalla
	$\eta$ (Pa s)	$\eta$ (Pa s)	(1/s)
<b>Fase acuosa</b>			
Promedio	0.007	0.011	1-100
Desviación estándar	0.001	0.0002	
Coefficiente de variación (%)	14.8	2.1	
<b>Emulsión</b>			
Promedio	0.035	0.062	1-100
Desviación estándar	0.011	0.009	
Coefficiente de variación (%)	31.0	15.2	

### 3.1.8 Caseinato de sodio y goma arábica

En las Figuras 3.13 y 3.14 se muestran las curvas de flujo de las fases acuosas preparadas a la concentración de 7.5% de goma arábica con 2% de caseinato de sodio y 10% de goma arábica con 2% de caseinato de sodio, con esta otra proteína, también a las dos concentraciones de polisacárido, se observa un comportamiento newtoniano tanto en la fase acuosa como su emulsión.

En el Cuadro 3.8 se presentan los valores de viscosidad para cada una de las muestras estudiadas. Se puede observar que las fases acuosas a concentración 7.5% y 10% tienen una viscosidad muy baja y no difiere mucho en comparación con las fases acuosas de la mezcla de concentrado de suero lácteo y goma arábica.



En las emulsiones se observa también un aumento de viscosidad con el incremento de la concentración de la goma arábica con respecto a la fase acuosa. Pero la viscosidad de la mezcla de caseinato de sodio con goma arábica a las dos concentraciones es mayor que la viscosidad de la mezcla de concentrado de suero lácteo con goma arábica a las dos concentraciones.

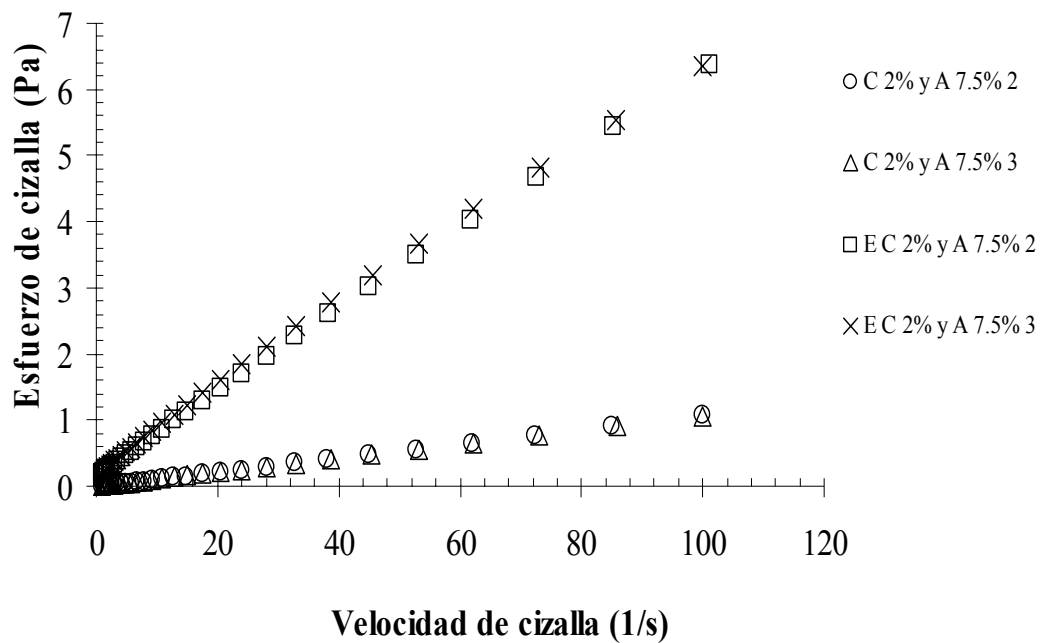


Figura 3.13. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C) y 7.5% de goma arábica (A).

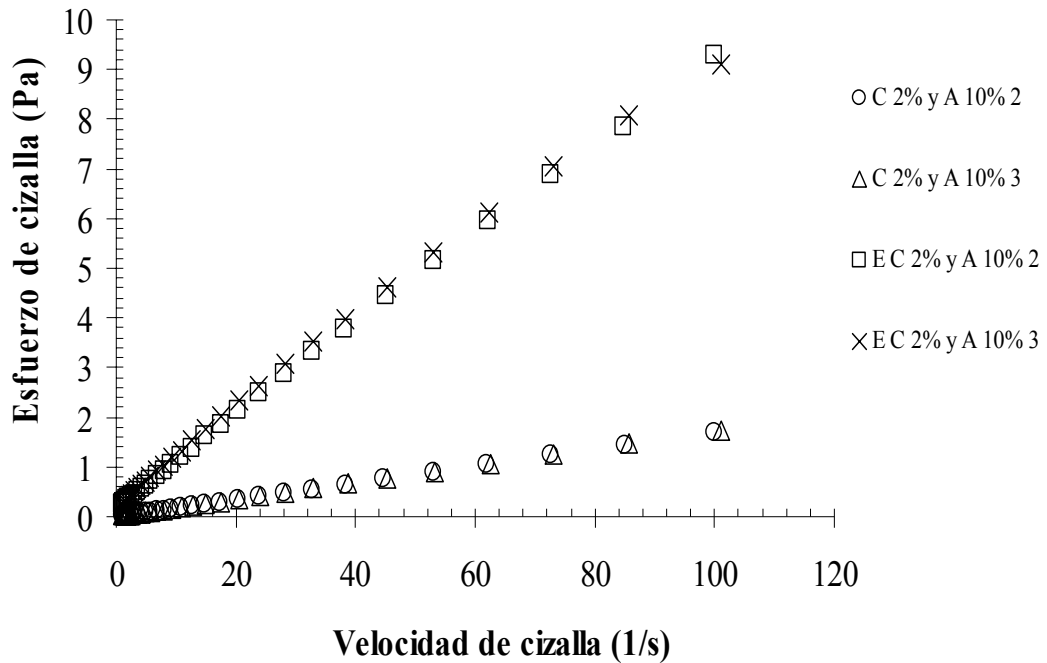


Figura 3.14. Relación del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de las fases acuosas y emulsiones (E) respectivas con 2% de caseinato de sodio (C) y 10% de goma arábica (A).

Cuadro 3.8. Valores de viscosidad de las fases acuosas y emulsiones respectivas con goma arábica a 7.5% y 10% en mezcla con 2% de caseinato de sodio.

	Goma arábica (7.5%) y Caseinato (2%)	Goma arábica (10%) y Caseinato (2%)	Intervalo de velocidad de cizalla (1/s)
	$\eta$ (Pa s)	$\eta$ (Pa s)	
<b>Fase acuosa</b>			
Promedio	0.010	0.017	1-100
Desviación estándar	0.001	0.001	
Coefficiente de variación (%)	4.9	4.6	
<b>Emulsión</b>			
Promedio	0.061	0.095	1-100
Desviación estándar	0.007	0.016	
Coefficiente de variación (%)	11.3	16.6	

### **3.2 Evolución de las propiedades de flujo y la viscosidad de emulsiones en función del tiempo de almacenamiento.**

Se realizó un seguimiento de las propiedades de flujo y la viscosidad en función del tiempo de almacenamiento de las emulsiones. En las mediciones posteriores se procuró realizarlas cada semana, dependiendo de la disponibilidad del equipo. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada emulsión. Es importante mencionar que sólo se le realizó el seguimiento a las emulsiones con goma arábica al 7.5 y 10%, a las emulsiones con xantana a las dos concentraciones (0.3 y 0.5%), en mezcla con las proteínas de estudio. Esto debido a que en las otras muestras se observó separación de fases rápidamente, presentando inestabilidad.

#### **3.2.1 Emulsión con goma arábica**

En las Figuras 3.15 y 3.16 se presentan los valores de viscosidad en función del tiempo de almacenamiento de las emulsiones con 7.5% y 10% de goma arábica, correspondientes a las tres réplicas realizadas. En general se observa poca variación de la viscosidad con respecto al tiempo de almacenamiento. Las réplicas 3 (R3) a 7.5% y 1 (R1) a 10%, fueron las que mostraron menor variación. Las fluctuaciones en la viscosidad de las emulsiones de arábica se puede atribuir a la posible heterogeneidad de la muestra (R2), probablemente provocado por la desestabilización de la emulsión, lo que se verifica en las pruebas de transmisión - retrodispersión de luz, que se analizan posteriormente.

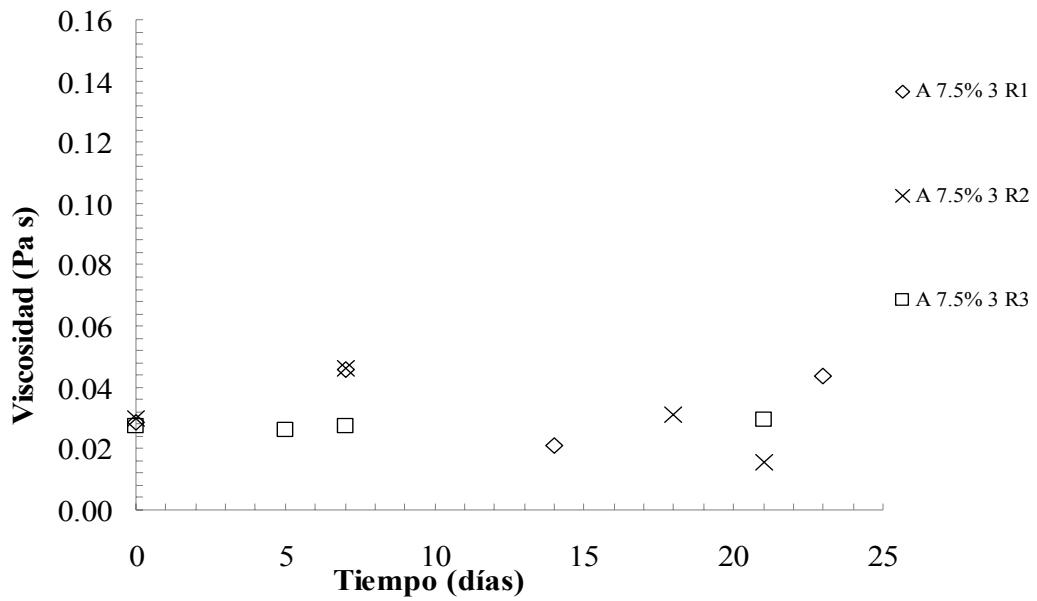


Figura 3.15. Relación de la viscosidad en función del tiempo de almacenamiento de las emulsiones con 7.5% de goma arábica.

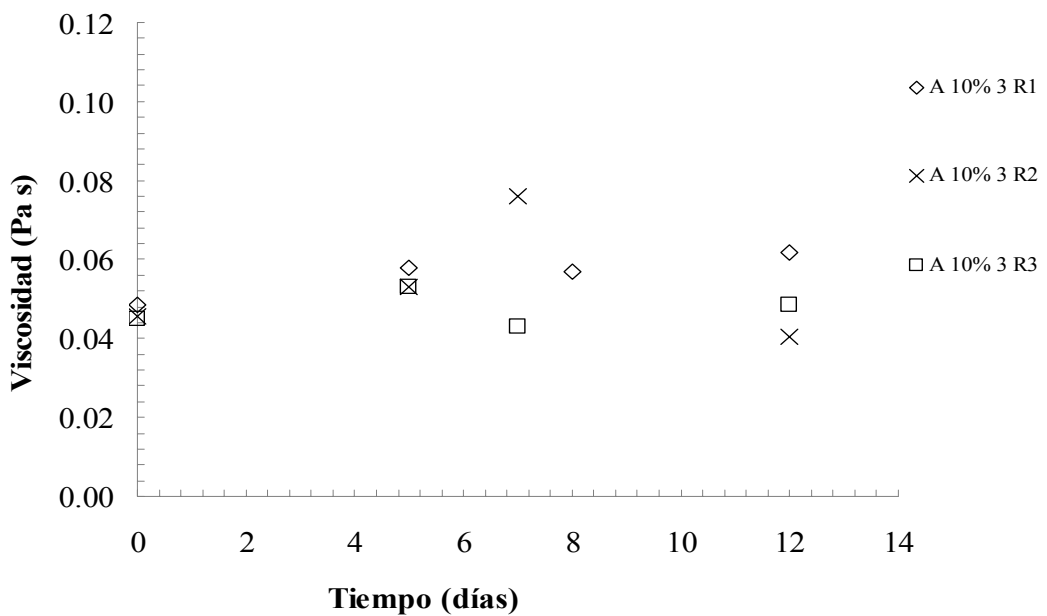


Figura 3.16. Relación de la viscosidad en función del tiempo de almacenamiento de las emulsiones con 10% de goma arábica.

### 3.2.2 Emulsión con concentrado de suero lácteo y xantana

De igual manera en la Figura 3.17a se presenta la variación del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) y en la Figura 3.17b, el índice de consistencia ( $k$ ) de las emulsiones que contienen concentrado de suero lácteo y xantana a 0.3%. Estas emulsiones presentaron inicialmente un comportamiento fluidificante a la cizalla que se modeló con la ley de la potencia. A lo largo del almacenamiento, este comportamiento se mantuvo, por lo que se observaron muy pocas diferencias en los valores de los parámetros reológicos,  $n$  y  $k$ . A los 20 días las réplicas tuvieron una variación menor al compararlo con las emulsiones de arábica.

Al aumentar la concentración de xantana, estas emulsiones visualmente seguían siendo estables, incluso después de 3 semanas de elaboradas y no presentaban ninguna señal de separación de fases, se observó un comportamiento similar al anterior en la evolución de los parámetros reológicos de las emulsiones (Figura 3.18).

Sin embargo, a los 21 días se registró una mayor fluctuación en el índice de consistencia. Esto se puede atribuir a la xantana ya que la macromolécula de la xantana es mayor que la del suero de leche.

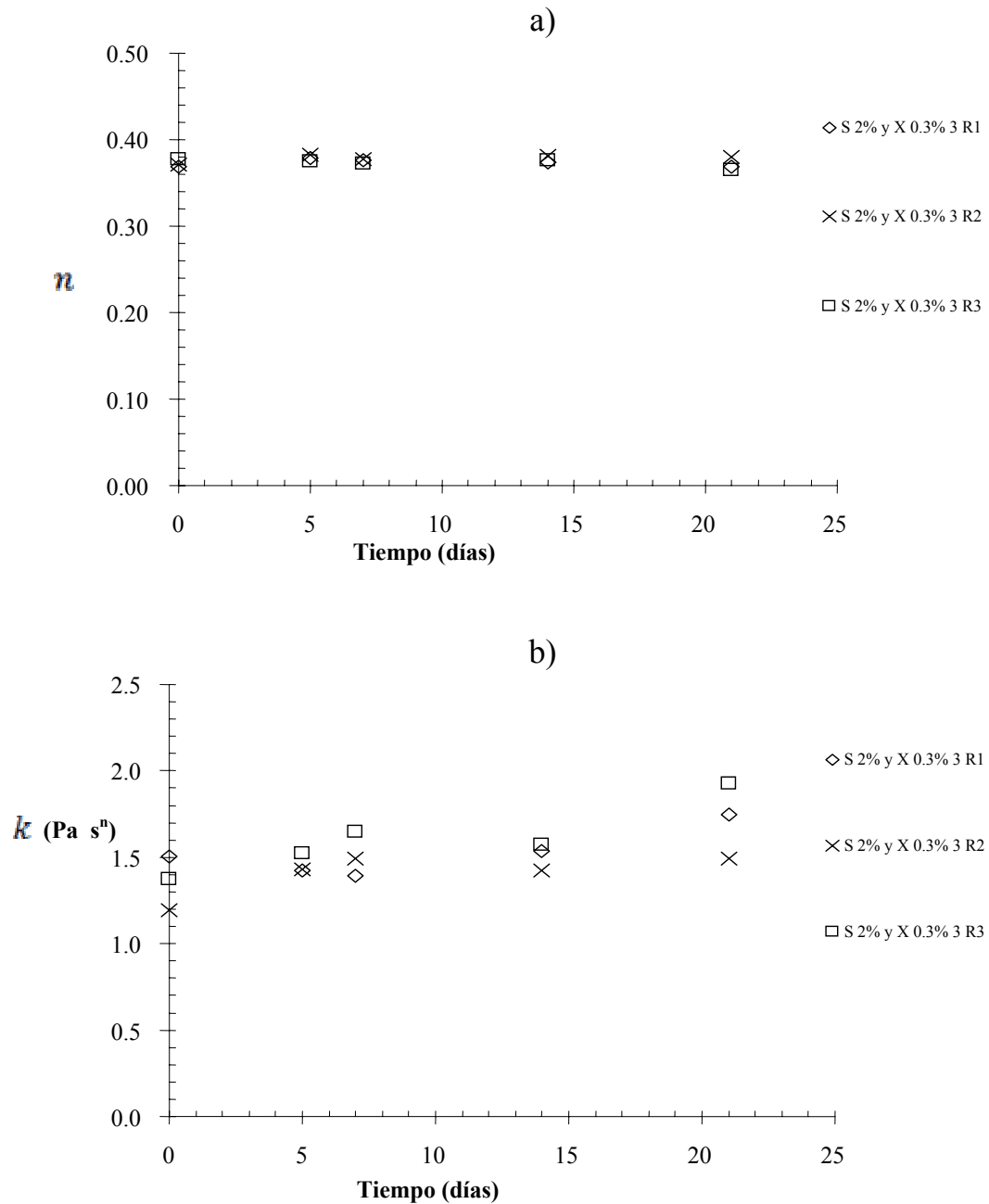


Figura 3.17. Variación de los parámetros reológicos de la ley de la potencia de las emulsiones con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.3% de xantana en función del tiempo de almacenamiento. a) índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), b) índice de consistencia ( $k$ ).

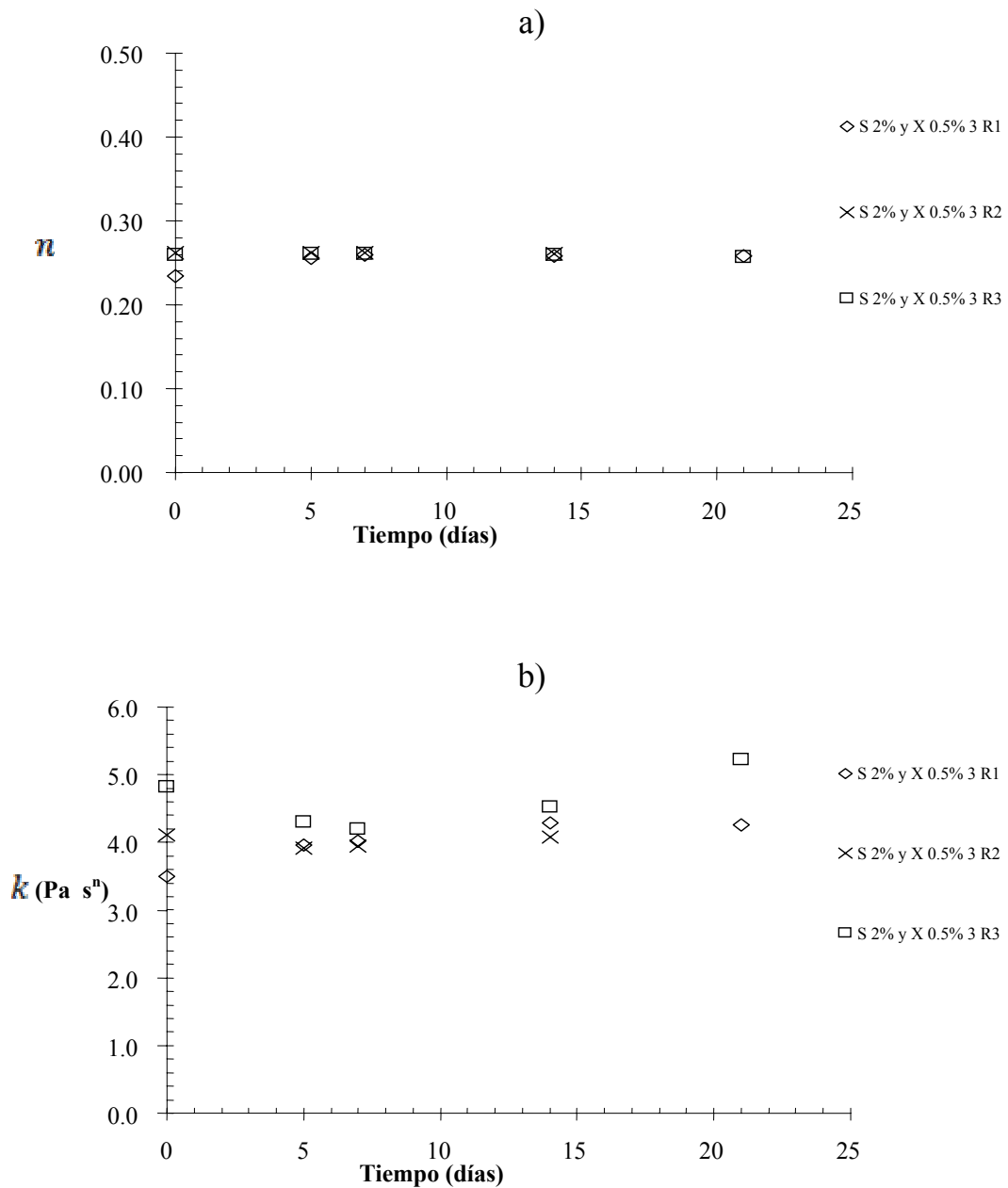


Figura 3.18. Variación de los parámetros reológicos de la ley de la potencia de las emulsiones con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.5% de xantana en función del tiempo de almacenamiento. a) índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), b) índice de consistencia ( $k$ ).

### 3.2.3 Emulsión con caseinato de sodio y xantana

Al comparar las emulsiones de caseinato de sodio en mezcla con xantana a 0.3% (Figura 3.19a y 3.19b), con las analizadas anteriormente, se puede observar un comportamiento muy similar en la variación del índice de comportamiento, ya que éste fue prácticamente constante en el tiempo de almacenamiento.

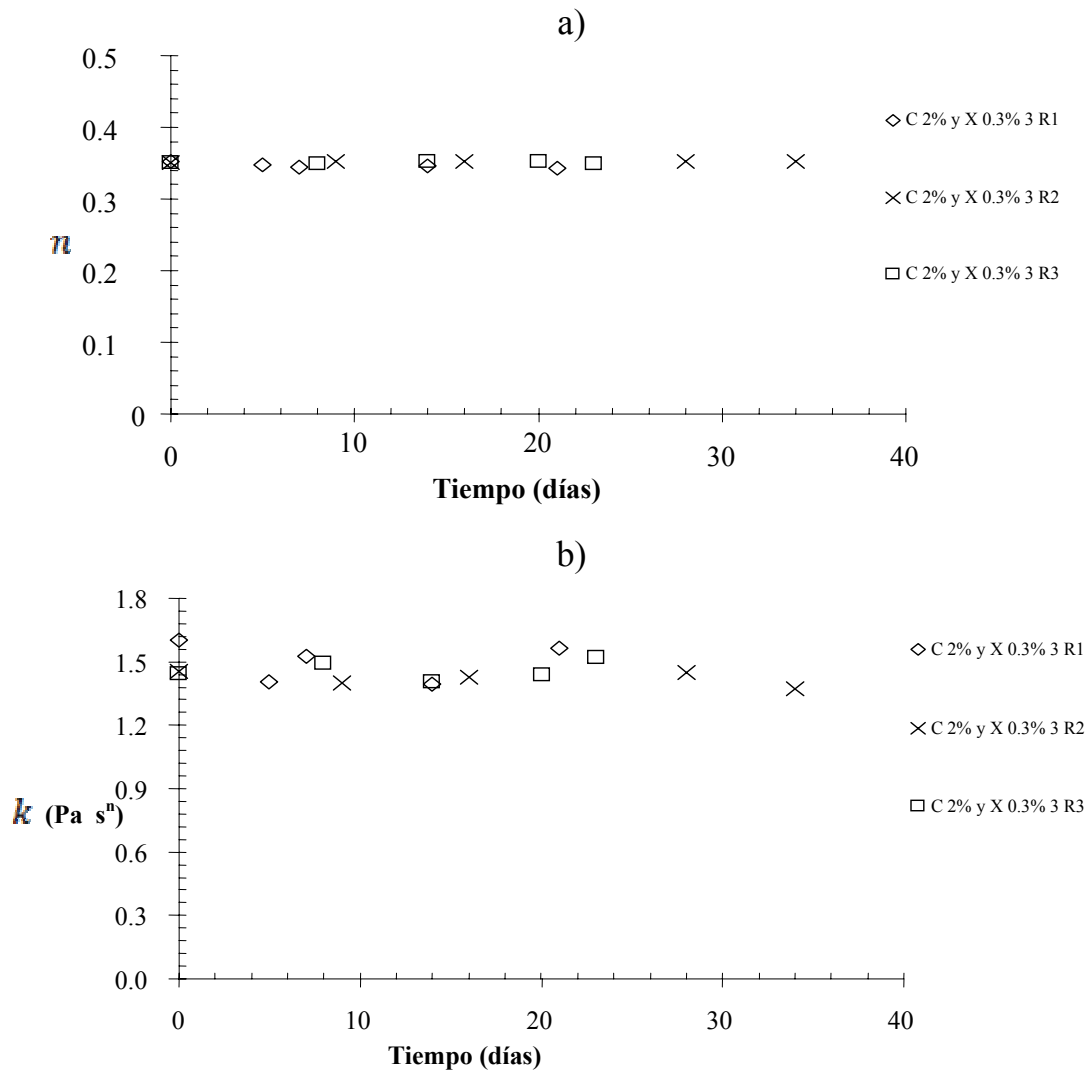


Figura 3.19. Variación de los parámetros reológicos de la ley de la potencia de las emulsiones con 2% de caseinato de sodio y 0.3% de xantana en función del tiempo de almacenamiento. a) índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), b) índice de consistencia ( $k$ ).



Al aumentar la concentración de xantana, las emulsiones de caseinato de sodio con xantana visualmente seguían siendo estables, incluso después de 1 mes de elaboradas y no presentaban ninguna señal de separación de fases (Figura 3.20).

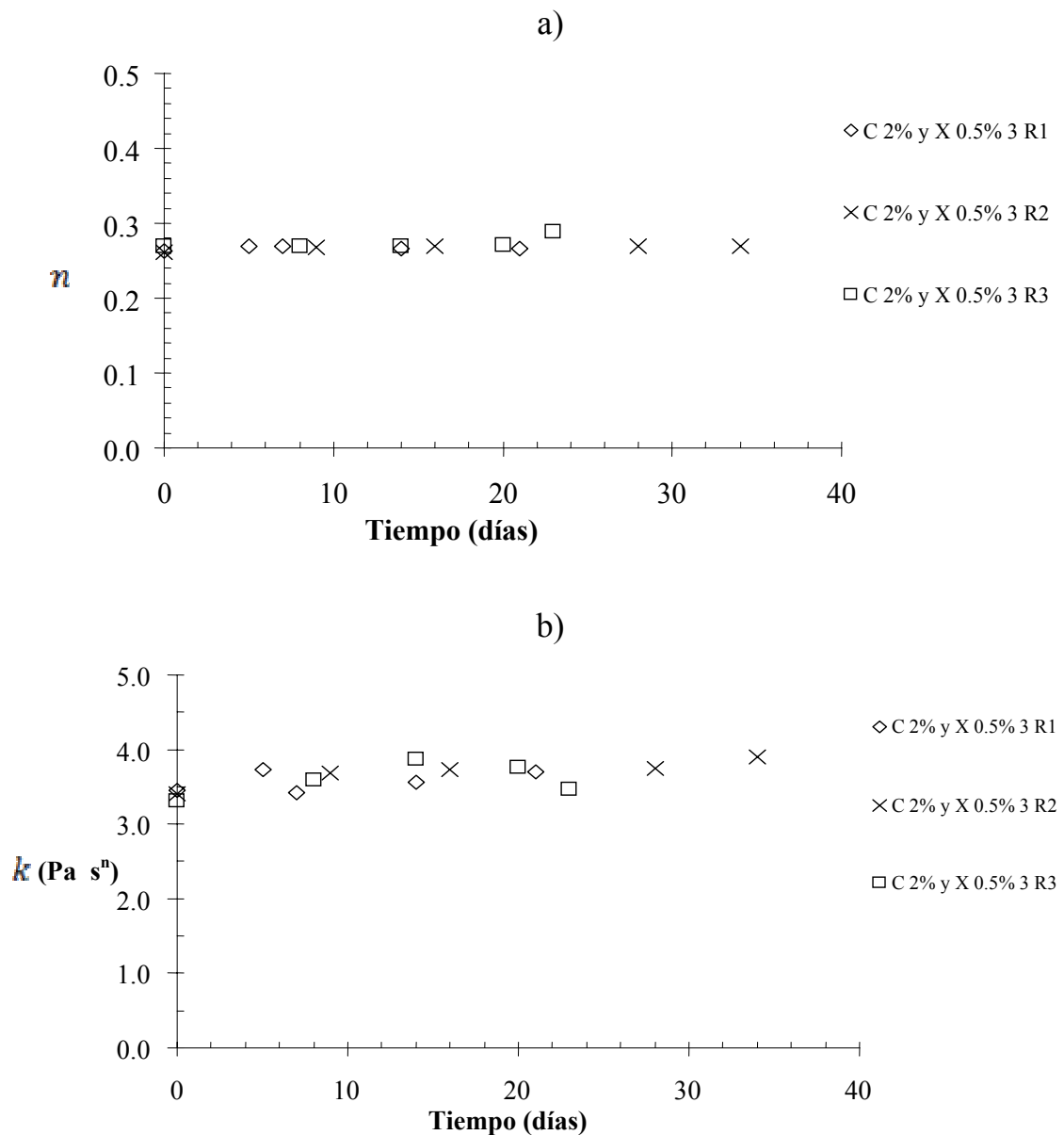


Figura 3.20. Variación de los parámetros reológicos de la ley de la potencia de las emulsiones con 2% de caseinato de sodio y 0.5% de xantana en función del tiempo de almacenamiento. a) índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), b) índice de consistencia ( $k$ ).

Incluso después de 3 semanas de elaboradas, no presentaban ninguna señal de separación de fases. Por el contrario los sistemas elaborados con concentrado de suero lácteo en ausencia de polisacáridos fueron los menos estables al igual que los elaborados con la misma proteína y arábica.

Las fluctuaciones en la viscosidad de las emulsiones de arábica se atribuyen a la heterogeneidad de la muestra, sin embargo, presenta usualmente buena estabilidad. Las emulsiones a las dos concentraciones de xantana con concentrado de suero lácteo (2% y 0.3% y, 2% y 0.5%) si se les realizó seguimiento a las propiedades de flujo en función del tiempo de almacenamiento debido a que se observó que no se separaban las fases, presentando estabilidad.

Es importante mencionar que tampoco se realizó seguimiento de la viscosidad en función del tiempo de almacenamiento de las emulsiones que contenían caseinato de sodio únicamente, debido a que eran emulsiones inestables. Esto como ya se explicó anteriormente, puede deberse a que la estabilidad de las emulsiones elaboradas con caseinato de sodio es sensible a la concentración de la proteína (caseinato), ya que se recomienda una concentración del 1% para cubrir todos los glóbulos (30% de aceite), al 2% es posible que la proteína se encuentre en exceso provocando agregación y cremado, este efecto ha sido atribuido al agotamiento de los glóbulos de aceite, debido a la presencia del caseinato que no fue adsorbido en la fase acuosa (Hemar y col, 2001).

### 3.3 Estabilidad a través de la dispersión de luz

A continuación se muestran las curvas de transmisión y retrodispersión de luz de los sistemas estudiados, utilizando el programa descrito en la metodología. En la Figura 3.21 se presenta a manera de ejemplo, el barrido obtenido para un tiempo inicial en modo absoluto, en la cual se delimita la distancia real de la muestra contenida en la celda, ya que a lo largo de ella no se registra transmisión de luz, excepto en la parte superior del tubo que contiene la muestra, en donde a partir de 57 mm se transmite completamente, ya que a partir de éstos ya no hay muestra.

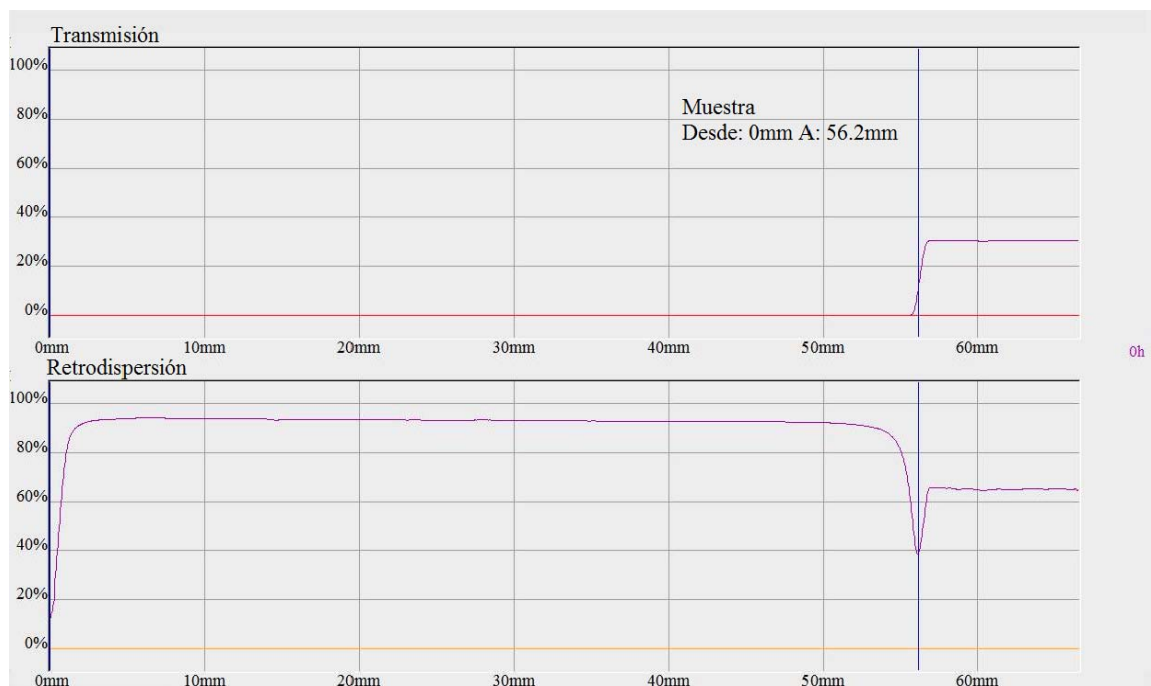


Figura 3.21. Transmisión y retrodispersión de luz en el tiempo inicial o de referencia en una muestra escaneada en el Analizador Turbiscan MA 2000.

Como se hicieron estas mediciones inmediatamente después de ser la muestra homogeneizada, al tiempo cero, la emulsión es uniforme y la gráfica de retrodispersión no presenta ningún tipo de inestabilidad o separación, ya que

la muestra presenta una retrodispersión de luz casi constante a lo largo del tubo, observándose únicamente en el límite, el registro de la muestra que queda adherida en las paredes del tubo, sea por la formación de burbujas en el llenado y por compactación de la misma, en caso de tener aire atrapado.

### 3.3.1 Concentrado de suero lácteo

En la Figura 3.22 se presenta el barrido obtenido de la emulsión de concentrado de suero lácteo al 2%, en modo de referencia, con el tiempo se observó inestabilidad, principalmente en la parte inferior de la celda (0-30.3 mm), como se demuestra en el gráfico de retrodispersión, debido a que se observa migración de partículas hacia la parte superior, mostrando un aspecto blanco turbio en la superficie, detectando clarificación en el gráfico de transmisión de 0.46-8.05 mm, ya que la migración de los glóbulos de aceite hacia la parte superior de la muestra dejó una fase más y más acuosa en la parte inferior. Se distingue una zona donde la retrodispersión es menor, inclusive negativa, es decir, que en esta zona se presenta una menor proporción de partículas, las cuales aparentemente van migrando hacia la parte superior del tubo.

Debido a la gran inestabilidad de la emulsión formada, no se pudo realizar el cálculo de la velocidad de migración de partículas, ya que se define rápidamente la separación de fase. Al obtener el gráfico de espesor absoluto, se trató de determinar la función que define la dependencia con el tiempo, como se muestra en la Figura 3.23 pero no se pudo obtener una tendencia característica. Obteniendo que para emulsiones tan inestables, la velocidad es tal que inicia en pocas horas.

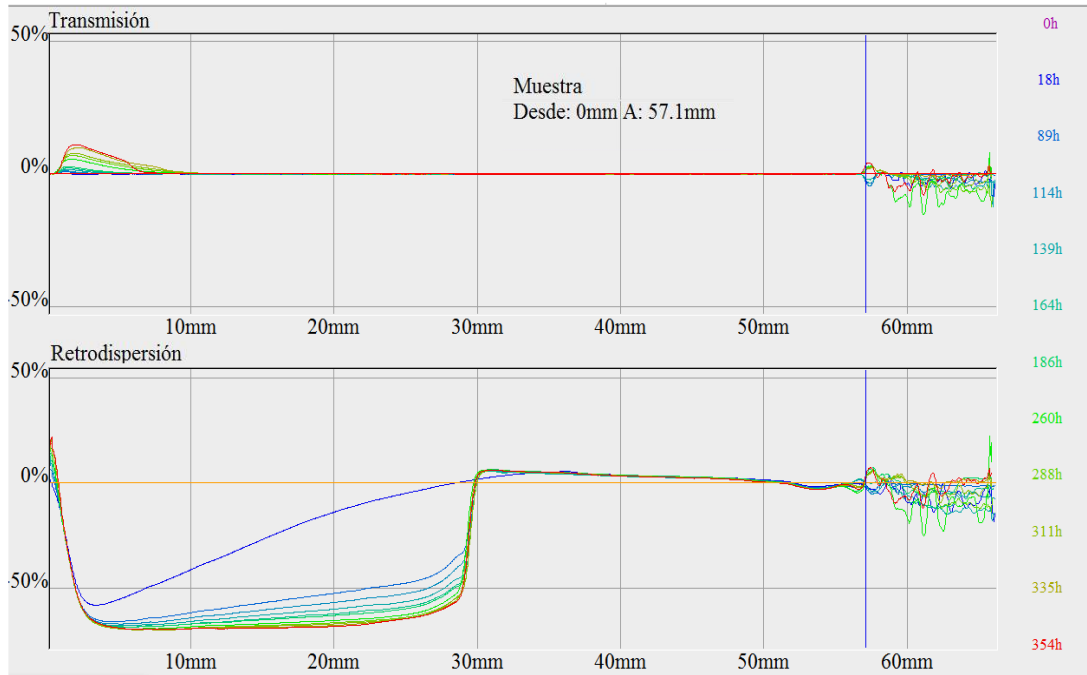


Figura 3.22. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo en modo referencia.

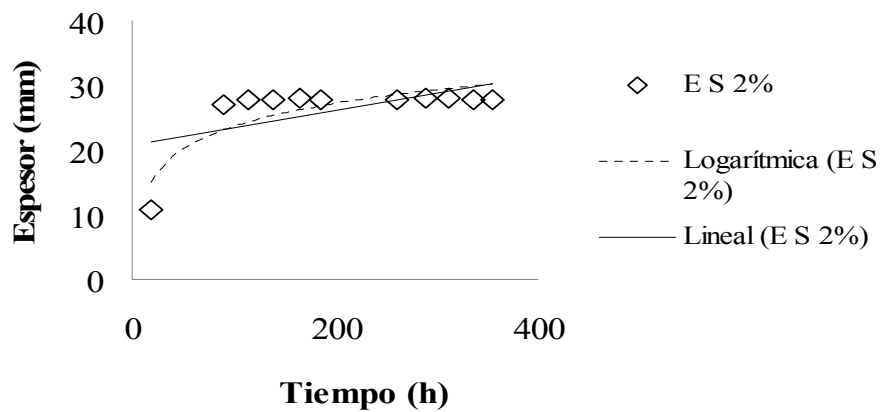


Figura 3.23. Espesor absoluto en la zona de 0 a 30.3 mm de la emulsión con concentrado de suero lácteo al 2%.

### 3.3.2 Caseinato de sodio

En la Figura 3.24 se presenta el barrido obtenido de la muestra de caseinato de sodio al 2%, en modo referencia, al igual que el concentrado de suero lácteo,

también se observó inestabilidad, pero en este caso, en la parte media de la muestra (8.38-35.3 mm), en la gráfica de retrodispersión la desestabilización se evidenció por una disminución en el valor de la retrodispersión en la parte media del tubo, representada por un pico, pero no presenta clarificación debido a que en la gráfica de transmisión no se detecta ningún cambio.

Con el concentrado de suero lácteo se define un solo punto isobéctico, en comparación con el caseinato de sodio, esto indica que el cremado es más inmediato. Hay que recordar que la viscosidad de las emulsiones con caseinato de sodio es mayor.

Para el cálculo de la velocidad de migración de partículas, se procedió a obtener el gráfico de espesor absoluto y se determinó la función que define la dependencia con el tiempo, como se muestra en la Figura 3.25. Esta dependencia presenta un comportamiento logarítmico, el cual indica que la desestabilización de la muestra fue en un inicio rápida y después disminuyó. La Ecuación a la cual se ajusta es:

$$X = m \ln(t) - X_0 \quad (3.1)$$

donde  $X$  es el espesor en mm,  $m$  es la pendiente en (mm/min),  $t$  es el tiempo en min y  $X_0$  es el espesor del fenómeno de desestabilización en el tiempo  $t = 1$  min.

En el Cuadro 3.9, se presentan los parámetros de la función logarítmica. La pendiente de la función, varió menos que el valor  $X_0$ , presentando un coeficiente de variación del 14%. El valor  $X_0$  presenta una gran desviación

estándar entre réplicas, por lo que el coeficiente de variación es muy grande, reflejando la inestabilidad de la muestra con caseinato de sodio únicamente.

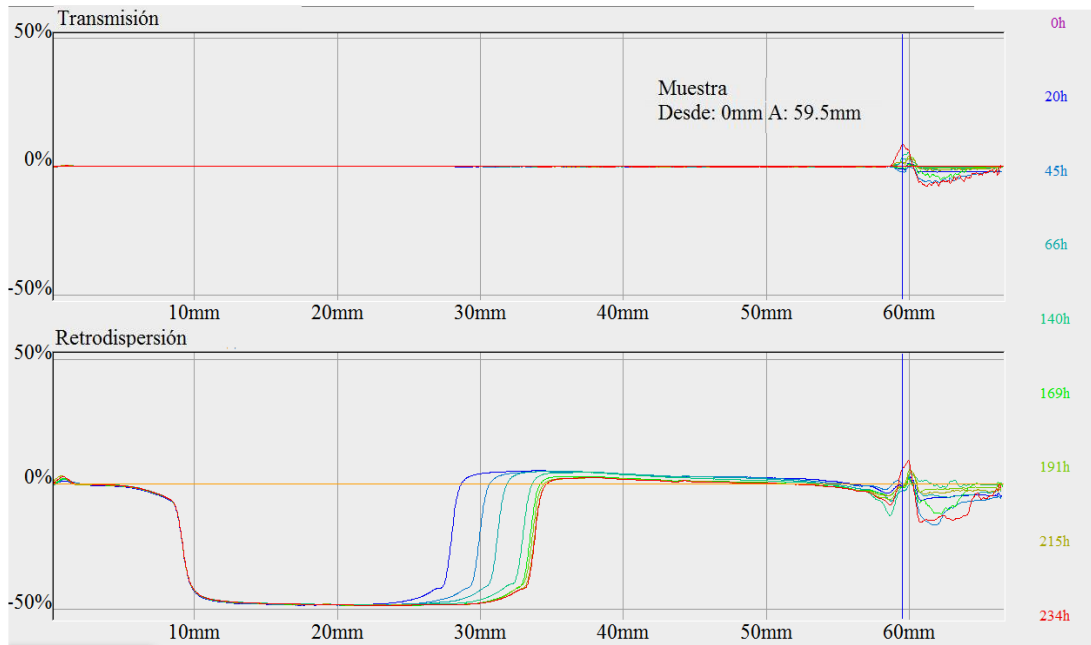


Figura 3.24. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio en modo referencia.

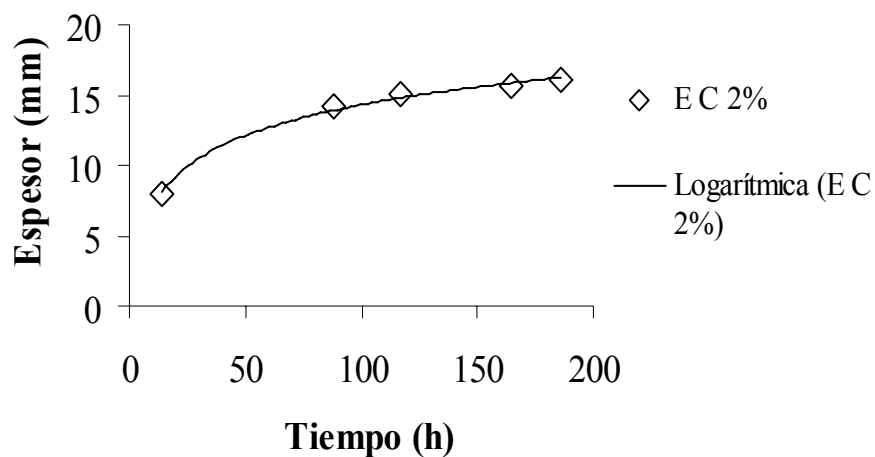


Figura 3.25. Espesor absoluto en la zona de 8.38 a 35.3 mm en la emulsión con caseinato de sodio al 2%.

Cuadro 3.9 Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de la emulsión con caseinato de sodio a 2% de concentración.

	Caseinato de sodio (2%)	
	m ( $\frac{mm}{min}$ )	X <sub>0</sub> (mm)
Promedio	2.72	7.5
Desviación estándar	0.381	7.0
Coefficiente de variación (%)	14.0	94.1

### 3.3.3 Xantana

En las Figuras 3.26 y 3.27 se presentan los barridos de las muestras de emulsiones elaboradas únicamente con xantana a las dos concentraciones estudiadas (0.3 y 0.5%), en modo referencia. En la Figura 3.26 se observa migración de partículas hacia la parte superior de la muestra con 0.3% de xantana, sin presentar clarificación evidente, ya que en el gráfico de transmisión no se presentó ningún cambio a lo largo de éste. Lo anterior se vio reflejado en la parte inferior del tubo, ya que se presenta un aspecto turbio blanco (0-32.4 mm), y por lo tanto una menor retrodispersión de luz, mientras que en la parte superior del tubo (45.7-56.4 mm) se observa el mismo fenómeno pero en menor proporción.

Se observaron también pequeños glóbulos de aceite después de 336 horas en almacenamiento refrigerado, en la superficie de la emulsión, pero no se formó una capa definida de aceite que permitiera dejar pasar el flux de luz, por lo que no se observó cambio alguno en el gráfico de transmisión.

A partir del gráfico de espesor absoluto, se obtuvo la función que define la dependencia con el tiempo, como se muestra en la Figura 3.28. La tendencia es característica del comportamiento lineal, el cual indica que la



desestabilización de la muestra fue proporcional. La ecuación a la cual se ajusta se muestra a continuación (Ecuación 3.2):

$$x = m t + b \quad (3.2)$$

donde  $x$  es el espesor en mm,  $m$  es la pendiente,  $t$  el tiempo y  $b$  es la ordenada al origen.

En el Cuadro 3.10, se presentan los parámetros obtenidos de la función lineal. Sin embargo, los parámetros de la regresión no son repetibles, por lo que se obtienen coeficientes de variación muy grandes. Lo anterior se puede atribuir, a que la muestra al tener únicamente xantana al 0.3% no es lo suficientemente estable.

En la Figura 3.27, se presenta la muestra con mayor concentración de xantana, los perfiles de cambio en este gráfico fueron apenas perceptibles al compararlo con la muestra de 0.3%; los perfiles de transmisión no mostraron diferencias significativas en las 1175 h que duró el análisis. Aparentemente la muestra es más estable, y por lo tanto no se registró transmisión de luz.

En la parte superior del tubo (50-53.5 mm), se observa una posible compactación de la muestra, esto puede ser debido a que la emulsión atrapó burbujas de aire en el llenado, ya que ésta presenta alta consistencia.

Se observa que la emulsión con xantana sola a mayor concentración, dura más tiempo estable que a una menor concentración, y los glóbulos son más pequeños en comparación con los de la emulsión con menor concentración de

xantana, ya que la separación de las líneas en el gráfico de retrodispersión es mayor al comparar la Figura 3.26 con la Figura 3.27.

Visualmente no se observó una clara separación de fases, toda la muestra era blanca homogénea y al igual que en la emulsión de xantana a concentración 0.3%, en la parte superior de la emulsión, se distinguían glóbulos de aceite grandes, resultado de una posible coalescencia.

Al obtener el gráfico de espesor absoluto, no se pudo obtener una tendencia característica entre réplicas, como se muestra en la Figura 3.29. Esto debido a la estabilidad que presentó la emulsión formada únicamente con xantana a una concentración del 0.5%, registrándose valores muy pequeños de espesor ( $< 1$  mm).

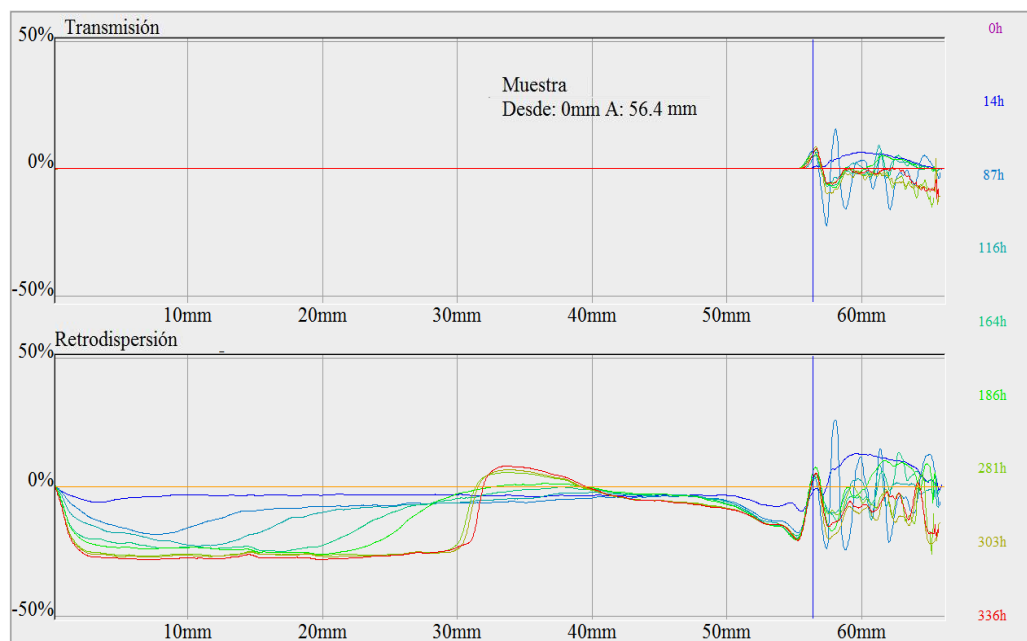


Figura 3.26. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 0.3% de xantana en modo referencia.

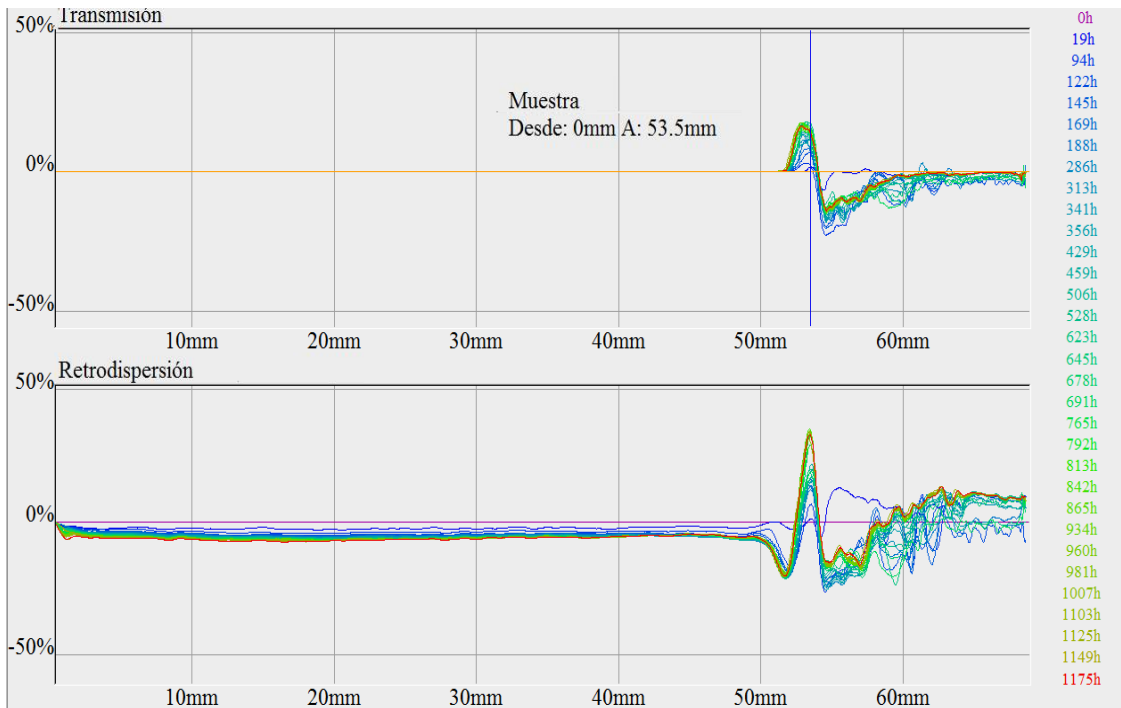


Figura 3.27. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 0.5% de xantana en modo referencia.

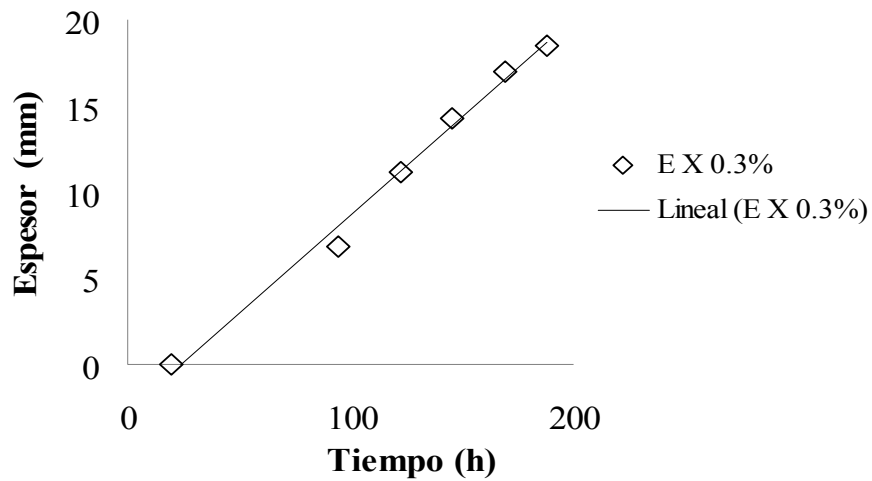


Figura 3.28. Espesor absoluto en la zona de 0 a 32.4 mm en la emulsión con xantana al 0.3%.

Cuadro 3.10 Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de la emulsión con xantana a 0.3% de concentración.

	Xantana (0.3%)	
	m	b
Promedio	0.1279	-0.56
Desviación estándar	0.028	2.19
Coefficiente de variación (%)	22.06	-394.423

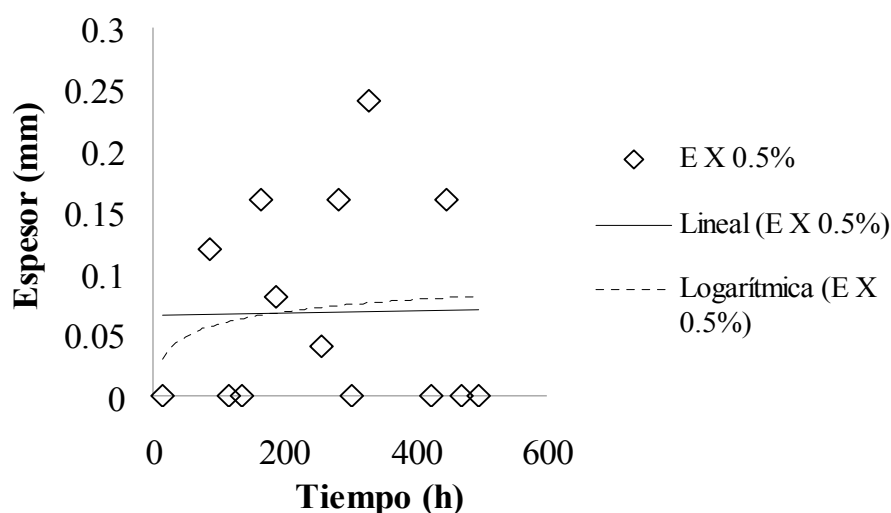


Figura 3.29. Espesor absoluto en la zona de 0 a 1.34 mm en la emulsión con xantana al 0.5%.

### 3.3.4 Concentrado de suero lácteo y xantana

Los barridos presentados en las Figuras 3.30 y 3.32, corresponden a las emulsiones elaboradas con concentrado de suero lácteo a concentración de 2%, en mezcla con xantana a concentraciones de 0.3 y 0.5% respectivamente, en modo absoluto. Las Figuras 3.31 y 3.33 corresponden a los barridos de las mismas emulsiones, pero en modo referencia. Se presentan los barridos en los dos modos, con el fin de compararlos.

Para simplificar la interpretación de los datos, los diferentes mecanismos de desestabilización se indican como valores positivos y negativos. En retrodispersión, los valores positivos son representativos de los fenómenos de sedimentación, mientras que los valores negativos representan un fenómeno de cremado (es decir, hay una clarificación en la parte inferior del tubo) (Tippetts y Martini, 2009).

En la Figura 3.31 se presenta una ligera clarificación de la muestra en la parte inferior del tubo (0-2.53 mm) debido a que posiblemente quedaron burbujas de aire al momento del llenado por lo consistente de la muestra o espacios vacíos entre los glóbulos, y en la parte superior (49.5-52.4 mm) se presenta el mismo fenómeno por compactación de la muestra por gravedad, pero en general ésta se mantuvo estable durante las 1053 horas que estuvo bajo observación, esto se puede ver en la Figura 3.30 en donde se observa que la muestra es estable y que no ocurren cambios perceptibles.

En la Figura 3.33 se observa sedimentación de partículas en la parte inferior del tubo (0-1.81 mm), mientras que en la parte superior no se observó ninguna separación de fases, solamente muestra adherida en la superficie de las paredes del tubo (47.4-56.6 mm) debido a la compactación de ésta por gravedad por su alta consistencia. En la Figura 3.32 en el gráfico de retrodispersión no se observan cambios en la muestra durante las 1053 h que duro el estudio y en el gráfico de transmisión tampoco se presentan cambios, con lo que se puede ver que esta emulsión es estable.

Debido a la estabilidad que presentaron ambas muestras no se realizaron gráficos de espesor absoluto.

Al comparar las emulsiones elaboradas con concentrado de suero lácteo sólo y xantana sola a las dos concentraciones, se muestra que la mezcla de esta proteína con este polisacárido es estable y esta combinación retarda la floculación y/o coalescencia, en contraste con las emulsiones con proteína sola o polisacárido solo, las cuales presentan una gran inestabilidad.

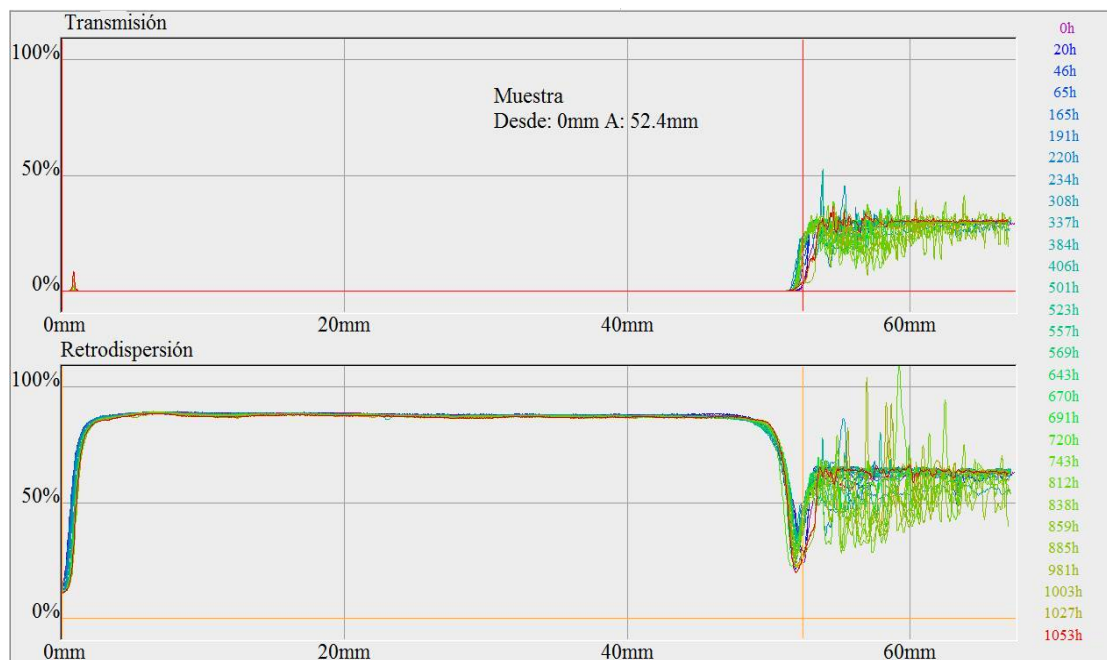


Figura 3.30. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.3% de xantana en modo absoluto.

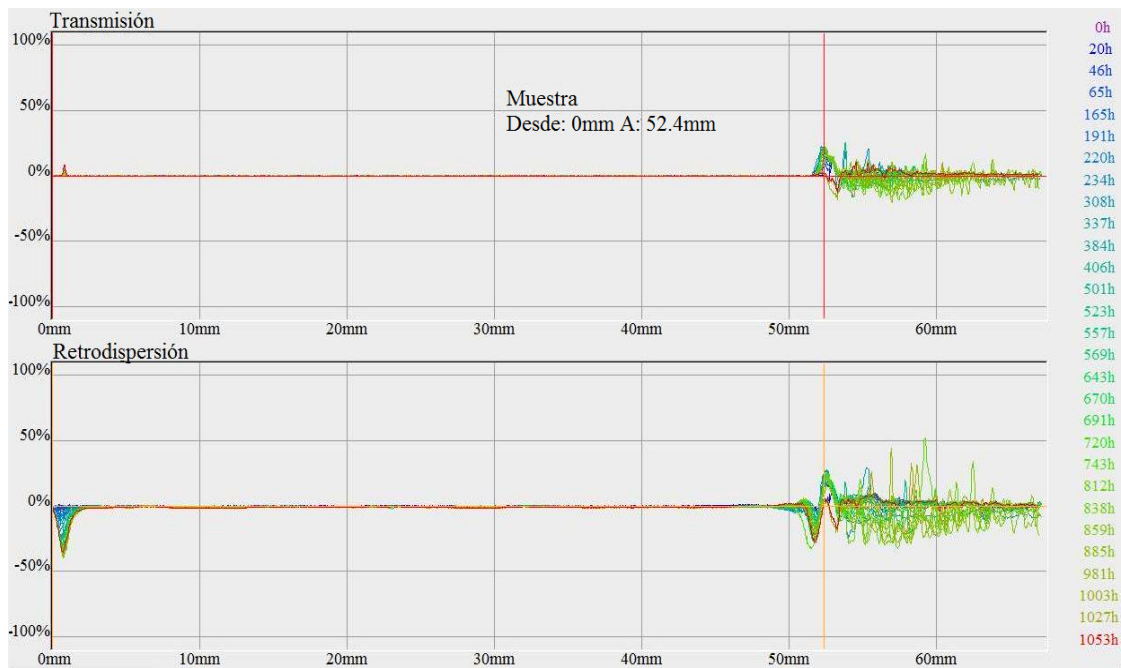


Figura 3.31. Transmisión y retrodispersión de luz en de la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.3% de xantana en modo referencia.

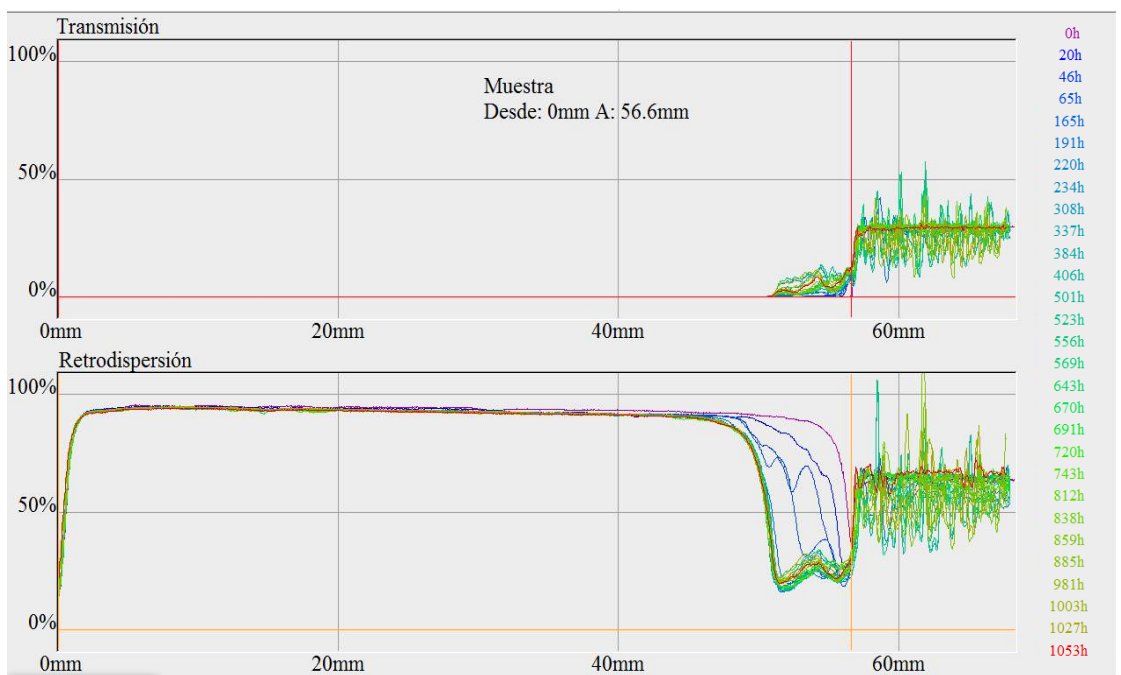


Figura 3.32. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.5% de xantana en modo absoluto.

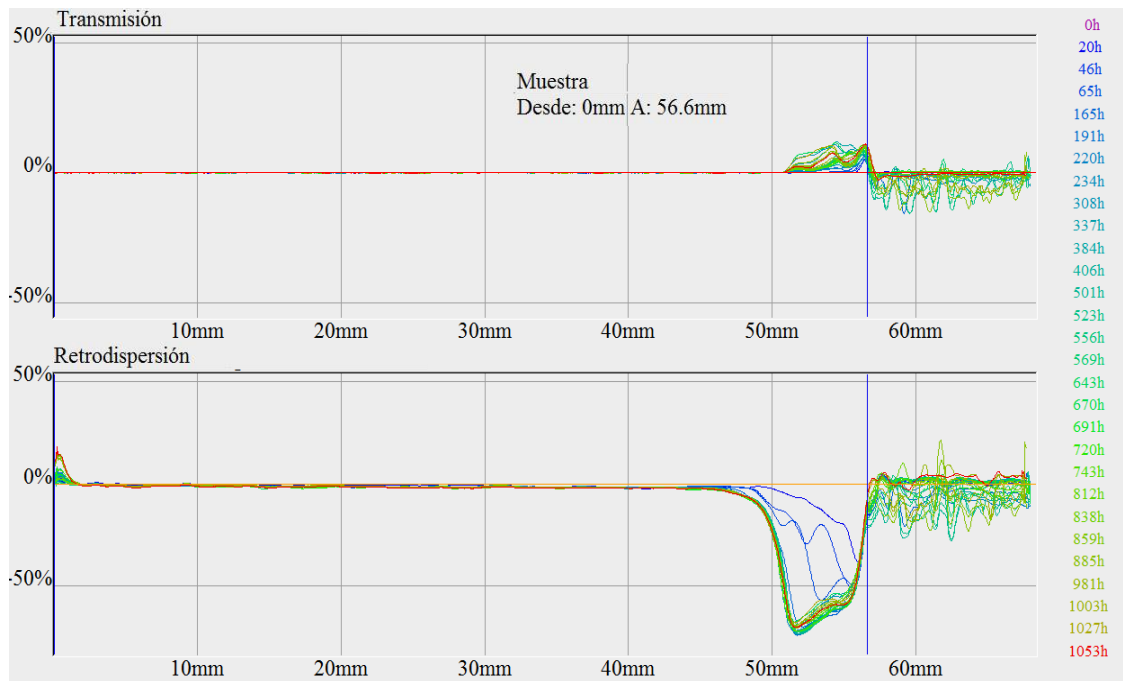


Figura 3.33. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 0.5% de xantana en modo referencia.

### 3.3.5 Caseinato de sodio y xantana

Los barridos presentados en las Figuras 3.34 y 3.36, corresponden a las emulsiones elaboradas con caseinato de sodio a concentración de 2%, en mezcla con xantana a concentraciones de 0.3 y 0.5% respectivamente, en modo absoluto. Las Figuras 3.35 y 3.37 corresponden a los barridos de las mismas emulsiones, pero en modo referencia.

Al comparar las mezclas de caseinato de sodio y xantana con las mezclas de concentrado de suero lácteo y xantana, a las mismas concentraciones estudiadas, se observa que las de caseinato de sodio con xantana a las dos diferentes concentraciones también son estables como se muestra en las Figuras 3.35 y 3.37, ya que la transmisión y retrodispersión se superponen a las líneas de referencia y sólo se observa compactación de la muestra en la



parte superior del tubo, esto se puede corroborar en las Figura 3.34 y 3.36, en donde no se observan cambios perceptibles; como estas mezclas fueron estables, tampoco se obtuvieron los gráficos de espesor absolutos.

En las emulsiones aceite en agua, conteniendo caseinato de sodio, la adición de xantana en concentraciones bastante bajas (0.01%) ha sido demostrado que aumenta la velocidad de cremado de los glóbulos de la emulsión, lo que es debido aparentemente a la floculación de glóbulos dispersos. Aunque la causa exacta de la floculación no es conocida, los mecanismos de agotamiento han sido sugeridos por un número de investigadores (Gunning y col., 1988; Luyten y col., 1993; Dickinson y col., 1994). La adición de una concentración relativamente alta (0.2%) de xantana a la emulsión se cree que disminuye la velocidad de cremado, por el incremento en la viscosidad aparente de la fase continua, lo cual retarda el movimiento de los glóbulos de aceite dispersos (Hemar y col., 2001).

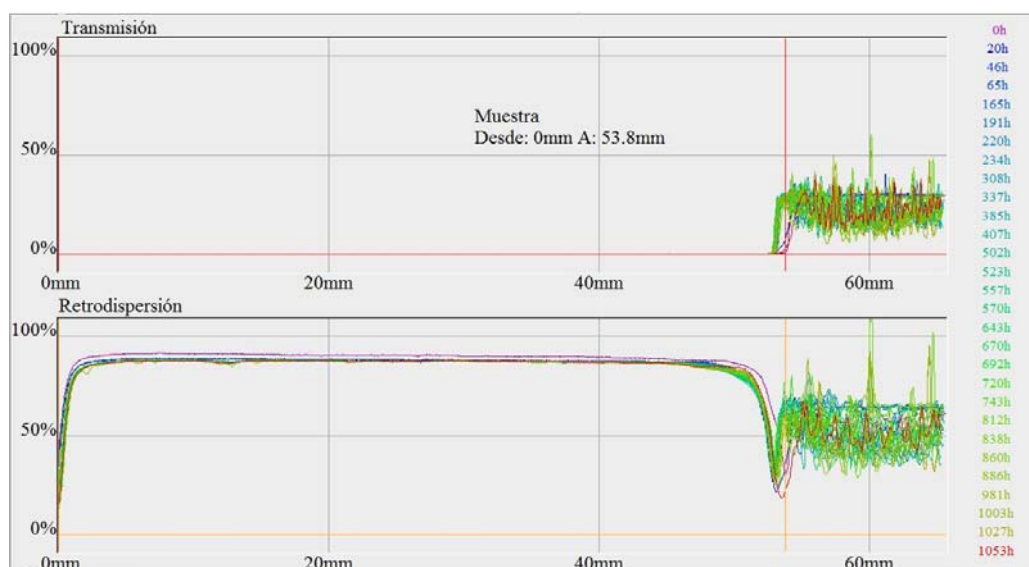


Figura 3.34. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 0.3% de xantana en modo absoluto.

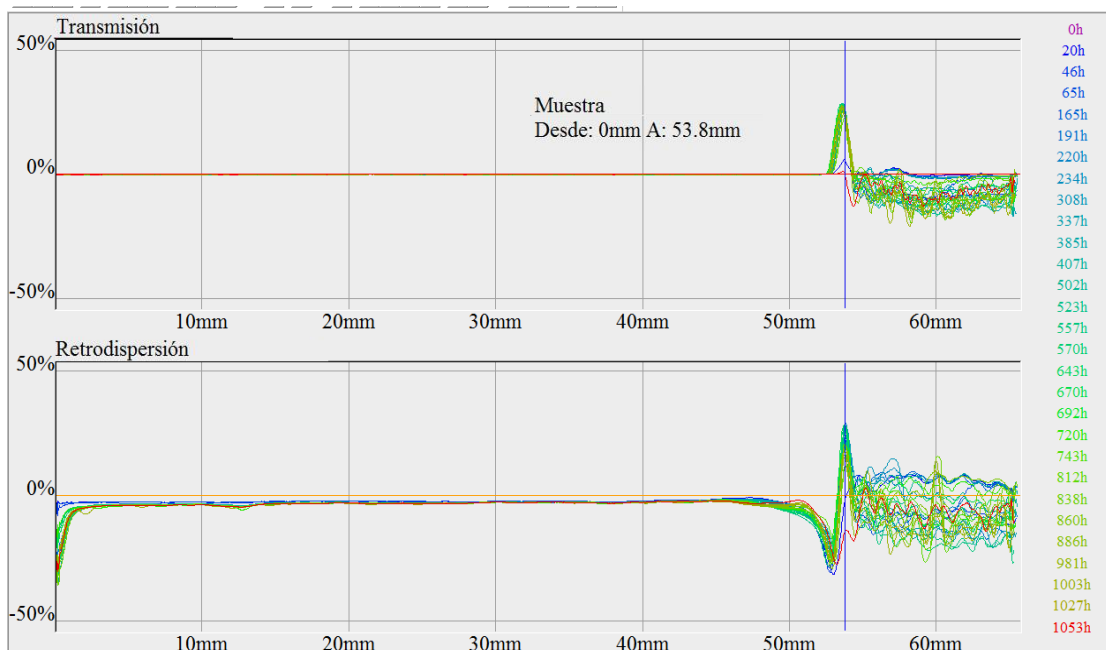


Figura 3.35. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 0.3% de xantana en modo referencia.

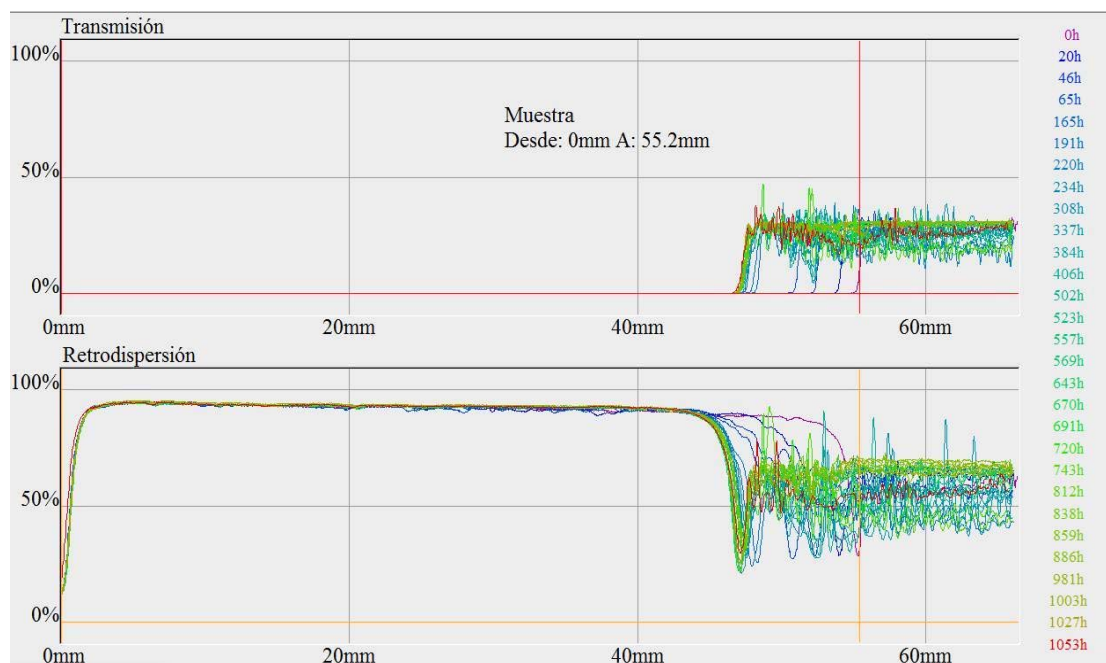


Figura 3.36. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 0.5% de xantana en modo absoluto.

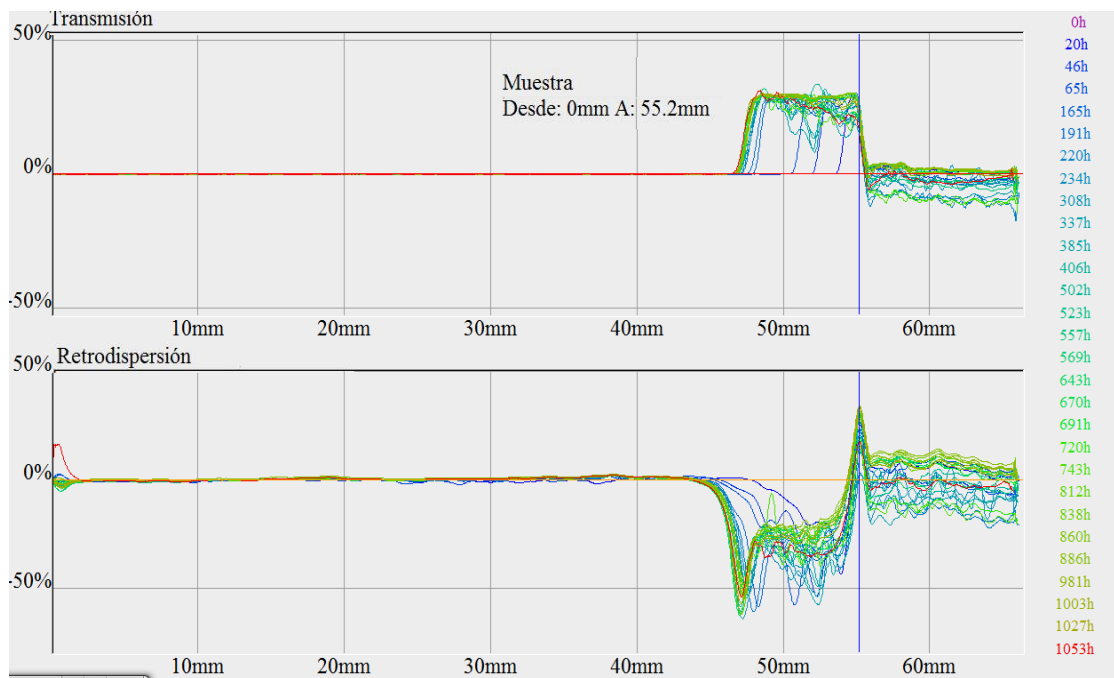


Figura 3.37. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 0.5% de xantana en modo referencia.

### 3.3.6 Goma arábica

En las Figuras 3.38 y 3.39 se presentan los barridos obtenidos de las emulsiones de goma arábica sola al 7.5 y 10% de concentración respectivamente, en ambas figuras se observa clarificación, pero a la concentración de 7.5% es mayor la zona, ya que la clarificación en ésta va desde 0 a 20.2 mm y en la concentración más alta es de 0 a 8.53 mm. La muestra a concentración de 7.5% de goma arábica presentó una mayor transmisión que en la concentración más alta, en donde el pico tiene un mayor porcentaje de luz transmitida, esto se ve reflejado en la inestabilidad y poca consistencia de las muestras. El cambio que se observa al final de la muestra de la gráfica de retrodispersión en ambas figuras representa muestra adherida en las paredes del tubo.

Aún con la inestabilidad que presentan las emulsiones formadas, se pudieron obtener los gráficos de espesor absoluto y se obtuvo la función que define la dependencia con el tiempo, como se muestra en la Figura 3.40 y 3.41. La tendencia en ambos casos es característica del comportamiento lineal, el cual indica que la desestabilización de la muestra fue proporcional. La ecuación a la cual se ajustan es la Ecuación 3.2.

En el Cuadro 3.11 se presentan los parámetros obtenidos de la función lineal. Sin embargo, los parámetros de la regresión tampoco son repetibles, por lo que se obtienen coeficientes de variación muy grandes. Lo anterior se puede atribuir, a que la muestra al tener únicamente arábica no es lo suficientemente estable.

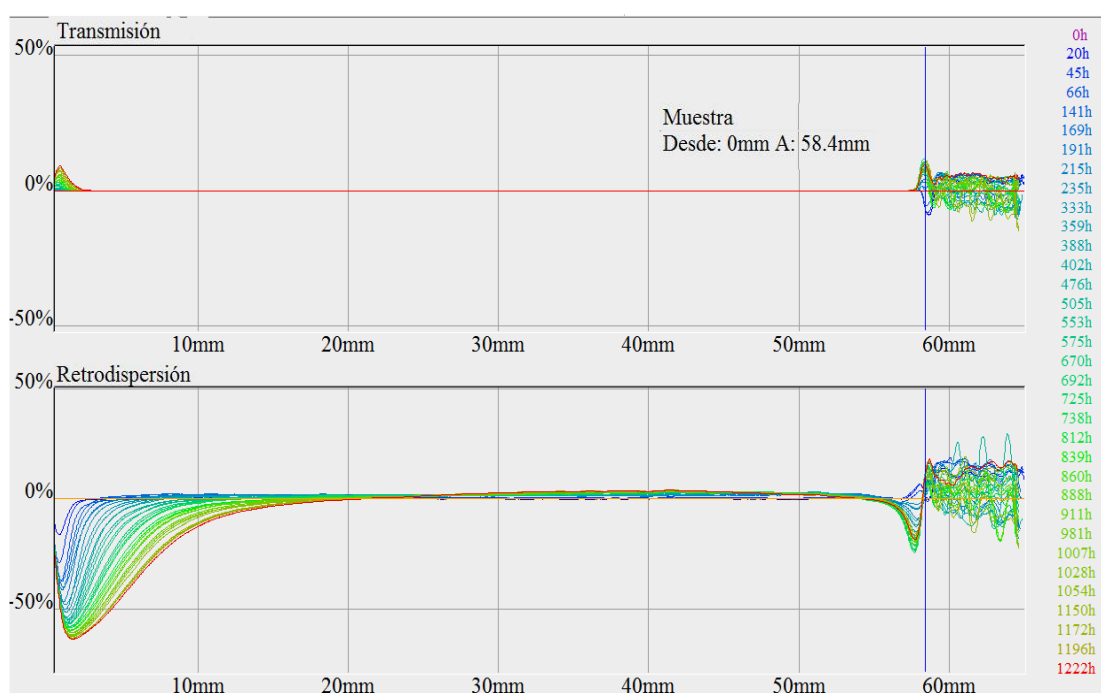


Figura 3.38. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 7.5% de goma arábica en modo referencia.

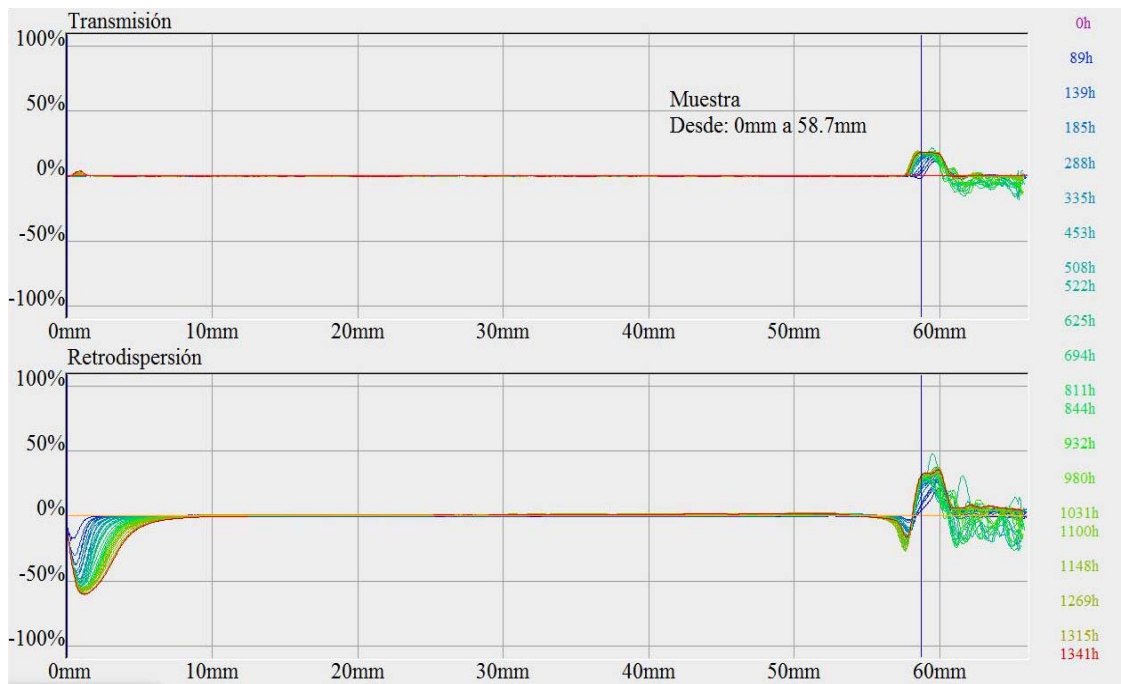


Figura 3.39. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 10% de goma arábica en modo referencia.

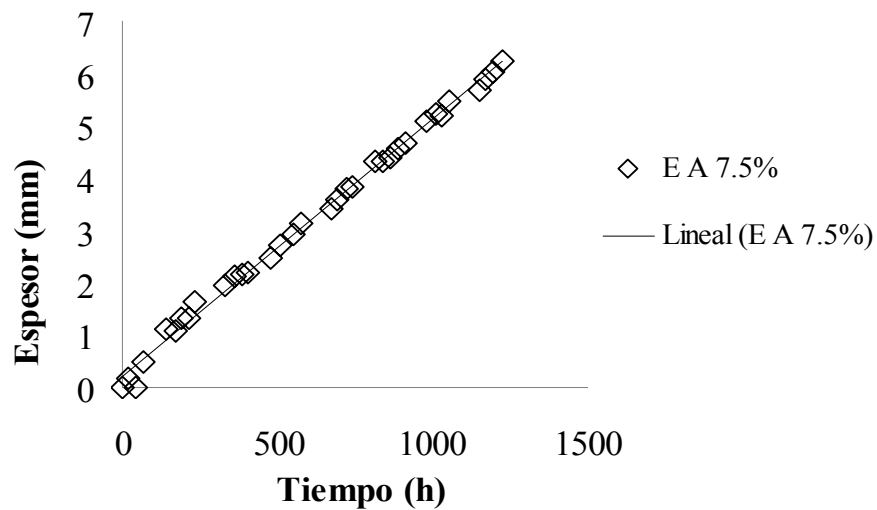


Figura 3.40. Espesor absoluto en la zona de 0 a 20.2 mm en la emulsión con goma arábica al 7.5%.

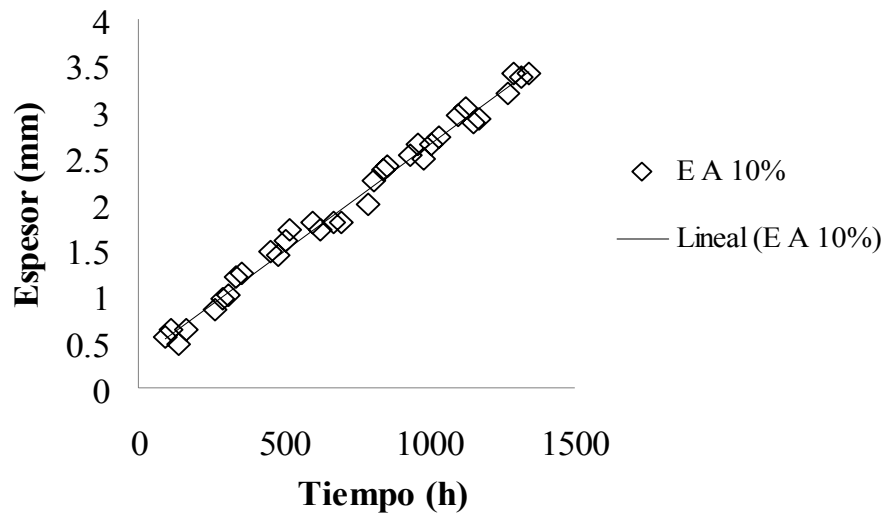


Figura 3.41. Espesor absoluto en la zona de 0 a 8.53 mm en la emulsión con goma arábica al 10%.

Cuadro 3.11. Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de la emulsión con goma arábica a 7.5% y 10% de concentración.

	Goma arábica (7.5%)		Goma arábica (10%)	
	m	b	m	b
Promedio	0.005	0.08	0.003	0.13
Desviación estándar	0.0003	0.04	0.0007	0.15
Coefficiente de variación (%)	6.5	46.9	24.6	114.8

### 3.3.7 Concentrado de suero lácteo y goma arábica

Los barridos presentados en las Figuras 3.42 y 3.43, corresponden a las emulsiones elaboradas con concentrado de suero lácteo a concentración de 2%, en mezcla con goma arábica a concentraciones de 7.5 y 10% respectivamente, en modo referencia.

En la Figura 3.42 se observa inestabilidad en la muestra que contiene suero lácteo y goma arábica al 7.5%, por la separación de fases y migración de partículas hacia la parte superior del tubo, por lo que se observa transmisión

en la parte inferior del tubo, visualmente se observó líquido transparente, el cual dejó pasar el flux de luz que atravesó la muestra.

La Figura 3.43, la muestra con mayor concentración de goma arábica (10%), presenta migración de partículas hacia la parte superior, pero esta muestra no presentó transmisión, debido a que la separación de fases no fue tan marcada.

Las emulsiones elaboradas con goma arábica sola al igual que las emulsiones elaboradas únicamente con concentrado de suero lácteo presentaron inestabilidad y al mezclar este polisacárido con la proteína se puede observar que también hay inestabilidad.

La desestabilización en las dos muestras se evidenció por una disminución (clarificado) en el valor de la retrodispersión en la parte inferior del tubo, representada por un pico.

Se obtuvieron los gráficos de espesor absoluto y se determinó la función que define la dependencia con el tiempo, como se muestra en las Figuras 3.44 y 3.45, la tendencia característica de ambas muestras es logarítmica y se ajusta a la Ecuación 3.1.

En el Cuadro 3.12 se presentan los parámetros de la función logarítmica. La pendiente de la función, varió menos que el valor  $X_0$ , ésta aumenta al aumentar la concentración de goma arábica. El valor  $X_0$  presenta una gran desviación estándar entre réplicas, por lo que el coeficiente de variación es muy grande, reflejando la inestabilidad de la muestra.

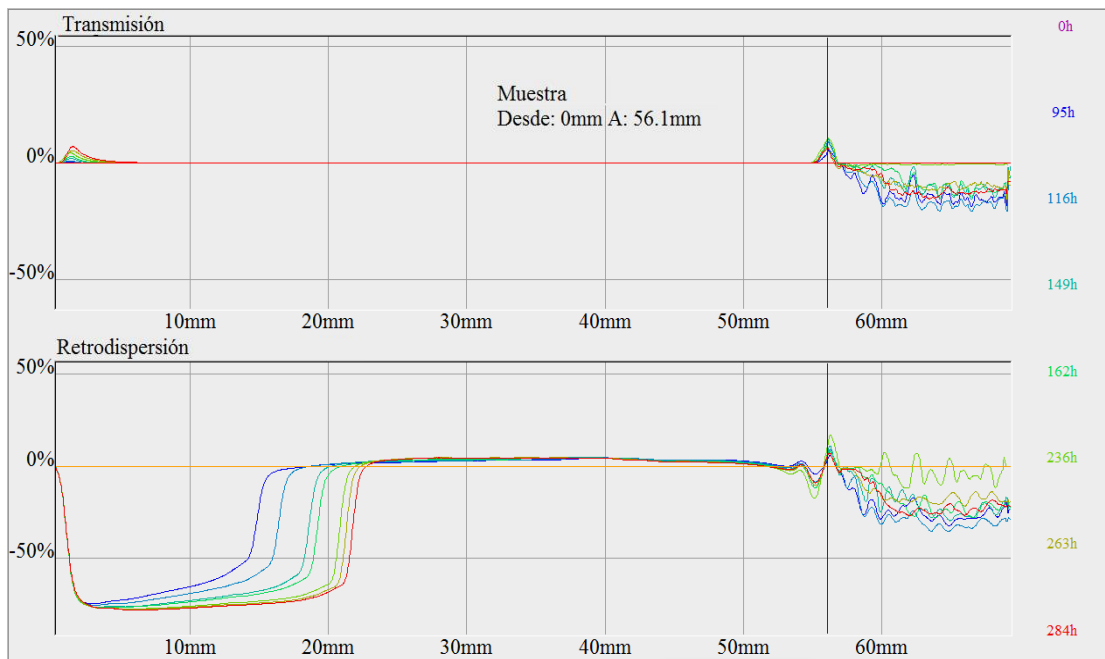


Figura 3.42. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 7.5% de goma arábica en modo referencia.

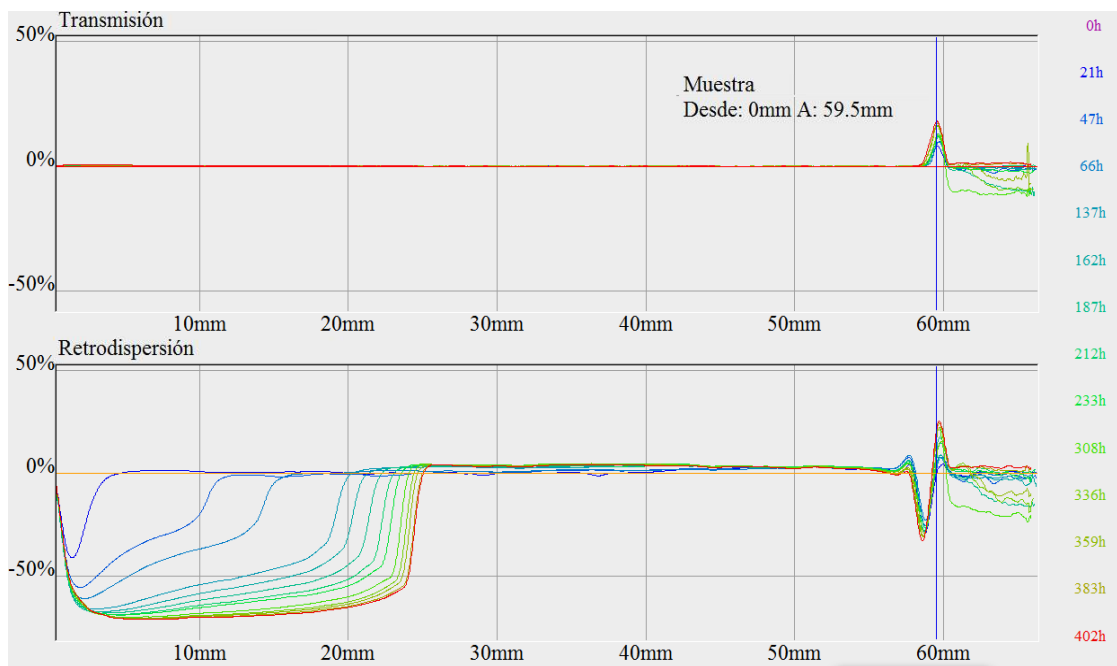


Figura 3.43. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de concentrado de suero lácteo y 10% de goma arábica en modo referencia.



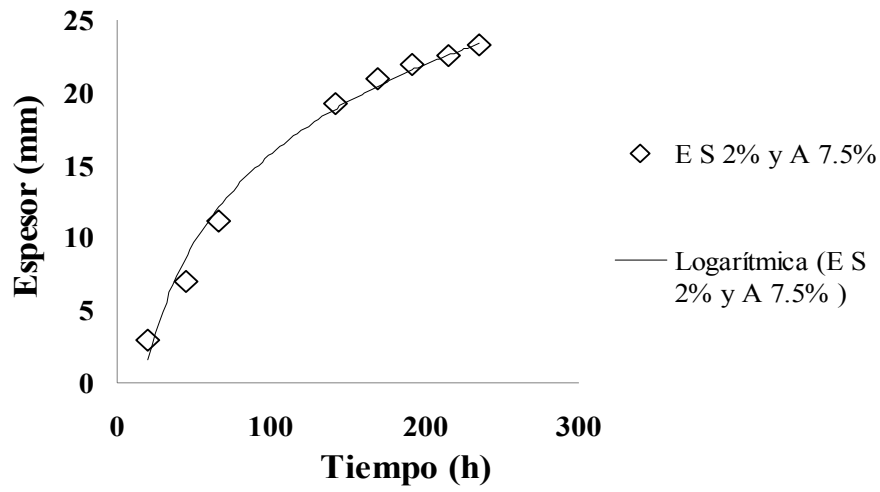


Figura 3.44. Espesor absoluto en la zona de 0 a 23.1 mm en la emulsión con concentrado de suero lácteo al 2% y goma arábica al 7.5%.

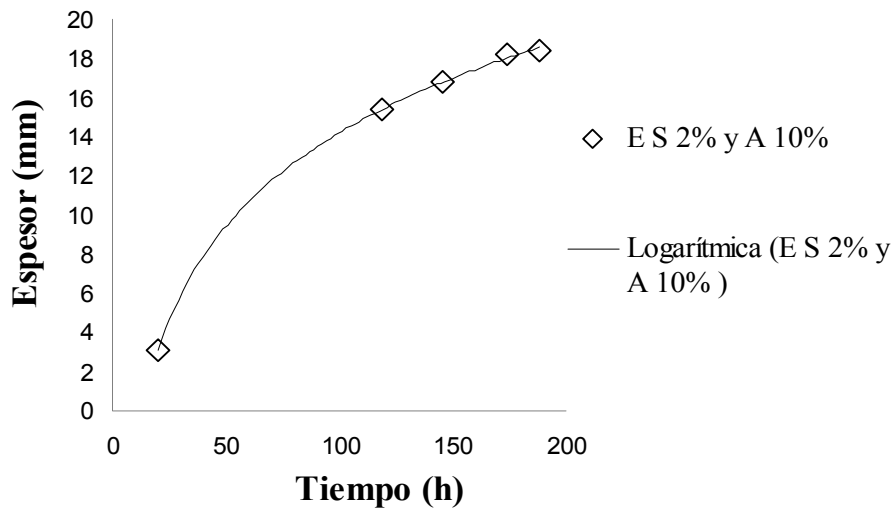


Figura 3.45. Espesor absoluto en la zona de 0 a 25.68 mm en la emulsión con concentrado de suero lácteo al 2% y goma arábica al 10%.

Cuadro 3.12. Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de las emulsiones con concentrado de suero lácteo a 2% y goma arábica a 7.5% y 10% de concentración.

	Goma arábica (7.5%) y Concentrado de suero lácteo (2%)		Goma arábica (10%) y Concentrado de suero lácteo (2%)	
	$m \left( \frac{mm}{min} \right)$	$X_0 (mm)$	$m \left( \frac{mm}{min} \right)$	$X_0 (mm)$
Promedio	6.31	-14.95	6.65	-16.6
Desviación estándar	2.22	10.65	1.14	5.33
Coefficiente de variación (%)	35.16	-71.21	17.198	-32.08

### 3.3.8 Caseinato de sodio y goma arábica

En las Figuras 3.46 y 3.47 se presentan las emulsiones con caseinato de sodio y goma arábica, se observa que la muestra no dura ni un día estable (24 horas), hay aumento en el tamaño de las partículas y separación de fases ya que el flux de luz atravesó la muestra presentándose un aumento de la señal de transmisión en la parte inferior de la muestra, lo que indica que esta zona empezó el clarificado; visualmente la muestra se veía blanco turbio muy claro. Al igual que en la mezcla de concentrado de suero lácteo con arábica esta mezcla es inestable, por lo cual, este polisacárido no es compatible con las proteínas lácteas.

A pesar de la gran inestabilidad que presentan las emulsiones formadas, se pudieron obtener los gráficos de espesor absoluto y se determinó la función que define la dependencia con el tiempo, como se muestra en las Figuras 3.48. y 3.49, la tendencia característica es logarítmica y se ajusta a la Ecuación 3.1.

En el Cuadro 3.13, se presentan los parámetros de la función logarítmica de ambas emulsiones. La pendiente de la función disminuye cuando la concentración de goma arábica aumenta, contrario a lo que pasó con las mezclas de concentrado de suero lácteo en mezcla con goma arábica. El valor  $X_0$  presenta una gran desviación estándar entre réplicas, por lo que el coeficiente de variación es grande, reflejando la inestabilidad de la muestra.

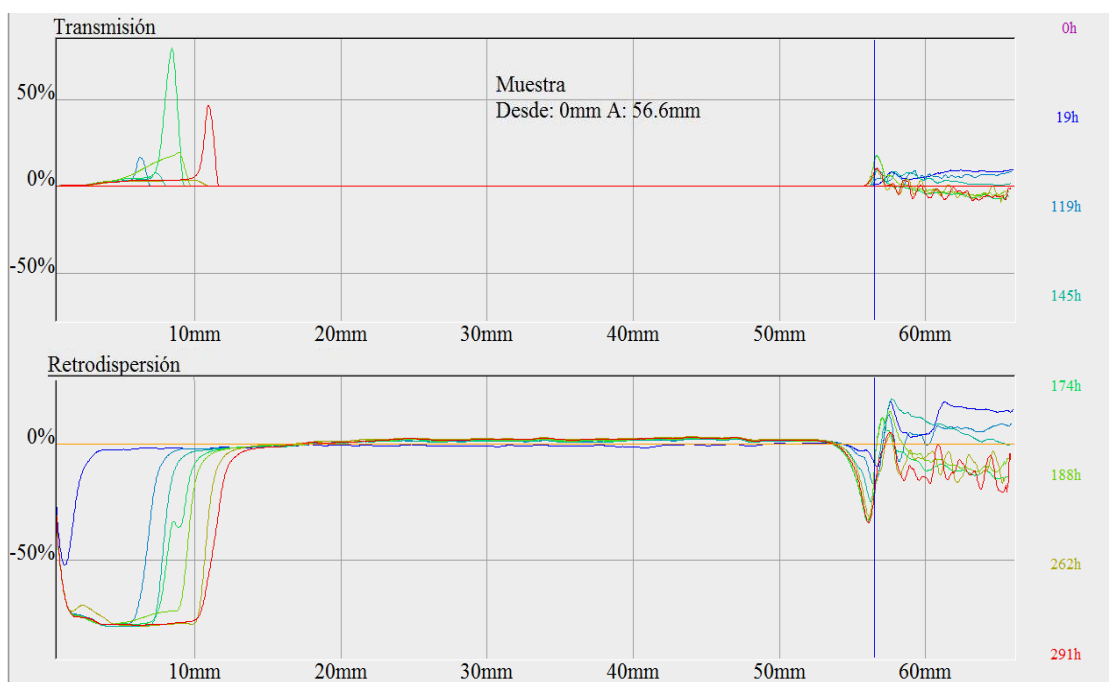


Figura 3.46. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 7.5% de goma arábica en modo referencia.

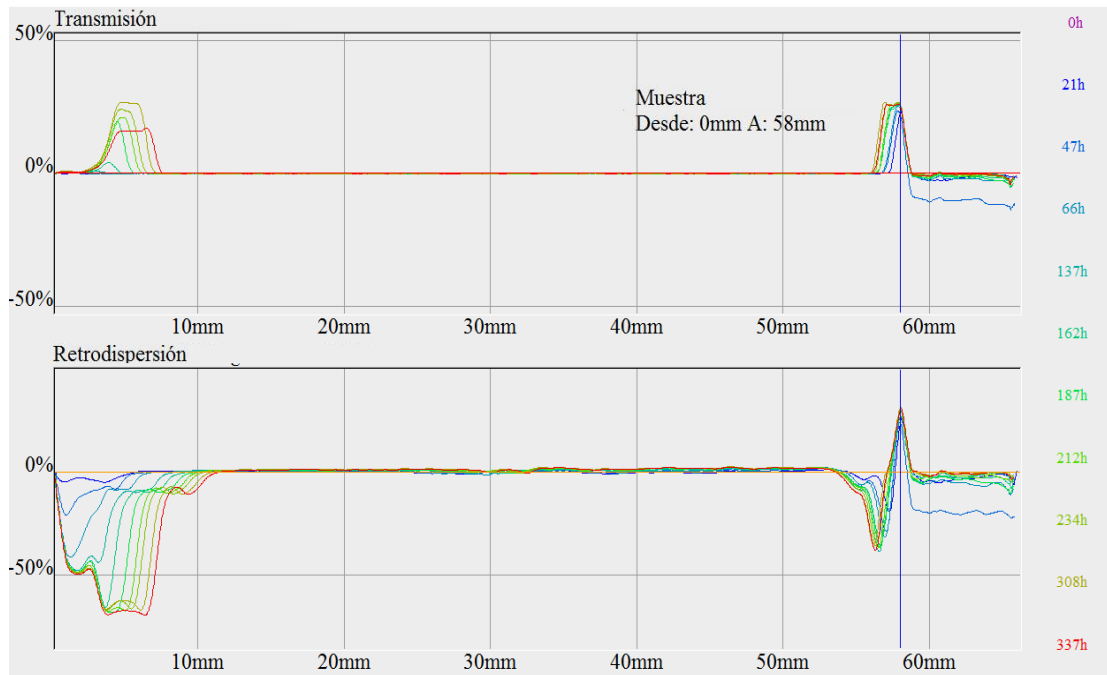


Figura 3.47. Transmisión y retrodispersión de luz en la emulsión elaborada con 2% de caseinato de sodio y 10% de goma arábica en modo referencia.

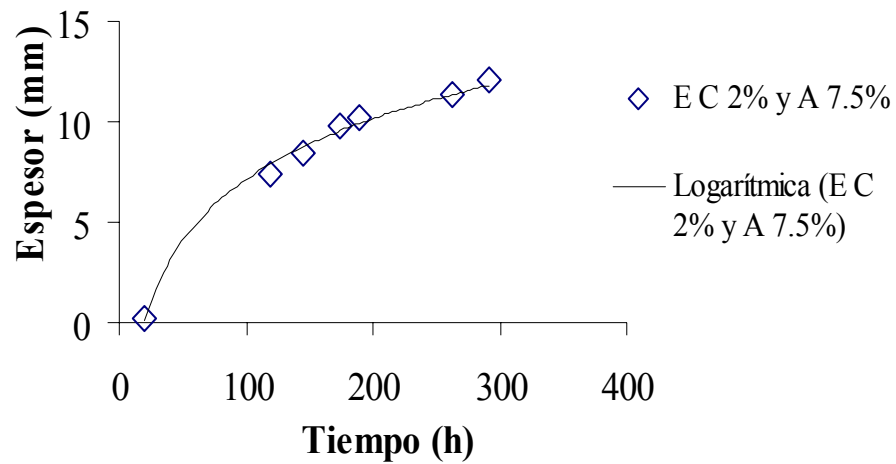


Figura 3.48. Espesor absoluto en la zona de 0 a 12.82 mm en la emulsión con caseinato de sodio al 2% y goma arábica al 7.5%.

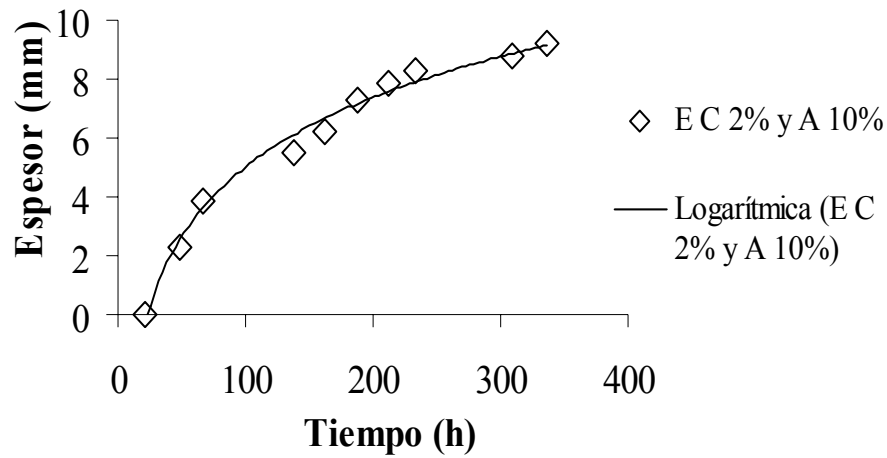


Figura 3.49. Espesor absoluto de la zona de 0 a 11.2 mm en la emulsión con caseinato de sodio al 2% y goma arábica al 10%.

Cuadro 3.13. Parámetros de la dependencia del espesor en función del tiempo de las emulsiones con caseinato de sodio a 2% y goma arábica a 7.5% y 10% de concentración.

	Goma arábica (7.5%) y Caseinato de sodio (2%)		Goma arábica (10%) y Caseinato de sodio (2%)	
	$m \left( \frac{mm}{min} \right)$	$X_0 (mm)$	$m \left( \frac{mm}{min} \right)$	$X_0 (mm)$
Promedio	3.96	-13.19	3.543	-10.37
Desviación estándar	1.46	6.33	0.42	0.56
Coefficiente de variación (%)	36.75	-48.001	11.85	-5.43

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado que la reología en combinación con la dispersión de luz a través de la muestra, proporciona información útil para monitorear la evolución de la estabilidad de emulsiones elaboradas con proteínas de suero lácteas y estabilizadas con xantana o goma arábica.

Se observó que las mezclas de las proteínas lácteas con xantana tienen una mayor consistencia que las mezclas de estas proteínas con goma arábica y presentaron una mayor estabilidad, ya que las concentraciones de xantana utilizadas son relativamente altas, lo que disminuye la velocidad de cremado por el incremento de la viscosidad aparente de la fase continua, la cual retarda el movimiento de los glóbulos de aceite dispersos e inmoviliza la estructura.

Mientras que las emulsiones de las mezclas de proteínas lácteas con goma arábica tienen una viscosidad baja, cercana a la del agua y presentaron inestabilidad debido a que la goma arábica compite con las proteínas lácteas por la interface aceite-agua. Si se pretendiera utilizar a la goma arábica como espesante, se requieren concentraciones relativamente altas para formar emulsiones estables. Las emulsiones elaboradas únicamente con las proteínas lácteas presentaron inestabilidad al igual que las emulsiones elaboradas con goma arábica sola, al mezclar este polisacárido con las proteínas se puede observar que también hay inestabilidad. La migración de partículas en las emulsiones con arábica sola se presentó después de unos días y en las emulsiones elaboradas únicamente con proteínas lácteas y de la mezcla de arábica con las proteínas ocurrió en pocas horas evitando que se pudiera hacer

el seguimiento durante un mes, por lo cual, este polisacárido no es compatible con las proteínas lácteas en las concentraciones utilizadas.

En las emulsiones elaboradas únicamente con xantana también se observó inestabilidad y la migración de partículas ocurrió después de unos días, por lo cual tampoco se pudo hacer el seguimiento durante un mes; mientras que las emulsiones elaboradas con este polisacárido en mezcla con las proteínas fueron estables al no presentar una separación de fases, por lo que se realizó durante un mes el seguimiento del estudio de la estabilidad.

Se muestra que las propiedades de las emulsiones y su estabilidad se ven afectadas por las propiedades de polisacáridos, debido a que los niveles de concentración de éstos definen el comportamiento reológico y la estabilidad de las emulsiones, ya que cuando se dispersa xantana en agua, forma dobles hélices que se agregan en complejos o redes simples a través de puentes de hidrogeno y polímeros entrelazados dando estructuras altamente ordenadas y entrelazadas. La arábica puede formar una membrana interfacial que proporciona estabilidad contra la agregación de los glóbulos, sin embargo su actividad de superficie no fue adecuada, debido a la competencia con las proteínas lácteas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badui, S. 2006. *Química de los alimentos*. 4° ed., México. Pearson.
- Baltes, W. 2007. *Química de los alimentos*. España. Acribia.
- Barnes, H. A. 2004. *The rheology of emulsions. Emulsions: structure, stability and interactions*. USA. Academic press.
- Belitz, H. D., Grosch, W. 1997. *Química de los alimentos*. 2° ed. España. Acribia.
- Bourne, M. 1982. *Food texture and viscosity*. USA. Academic press Inc.
- Carrera, C., Rodríguez, J. 2005. Interfacial, foaming and emulsifying characteristics of sodium caseinate as influenced by protein concentration in solution. *Food Hydrocolloids*, 19, 407-416.
- Charalambous, G., Doxastakis, G. 1989. *Food emulsifiers*. Chemistry, technology, functional properties and application. EUA. Elsevier.
- Cheftel, J. C., Cheftel, H., Besançon, P. 1989a. *Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos*. Vol. II. España. Acribia.
- Cheftel, J. C., Cuq, J. L., Lorient, D. 1989b. *Proteínas alimentarias (bioquímica - Propiedades funcionales - Valor nutricional. Modificaciones químicas)*. España. Acribia.
- Damodaran, S. Paraf, A. 1997. *Food proteins and their applications*, USA. Marcel Dekker, Inc.
- Dumitriu, S. 2005. *Polisaccharides Structural diversity and functional versatility*. 2° ed. USA. Marcel Dekker.
- Fenema, O., 1985. *Food chemistry*. 2° ed., USA. Marcel Dekker.
- Friberg, S., Larsson, K. 1997. *Food emulsions*, 3° ed., USA. Marcel Dekker inc.



- Hemar, Y., Tamehana, M., Munro, P., Singh, H. 2001. Influence of xanthan gum on the formation and stability of sodium caseinate oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 15, 513-519.
- Ibanoglu, E. 2002. Rheological behavior of whey protein stabilized emulsions in the presence of gum arabic. *Journal of Food Engineering*, 52, 273-277.
- Lapasin, R., Priel, S. 1999. *Rheology of industrial polysaccharides*. USA. Aspen Publishers.
- Leal-Calderón F., Thivilliers. F., Schmitt, V. 2007. Structured emulsions. *Current opinion in interface science*, 12, 206-212.
- Lemarchand, C., Courier, P., Vauthier, C., Costantini, D., Gref, R. 2003. Study of emulsion stabilization by graft copolymers using the optical analyzer Turbiscan, *International Journal of Pharmaceutics*, 254, 77-82.
- Maldonado, J., Martín, A., Gálvez, M., Miller, R., Langevin, D., Cabrerizo, M. 2008. Foams and emulsions of  $\beta$ -casein examined by interfacial rheology. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and engineering Aspects*, 323, 116-122.
- McClements, D. 2004. Protein-stabilized emulsions. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 9, 305-313.
- McClements, D. 2005. *Food emulsions. Principles, practice and techniques*. 2<sup>o</sup> ed., USA. CRC Press.
- McKenna, B. 2003. *Texture in food volume 1: semi-solid foods*. Inglaterra. woodhead publishing Ltd and CRC press LLC.
- Mengual, O., Meunier, G., Cayré, I., Puech, K., Snabre, P. 1999. Turbiscan MA 2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsions and suspensions instability analysis. *Talanta*, 50, 445-456.
- Moschakis, T., Murray, B., Dickinson, E. 2005. Microstructural evolution of

viscoelastic emulsions stabilized by sodium caseinate and xanthan gum. *Journal of Colloid and Interface Science*, 284, 714-728.

Novales, B., Papineau, P., Sire, A., Axelos, M.V. 2003. Characterization of emulsions and suspensions by video image analysis. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and engineering Aspects*, 221, 81-89.

Pérez, A., Carrara, C., Carrera, C., Rodríguez, J. 2009. Interactions between milk whey protein and polysaccharide in solution. *Food Chemistry*, 104-113.

Pizzino, A., Catté, M., Van Hecke, E., Salager, J., Aubry, J. 2009. On line light backscattering tracking of the transitional phase inversión of emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and engineering Aspects*, 338, 148-154.

Prakash, A., Joseph, M., Mangino, M. E. 1990. The effects of added proteins on the functionality of gum arabic in soft drink emulsion system. *Food Hydrocolloids*, 4,177-184.

Sharma, R., Zakora, M., Qvist, K. 2002. Characteristics of oil-water emulsions stabilised by an industrial emulsification, by a microbial transglutaminase. *Food Chemistry*, 79, 493-500.

Sjöblom, J. 2006. *Emulsions and emulsion stability*, 2<sup>o</sup> ed., USA. CRC Press.

Steffe, J. 1996. *Rheological methods in food process engineering*, 2<sup>o</sup> ed., USA. Freeman Prees.

Sun, C., Gunasekaran, S. 2009. Effects of protein concentration and oil-phase volume fraction on the stability and rheology of menhaden oil-in-water emulsions stabilized by whey protein isolate with xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 23, 166- 173.

Sun, C., Gunasekaran, S., Richards, M. 2007. Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 21, 554- 564.

Tippetts, M., Martini, S. 2009. Effect of cooling on lipid crystallization in oil-

in-water emulsions. *Food Research International*, 42, 847-855.

Wulff, M., Torcello, A., Gálvez, M., Martín, A. 2009. Stability of emulsions for parenteral feeding: Preparation and characterization of o/w nanoemulsions with natural oils and Pluronic F68 as surfactant. *Food Hydrocolloids*, 23, 1096-1102.