



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**“ESTABILIDAD DE EMULSIONES ACEITE-AGUA  
ELABORADAS CON LA MEZCLA ALBÚMINA DE HUEVO  
- POLISACÁRIDO (CARRAGENINA  $\lambda$ , TRAGACANTO)”**

## TESIS

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

**PRESENTA:**  
**NANCY HERNÁNDEZ SÁNCHEZ**

**ASESORAS:**  
**M. EN C. JULIETA GONZÁLEZ SÁNCHEZ**  
**DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
U. N. A. M.  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**



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

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

Estabilidad de emulsiones aceite-agua elaboradas con la mezcla albúmina de huevo-polisacárido (carragenina  $\lambda$ , tragacanto)

Que presenta la pasante: Nancy Hernández Sánchez  
Con número de cuenta: 300843730 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 ESPÍRITU”**  
Cuautitlán Izcallí, Méx. a 14 de junio de 2011.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	I.A. Francisco Javier López Martínez	
<b>VOCAL</b>	M.C. Leticia Zúñiga Gómez	
<b>SECRETARIO</b>	M.C. Julieta González Sánchez	
<b>1er SUPLENTE</b>	I.A. Miriam Edith Fuentes Romero	
<b>2do SUPLENTE</b>	I.A. Fátima Abigail Galván Ballesteros	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).  
HHA/pm

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios,*

*Por darme salud y permitirme alcanzar esta meta a lado de mis seres queridos.*

*A mis padres Lucia y Guillermo,*

*Porque con su amor, esfuerzo, enseñanzas, consejos y apoyo han hecho posible que el día de hoy sea la persona que soy; gracias por todo los amo.*

*A mis hermanas Tayde y Jessica,*

*Que me han acompañado a lo largo de la vida y que me han enseñado tantas cosas, agradezco su paciencia y cariño, son el mejor regalo que me ha dado la vida, las amo.*

*A mi gran amor Gerson,*

*Por apoyarme en todo momento y estar a mi lado durante siempre, gracias.*

*A mi tío Dagoberto,*

*Por enseñarme que no existen obstáculos en esta vida cuando se lucha con el corazón y se tienen ganas de continuar.*

*A mis asesoras la M. en C. Julieta González y la Dra. Paty Martínez,*

*Que me guiaron para la elaboración y culminación de este trabajo.*

*A mis amigos,*

*A los que estuvieron, a los que permanecen y los que seguirán formando parte de esta maravillosa aventura, la vida.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México,*

*En especial a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por darme la oportunidad de formar parte de ella.*

*A la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa,*

*Por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.*

*Al programa de apoyo a proyectos de investigación e innovación tecnológica PAPIIT INN119110, ya que mediante el proyecto “Efecto de proteína láctea sola y en mezcla con polisacáridos sobre la estabilidad y reología de sistemas dispersos” fue financiado parte de este estudio.*

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	iii
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	vi
<b>RESUMEN</b> .....	vii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	3
1.1. Biopolímeros .....	3
1.1.1. Proteínas .....	5
1.1.1.1. Propiedades funcionales .....	5
1.1.1.2. Propiedades en la interfase .....	6
1.1.1.3. Albúmina de huevo .....	7
1.1.1.3.1. Propiedades, uso y aplicaciones .....	9
1.1.2. Polisacáridos .....	10
1.1.2.1. Propiedades funcionales .....	10
1.1.2.2. Carragenina .....	11
1.1.2.2.1. Propiedades, uso y aplicaciones.....	13
1.1.2.3. Goma tragacanto .....	14
1.1.2.3.1. Propiedades, uso y aplicaciones .....	15
1.2. Emulsiones .....	15
1.2.1. Definición y clasificación .....	16
1.2.2. Emulsificantes y estabilizantes .....	18
1.2.2.1. Emulsificantes .....	18
1.2.2.2. Estabilizantes .....	19
1.2.3. Estructura .....	20
1.2.4. Propiedades .....	21
1.2.5. Estabilidad .....	22
1.2.5.1. Mecanismos de desestabilización .....	23
1.2.5.1.1. Cremado .....	25
1.2.5.1.2. Floculación .....	28
1.2.5.1.3. Coalescencia .....	31

1.2.5.1.4.	Inversión de fases .....	32
1.2.5.2.	Métodos de medición .....	33
1.2.5.2.1.	Difracción de luz láser .....	33
1.2.5.2.1.1.	Difracción dinámica de luz láser .....	34
1.2.5.2.1.2.	Difracción múltiple de luz láser .....	35
1.2.5.2.2.	Conductividad eléctrica .....	38
1.2.5.2.3.	Microscopía .....	38
1.2.5.2.4.	Reología .....	41
<b>2.</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	42
2.1.	Objetivos .....	42
2.2.	Materiales y métodos .....	43
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	48
3.1.	Estabilidad a través de la distribución y tamaño de partícula .....	48
3.1.1.	Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 30% .....	48
3.1.2.	Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 60% .....	51
3.1.3.	Tamaño de partícula de emulsiones al 30% .....	54
3.1.4.	Tamaño de partícula de emulsiones al 60% .....	56
3.2.	Estabilidad a través de la velocidad de desestabilización .....	58
3.2.1.	Perfiles de retrodispersión de luz láser de emulsiones al 30 % .....	58
3.2.2.	Perfiles de retrodispersión de luz láser de emulsiones al 60 % .....	64
3.2.3.	Velocidad de desestabilización .....	68
3.2.3.1.	Emulsiones al 30% .....	68
3.2.3.2.	Emulsiones al 60% .....	71
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	77
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	79
	<b>ANEXO</b> .....	80
1.	Caracterización reológica de las mezclas albúmina de huevo – polisacárido.....	80
	<b>REFERENCIAS</b> .....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Representación esquemática de las interacciones electrostática y estéricas .....	4
1.2 Representación esquemática de las distintas configuraciones de un polipéptido flexible en la interfase .....	6
1.3 Representación esquemática de la ovoalbúmina .....	8
1.4 Estructura química de las carrageninas: <b>(a)</b> kappa, <b>(b)</b> iota, <b>(c)</b> lamda .....	12
1.5 Estructura química de la goma tragacanto: <b>(a)</b> Arabinogalactana, <b>(b)</b> Ácido tragacantico .....	14
1.6 Representación esquemática de la formación de emulsiones aceite-agua .....	16
1.7 Representación esquemática de los tipos de emulsiones .....	17
1.8 Representación esquemática de algunos surfactantes .....	18
1.9 Representación esquemática de la lecitina .....	19
1.10 Representación esquemática de las partes que componen la emulsión .....	20
1.11 Tipos de emulsión según el tamaño de partícula .....	22
1.12 Fenómenos de desestabilización más comunes ocurridos en emulsiones .....	24
1.13 Diagrama esquemático de la velocidad de migración de los glóbulos de emulsión en los diferentes tipos de cremado .....	26
1.14 Evolución estructural de las emulsiones aceite-agua durante el cremado: <b>(a)</b> cremado de glóbulos individuales, <b>(b)</b> cremado de agregados discretos, <b>(c)</b> cremado debido a la formación de una red emulsión gel que se contrae por efecto de la gravedad .....	27
1.15 Representación esquemática de la floculación .....	30
1.16 Representación esquemática de la coalescencia .....	31
1.17 Representación esquemática de la inversión de fases .....	32
1.18 Componentes de un equipo de difracción dinámica de luz láser .....	35
1.19 Funcionamiento de un difractómetro múltiple de luz láser .....	36
1.20 Funcionamiento de Turbiscan MA2000 .....	37
1.21 Micrografías de emulsiones aceite-agua que contienen glóbulos pequeños usando microscopio óptico: <b>(a)</b> no floculada, <b>(b)</b> floculada .....	39
2.1 Celda de medición .....	45



2.2 Representación esquemática de la visualización del resultado en el Turbiscan MA200 .....	45
2.3 Visualización del perfil de retrodispersión: <b>(a)</b> modo de referencia, <b>(b)</b> modo bruto.....	46
2.4 Perfil de retrodispersión en modo de referencia de una emulsión aceite-agua.....	47
2.5 Cinéticas de desestabilización presentadas en emulsiones aceite - agua.....	47
3.1 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina $\lambda$ , almacenadas a: <b>(a)</b> 4°C, <b>(b)</b> 25°C, <b>(c)</b> 40°C .....	49
3.2 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a: <b>(a)</b> 4°C, <b>(b)</b> 25°C, <b>(c)</b> 40°C.....	50
3.3 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina $\lambda$ , almacenadas a: <b>(a)</b> 4°C, <b>(b)</b> 25°C, <b>(c)</b> 40°C .....	52
3.4 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a: <b>(a)</b> 4°C, <b>(b)</b> 25°C, <b>(c)</b> 40°C.....	53
3.5 Comportamiento del tamaño de partícula a través del tiempo en emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina $\lambda$ y albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a 4, 25 y 40°C.....	56
3.6 Comportamiento del tamaño de partícula a través del tiempo en emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina $\lambda$ y albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a 4 y 25°C.....	58
3.7 Comportamiento de una emulsión con el tiempo: Parte baja, región agotada de glóbulos; parte media, región con la concentración de glóbulos más cercana a la original; parte alta, región con empaquetamiento de glóbulos .....	59
3.8 Perfiles de retrodispersión de luz en modo de referencia a través del tiempo de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina $\lambda$ , almacenadas a 4, 25 y 40°C.....	60

3.9 Fotografía de emulsiones al 30% elaboradas con carragenina $\lambda$ , a los 30 días de almacenamiento. ....	61
3.10 Perfiles de retrodispersión de luz en modo de referencia a través del tiempo de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo goma tragacanto, almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	62
3.11 Fotografía de emulsiones al 30%, elaboradas con goma tragacanto a los 30 días de almacenamiento.....	63
3.12 Perfiles de retrodispersión de luz en modo de referencia a través del tiempo de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina $\lambda$ , almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	65
3.13 Fotografía de emulsiones al 60%, elaboradas con carragenina $\lambda$ a los 127 días de almacenamiento.....	66
3.14 Perfiles de retrodispersión de luz en modo de referencia a través del tiempo de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	67
3.15 Fotografía de emulsiones al 60%, elaboradas con goma tragacanto a los 127 días de almacenamiento.....	68
3.16 Cinéticas de desestabilización en emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C.....	69
3.17 Cinéticas de desestabilización en emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C.....	72
3.18 Comportamiento del periodo de retraso mostrado por emulsiones al 30 y 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina $\lambda$ , goma tragacanto) almacenadas a 4, 25 y 40°C.....	75

## ÍNDICE DE CUADROS

1.1 Funciones y aplicación de polisacáridos en alimentos.....	11
2.1 Tiempo de emulsificación .....	44
3.1 Tamaño de partícula de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina $\lambda$ o albúmina de huevo - goma tragacanto almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	54
3.2 Tamaño de partícula de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina $\lambda$ o albúmina de huevo - goma tragacanto almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	57
3.3 Periodo de retraso y separación de fases en emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	70
3.4 Velocidad de desestabilización en emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	70
3.5 Periodo de retraso y separación de fases en emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	72
3.6 Velocidad de desestabilización en emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C .....	72

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudiaron a las emulsiones aceite-agua elaboradas con una mezcla de biopolímeros con la finalidad de establecer su estabilidad a través del tiempo.

Las emulsiones fueron evaluadas a concentraciones de 30 y 60% (v/v), se elaboraron con una mezcla proteína-polisacárido, la proteína utilizada fue la albúmina de huevo al 2% mientras que los polisacáridos empleados fueron carragenina  $\lambda$  y goma tragacanto, ambos al 0.5%.

Para evaluar la estabilidad de las emulsiones se determinó la distribución y el tamaño de los glóbulos, por otro lado se calculó la velocidad de desestabilización del sistema, para tal efecto las emulsiones se almacenaron a tres diferentes temperaturas: 4, 25 y 40°C, a las emulsiones al 30% se les dio seguimiento durante 30 días, mientras que las emulsiones al 60% se mantuvieron en tales condiciones durante 127 días.

La distribución y tamaño de los glóbulos fueron medidos con un difractómetro (Mastersizer 2000) que basa su funcionamiento en la difracción dinámica de luz láser, mientras que la velocidad de migración se determinó mediante retrodispersión de luz utilizando un analizador óptico de escaneo vertical (Turbiscan MA2000) el cual opera bajo la técnica de difracción múltiple de luz láser.

La distribución de tamaño de partícula en todas las emulsiones estudiadas presentó un comportamiento bimodal. Las emulsiones elaboradas con carragenina  $\lambda$  mostraron un diámetro De Brouckere menor que las que contenían goma tragacanto en ambas concentraciones. El tamaño de partícula en las emulsiones al 30%, preparadas con carragenina  $\lambda$  aumentó durante el almacenamiento a las tres temperaturas estudiadas, a diferencia de las que contenían goma tragacanto que no mostraron cambios aparentes. Las emulsiones al 60% se mantuvieron sin cambios considerables su tamaño de partícula durante el almacenamiento.

En las emulsiones al 30% preparadas con carragenina  $\lambda$ , la separación de fases se presentó rápidamente alcanzado prácticamente la misma cantidad de clarificado a todas las temperaturas de almacenamiento. Para el caso de las emulsiones elaboradas con goma

tragacanto, la separación de fases se vio afectada directamente por la temperatura a la que se almacenaron, la mayor cantidad de clarificado se obtuvo a los 40°C, mientras que las emulsiones almacenadas a 4°C no mostraron separación de fases.

Las emulsiones al 60%, elaboradas con carragenina  $\lambda$  no presentaron separación de fases, no así en las emulsiones elaboradas con goma tragacanto almacenadas a 25 y 40°C, las cuales mostraron clarificado desde 74.6 y 50.5 días respectivamente, mientras que la emulsión almacenada a 4°C no presentó separación de fases durante su almacenamiento.

Las emulsiones al 30% elaboradas con carragenina  $\lambda$  presentaron varias etapas durante su desestabilización, mientras que las preparadas con goma tragacanto sólo mostraron un proceso de inestabilidad a velocidad constante. Por otro lado, las emulsiones al 60% presentaron un periodo de desestabilización a velocidad constante y posteriormente un proceso de reacomodo de glóbulos en diferentes tiempos y velocidades, según la temperatura a la que fueron almacenadas las emulsiones.

La temperatura de almacenamiento influyó directamente sobre el proceso de desestabilización, siendo que las emulsiones al 30% elaboradas con goma tragacanto y almacenadas en refrigeración fueron más estables que las que contenían carragenina  $\lambda$ .

La emulsión al 60% elaborada con goma tragacanto y almacenada a 4°C presentó la mayor estabilidad en comparación con las demás emulsiones estudiadas, ya que no mostró separación de fases durante los 127 días de almacenamiento y los cambios presentados se llevaron a cabo a una velocidad menor.

# INTRODUCCIÓN

Una emulsión consiste de dos líquidos inmiscibles, donde uno de los líquidos es dispersado en pequeños glóbulos en otro. Los sistemas que consisten de glóbulos de aceite dispersos en la fase continua son llamados emulsiones aceite-agua, como son los aderezos de ensaladas, helados, cremas líquidas y bebidas ligeras (Phillips y col., 1994; Dickinson, 2003; McClements, 2005).

La estabilidad de las emulsiones aceite-agua se logra utilizando emulsificantes y/o estabilizantes. En la industria alimentaria las proteínas son utilizadas como agentes emulsificantes, mientras que los polisacáridos mejoran la estabilización de las emulsiones a largo plazo (Hill y col., 1998). Los agentes emulsificantes facilitan la formación de las emulsiones por la disminución de la tensión en la interfase aceite-agua, también imparten estabilidad por la formación de una capa protectora alrededor de los glóbulos dispersos, mientras que los estabilizantes pueden no ser activos interfacialmente pero proveen estabilidad a largo del tiempo porque restringen las interacciones en la interfase incrementando la viscosidad de la fase continua y retardando el movimiento de los glóbulos (Phillips y col., 1994; Sun y col., 2007).

Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables desde el punto de vista fisicoquímico, su separación en dos fases inmiscibles puede ser rápida o lenta de acuerdo a su estabilidad cinética (Comas y col., 2006). Los principales mecanismos de desestabilización que afectan la homogeneidad de las emulsiones son la migración de partículas (cremado, sedimentación) y la variación o agregación del tamaño (coalescencia, floculación) (Mengual, 1999).

La estabilidad de una emulsión depende de varios factores como son la distribución y el tamaño de los glóbulos, la reología de la fase continua y las interacciones entre los glóbulos de la fase dispersa. La floculación de los glóbulos de aceite en una emulsión en agua ha sido considerada tradicionalmente como un mecanismo de inestabilidad, debido a que puede ser un paso intermedio hacia la coalescencia o bien favorecer el proceso de cremado, ya que la velocidad de desestabilización de los agregados es superior a la de los glóbulos individuales. Sin embargo en emulsiones concentradas, un proceso generalizado de

floculación puede favorecer la estabilidad de la emulsión al formarse un entramado tridimensional (emulsión – gel). La naturaleza y concentración del emulsificante usado son clave en este proceso. Por lo anterior, la estabilidad de una emulsión alimentaria es el factor más importante a considerar en relación con sus aplicaciones industriales (Madiedo y col., 1997).

Las emulsiones aceite-agua elaboradas con albúmina de huevo, goma tragacanto y carragenina  $\lambda$  han sido poco estudiadas, se cuenta con algunos trabajos realizados en UNAM - Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán como el estudio realizado por González (2003), quien encontró que el índice de consistencia fue mayor en las emulsiones preparadas con las mezclas que contenían albúmina de huevo respecto a las elaboradas con caseinato de sodio, de igual modo las emulsiones estabilizadas con carragenina  $\lambda$  y albúmina de huevo presentaron una viscosidad aparente mayor que las estabilizadas con carragenina  $\lambda$  y caseinato de sodio, por tal motivo se consideraron más estables debido a la dependencia que existe entre la viscosidad y la estabilidad del sistema.

Con base a que se han obtenido resultados aceptables al utilizar albúmina de huevo como estabilizante de emulsiones altamente concentradas y se tienen pocos trabajos reportados al respecto, la finalidad de este proyecto fue estudiar el efecto de la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) en la estabilidad de emulsiones aceite-agua al 30 y 60%, mediante la difracción de luz láser dinámica y múltiple.

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Biopolímeros

Proteínas y polisacáridos son polímeros naturales ampliamente utilizados como ingredientes funcionales en materiales alimenticios. Estos biopolímeros forman parte de complejos alimenticios naturales (como la leche, harina, huevo o carne) o son ingredientes funcionales aislados (como la gelatina, pectina o carragenina). El tipo, número, secuencia y unión de monómeros dentro de los biopolímeros alimenticios determinan sus características en solución, como son la longitud de cadena, ramificación, carga, flexibilidad e hidrofobicidad. Estas características determinan ampliamente los atributos funcionales de los biopolímeros en alimentos, tal es el caso de su capacidad para espesar soluciones, formar geles, retener agua, así como formar y estabilizar emulsiones y espumas. Los biopolímeros de manera individual pueden ser utilizados para proporcionar estos atributos funcionales, sin embargo funcionalidades originales y mejoradas pueden obtenerse mediante la utilización de mezclas de biopolímeros. Por ello, conocer las interacciones proteína-polisacárido es importante para entender los principios básicos del ensamblaje directo de los polímeros, en lugar de sólo mezclar empíricamente diferentes biopolímeros (McClements, 2006).

La combinación de proteínas y polisacáridos ofrece en las emulsiones una amplia gama de propiedades, como son estabilidad fisicoquímica, estabilidad durante el almacenamiento, textura y masticabilidad (Sun y col., 2007).

### Interacciones de los biopolímeros

Puede haber interacciones sinérgicas o antagónicas entre los diferentes tipos de biopolímeros, las cuales causan grandes cambios en sus propiedades funcionales. El conocimiento del origen y naturaleza de las interacciones involucradas a menudo ofrece nuevas estructuras y propiedades fisicoquímicas en los sistemas alimenticios (McClements, 2006).

Por ello las interacciones de los biopolímeros son ampliamente usadas para mejorar la vida de anaquel y la textura de los productos alimenticios (Jourdain y col., 2008).



Las mayores interacciones no covalentes entre las proteínas y los polisacáridos son:

- *Interacciones electrostáticas.* Estas interacciones son importantes para los biopolímeros que tienen una carga eléctrica dentro de las condiciones en las que son utilizados (pH y fuerza iónica). Pueden ser atractivas o repulsivas dependiendo si la carga de los grupos involucrados tiene diferente o similar signo (Figura 1.1). La fuerza y el intervalo de estas interacciones disminuyen con el incremento de la fuerza iónica (McClements, 2006).
- *Interacciones estéricas.* Los glóbulos en las emulsiones alimenticias son cubiertos por una delgada capa de moléculas emulsificantes, como son los surfactantes, fosfolípidos, proteínas o polisacáridos. Entonces cuando dos glóbulos se aproximan lo suficiente entre sí y las capas de emulsificante que los cubren inician su superposición unas con otras, las interacciones estéricas son el resultado de la mezcla y/o compresión de las capas interfaciales (McClements, 2005). Esto se traduce en un aumento de la energía interactiva debido a la restricción de volumen y el incremento de la presión osmótica. Esta energía interactiva es repulsiva y opera a distancias pequeñas de separación entre los glóbulos, mejorando la estabilidad de la emulsión (Figura 1.1) (Phillips y col., 1994).

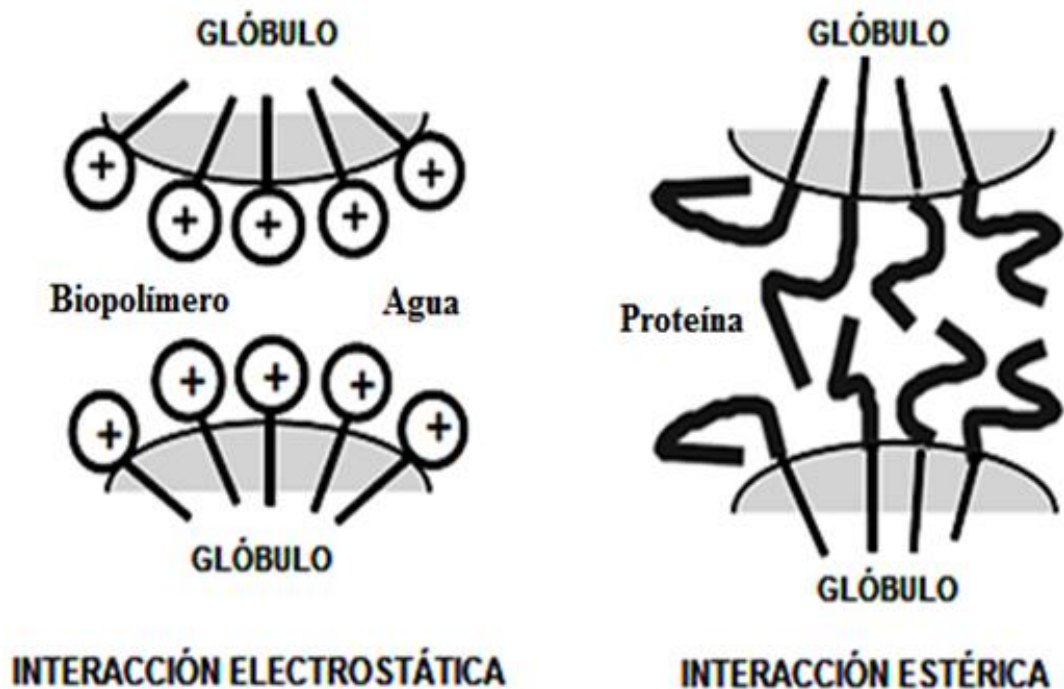


Figura 1.1 Representación esquemática de las interacciones electrostática y estérica  
(<http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S122N.pdf>)

- *Interacciones hidrofóbicas*. Estas interacciones son importantes para los biopolímeros en solución acuosa que tienen grupos no polares, se manifiestan con una tendencia para los grupos no polares de asociarse entre sí (McClements, 2006).
- *Puentes de hidrógeno*. Esta interacción es importante para los biopolímeros que tienen segmentos a lo largo de su cadena que pueden formar puentes de hidrógeno relativamente fuertes con segmentos de otras moléculas, por ejemplo estructuras de hélice o lámina (McClements, 2006).

### **1.1.1. Proteínas**

Son polímeros de aminoácidos constituidos básicamente por C, H, O, N aunque pueden contener S y en menor proporción P, Fe, etc. La unión de aminoácidos se realiza mediante enlace peptídico, que es un enlace covalente que se establece entre el grupo carboxilo de un aminoácido y el grupo amino de otro aminoácido, dando lugar al desprendimiento de una molécula de agua. Se encuentran ampliamente distribuidas en plantas y animales y son esenciales para la vida (Badui, 2006).

#### **1.1.1.1. Propiedades funcionales**

La funcionalidad de una sustancia se define como toda propiedad nutricional o no, que interviene en su utilización. Las propiedades funcionales permiten el uso de las proteínas como ingredientes alimenticios, generalmente se incorporan a mezclas complejas. La funcionalidad de una proteína no está del todo comprendida y hasta ahora no ha sido posible predecir su comportamiento en sistemas modelo (Badui, 2006).

Generalmente las propiedades funcionales de las proteínas alimentarias pueden ser clasificadas dentro de tres grupos principalmente: (a) *propiedades de hidratación*, dependen de las interacciones proteína-agua, las cuales tienen una importante relación con la humectabilidad, hinchamiento, adhesión, dispersabilidad y retención de agua; (b) *propiedades interfaciales*, que incluyen la tensión superficial, la emulsificación y formación de espuma; y c) *propiedades de agregación y gelificación*, las cuales están relacionadas con las interacciones proteína-proteína (Galazka y col., 2000).

Los factores ambientales como el pH, fuerza iónica, tipo de sales, temperatura y conformación de la proteína, influyen sobre las interacciones proteína-agua y proteína-proteína (Badui, 2006).

### 1.1.1.2. Propiedades en la interfase

Varios alimentos son productos tipo espuma o tipo emulsión. Estos sistemas dispersos son inestables a menos que estén presentes sustancias anfifílicas en la interfase. Las proteínas, al ser moléculas anfifílicas, pueden llevar a cabo su estabilización al migrar espontáneamente a la interfase aire-agua o agua-aceite puesto que su energía libre es menor en la interfase que en la zona acuosa. Las proteínas en la interfase forman películas altamente viscoelásticas porque se concentran en esa zona y confieren resistencia a la coalescencia de las partículas durante el almacenamiento y la manipulación, por esta razón las proteínas son conocidas por sus propiedades de emulsificación y espumado (Dickinson, 2003; Badui, 2006).

Las proteínas presentan en su superficie activa tres atributos: a) Capacidad para adsorberse rápidamente en una interfase, b) Capacidad para desplegarse rápidamente y reorientarse en una interfase y c) Capacidad aún en la interfase de interactuar con moléculas vecinas y formar películas viscoelásticas. En una interfase, las cadenas polipeptídicas asumen una o más de las tres diferentes configuraciones: líneas, lazos y colas (Figura 1.2).

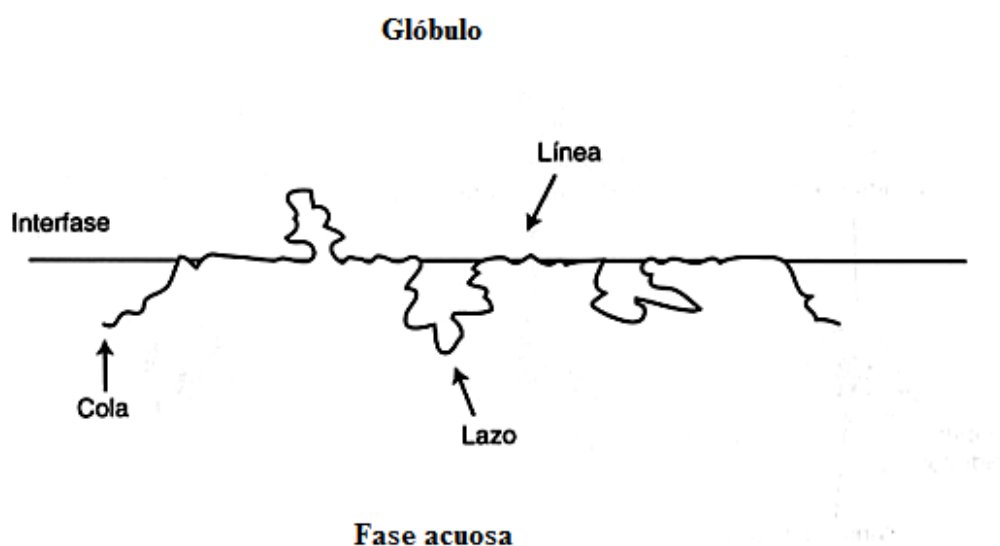


Figura 1.2 Representación esquemática de las distintas configuraciones de un polipéptido flexible en la interfase (Badui, 2006).

Las líneas están en contacto directo con la interfase, las colas son segmentos del biopolímero entre las líneas orientadas hacia el seno de alguna de las fases y los lazos son los segmentos terminales de las cadenas de biopolímero (Andrea, 2010). Mientras más segmentos lineales haya, más fuerte es la unión y se disminuye la tensión interfacial. La formación de lazos y colas se ve favorecida por el incremento de la concentración proteínica. A bajas concentraciones la mayor parte del esqueleto de enlaces peptídicos de los polipéptidos yacen sobre la interfase, sin que apenas se formen lazos y colas. A medida que la concentración aumenta, los polipéptidos se empaquetan de un modo más compacto y se van formando, por ello, más lazos y colas. Finalmente, la conformación en lazos genera repulsiones electrostáticas y restricciones estéricas suficientes para hacer energéticamente desfavorable la adsorción de más moléculas proteínicas. En tal situación, la interfase se encuentra saturada de proteína, el incremento de la concentración proteínica a partir de entonces, genera la adsorción en multicapas (Wong y Dominic, 1995).

#### **1.1.1.3. Albúmina de huevo**

La albúmina de huevo se obtiene tras el quebrado y la separación mecánica de la clara y la yema. A continuación la clara se filtra para retirar impurezas, se fermenta evitando así la reacción de Maillard, se concentra hasta alcanzar un 33% de humedad y se enfría hasta 4°C. Posteriormente se deshidrata mediante aspersión o también llamado secado por atomización, en una cámara donde es inyectado aire caliente a 200°C a una alta presión. Subsecuentemente se tamiza y envasa para su posterior pasteurización en cámara caliente a 54 °C durante 7 días. Finalmente se almacena a temperatura ambiente, alcanzado una vida de anaquel de hasta 18 meses (Astiasaran y Martínez, 2000).

Es una fosfoglicoproteína (proteína globular), viscosa y coagulable con la aplicación de calor, se encuentra en la clara de huevo y constituye el 75% de las proteínas del mismo, es un polipéptido de cadena simple con muchos residuos hidrofóbicos, con un pH de 7.6 – 8.5 y un punto isoeléctrico de 4.63. Se desnaturaliza por encima de 58°C o cuando se le somete a corriente eléctrica o se agita vigorosamente (Mine, 1995; Coultate, 1998; Wongsasulak y col., 2007) (Figura 1.3).



Figura 1.3. Representación esquemática de la ovoalbúmina  
(<http://www.itescham.com/Syllabus/Doctos/r637.PDF>)

La albúmina contiene una alta proporción de agua (87.9%) que se encuentra asociada en proporciones variables a las proteínas que constituyen un 10,6%. Entre estas proteínas se describen como constituyentes de la albúmina a las siguientes: *ovoalbúmina* (54%) es la proteína predominante, es una glicofosfoproteína que se desnaturaliza fácilmente en las interfases aire-agua y grasa-agua, *conalbúmina* (13%) tiene acción antimicrobiana y capaz de ligar iones bi-trivalentes ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  etc.), *ovomucoide* (11%) es un inhibidor de tripsina motivo por el cual la clara cruda dificulta la digestión, *lisozima* (3.5%) tiene una acción bactericida por la lisis de la pared bacteriana, *ovomucina* (3.0%) da el poder gelificante debido a que es una proteína fibrosa con el 30% de polisacáridos, *ovoglobulinas* (2%) responsables de la producción de espuma, la *ovoflavoproteína* (0.8%) capaz de fijar la riboflavina sin inhibir su aprovechamiento, *ovostatina* (0.5%), *cystatina* (0,05%) y la *avidina* (0.05%) que fija la biotina (Stadelman y Cotterill, 1995; Coultate, 1998; Primo, 1998; Astiasaran y Martínez, 2000).

#### **1.1.1.3.1. Propiedades, uso y aplicaciones**

La albúmina de huevo es una proteína alimentaria con una gran cantidad de propiedades funcionales, frecuentemente utilizadas en el diseño de matrices para alimentos debido a su habilidad para formar geles, incrementar la viscosidad, estabilizar emulsiones y espumas (Wongsasulak y col., 2007).

En la industria alimentaria su uso se debe principalmente a la coagulación por acción del calor y a su capacidad de formación de emulsiones y espumas, además de que conferir color y aroma. Su aplicación se encuentra en la industria panadera y repostería, donde es utilizada como agente espumante y estabilizador para preparar merengue, bizcochos, panes y otros productos de bollería. Su poder gelificante es el que hace posible la preparación de flanes y postres. Se utiliza para vinos tintos que han pasado por barrica eliminando taninos astringentes y afinando sin quitar estructura a nivel organoléptico, dejándolo más estable a nivel coloidal. También es empleada como complemento alimenticio para personas que practican algún deporte (Astiasaran y Martínez, 2000).

Tiene la capacidad de coagular, si se le aplican altas temperaturas (57°C), y puede formar un gel firme y blanco debido fundamentalmente a la ovoalbúmina y la conalbúmina. La temperatura de coagulación de la albúmina de huevo varía en función inversa al pH, por lo contrario la presencia de sacarosa y/o sal favorece la coagulación (Astiasaran y Martínez, 2000). La coagulación involucra cambios en la estructura molecular de la proteína por la agregación aleatoria de la molécula debido a la desnaturalización de las proteínas presentes. Esta agregación permite interacciones polímero - polímero favoreciendo las reacciones entre polímero y solvente. El coágulo es con frecuencia turbio y la formación de éste es comúnmente irreversible térmicamente. En general los términos coagulación y gelación son usados indistintamente para referirse a un gel, sin embargo la definición de gelación en el orden de la agregación de proteínas pudiera ser o no causada por la desnaturalización, formando una red tridimensional (Stadelman y Cotterill, 1995).

Su capacidad de formación de espuma se debe a la presencia de ovomucinas, ovoglobulinas y ovoalbúminas, ésta a su vez depende de la duración y temperatura de agitación, del equipo, pH, presencia de azúcar, sal y de la ausencia de contaminación por la proteína de la

yema. Durante este proceso las proteínas se desnaturalizan y forman la interfase aire-líquido estable propia de este estado de dispersión. La estabilidad química de la espuma mejora cuando el pH se acerca al punto isoeléctrico, ya que las proteínas carentes de carga no se repelen tanto, de manera que pueden interactuar fuertemente (Coultate, 1998).

### **1.1.2. Polisacáridos**

Los polisacáridos son polímeros de monosacáridos, unidos repetitivamente mediante enlaces glucosídicos. Se encuentran en disposición lineal o ramificada y en la mayoría son mayores de 20 unidades. Cumplen funciones diversas, sobre todo estructurales y de reserva energética. Se encuentran en forma natural en animales (glucogeno, quitina), en plantas terrestres (almidón, celulosa, pectinas), en algas (carrageninas, alginatos) y producidos por microorganismos (dextranos, xantanos), pero en algunas ocasiones se añaden a otros para obtener la formulación correcta, tal es el caso del almidón y las pectinas (Fennema, 2000; Badui, 2006).

Los polisacáridos solubles en agua y modificados utilizados en los alimentos y otras aplicaciones industriales son conocidos como gomas. Estas gomas se comercializan en forma de polvo de diversos tamaños de partícula (Fennema, 2000). Las gomas engloba a todos los polisacáridos que son extraídos de plantas, algas y cultivos microbianos, o bien derivados de exudados de plantas y biopolímeros modificados hechos mediante tratamientos enzimáticos o químicos de almidón y celulosa (Pasquel, 2001; Badui, 2006).

Las gomas son biopolímeros hidrofílicos de alto peso molecular usados como ingredientes funcionales en la industria de alimentos para el control de microestructura, textura, sabor y vida de anaquel, se utilizan principalmente a concentraciones de 0.25 – 0.50% (Fennema, 2000, Dickinson, 2003).

#### **1.1.2.1. Propiedades funcionales**

Las propiedades funcionales de los polisacáridos dependen de diversos factores como: a) Intrínsecos: peso molecular, grados de ionización, y estructura y b) Extrínsecos: pH, fuerza iónica, temperatura, concentración, interacción de los componentes de alimento (Badui, 2006).

Cada polisacárido presenta características físicas y químicas determinadas, no sustituibles fácilmente con otro polisacárido, así la combinación de éstas genera nuevas propiedades funcionales (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1 Funciones y aplicación de polisacáridos en alimentos (Badui, 2006).

<b>GOMA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Guar</b>	+	+	+	+	+		+			+			+
<b>Pectina</b>	+	-	-										
<b>Carragenina</b>	+	-	+										
<b>Tragacanto</b>		+	+	+	+		+		+				
<b>Arábiga</b>	+	-	+	+	+								+
<b>Almidón</b>	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		
<b>Xantana</b>		+	-	+	+	+	+						

- |                  |                         |                         |
|------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1. Texturizante  | 6. Agente de suspensión | 11. Vehículo de sabores |
| 2. Espesante     | 7. Adhesivo             | 12. Crioprotector       |
| 3. Gelificante   | 8. Formador de película | 13. Floculante          |
| 4. Estabilizante | 9. Ligador de agua      |                         |
| 5. Emulsificante | 10. Extensor            |                         |

### 1.1.2.2. Carragenina

La carragenina es obtenida de diversos géneros y especies de algas marinas de la clase *Rodophyta*, se encuentra en la pared de las células y en la matriz intercelular del tejido de estas algas rojas. El contenido de carragenina en las algas varía de 30 al 60% del peso seco, dependiendo de la especie de alga y de las condiciones marinas tales como luminosidad, nutrientes, temperatura y oxigenación del agua. Las especies productoras de carragenina  $\lambda$  son, en general del género *Gigartina* que se encuentra en África Oriental, Filipinas y Japón.

Las algas son de manera habitual, recolectadas manualmente por pescadores en zonas intermareas o por sumersión con auxilio de equipamientos adecuados. Después de la recolección, las algas son colocadas al sol para secarlas hasta que lleguen a un nivel de humedad ideal para su procesamiento, posteriormente la carragenina es extraída mediante precipitación con alcohol, en donde el carragenato es extraído por un proceso de cocción en agua, en presencia de álcali. El líquido extraído es purificado por centrifugación y/o filtración, el carragenato en solución se recupera por precipitación en alcohol o en solución de cloruro potásico. El coagulado se lava, prensa, seca y finalmente se muele hasta la obtención de polvo de granulometría deseada (Pasquel, 2001; DEIA, 2006).



La carragenina es un polisacárido lineal de alto peso molecular con un contenido de éster sulfato de 15% a 40%, formado por unidades alternadas de D-galactosa y 3,6-anhidro-galactosa (3,6-AG) unidas por ligaduras  $\alpha$ -1,3 y  $\beta$ -1,4-glucosídica. La posición y el número de grupos de éster sulfato, la fuente de extracción, así como el contenido de 3,6-AG determinan las diferencias primarias entre los tipos de carragenina kappa, iota y lamda (Gu y col., 2005).

La carragenina kappa ( $\kappa$ ), contiene de 24% a 26% de éster sulfato y de 32% a 36% de 3,6-anhidro-D-galactosa, forma geles rígidos, quebradizos termorreversibles, presenta alta sinéresis, tiene buena capacidad de retención de agua, es soluble en agua caliente a partir de 80-85°C (Figura 1.4(a)). La carragenina iota ( $\iota$ ), contiene de 30% a 32% de éster sulfato y de 28% a 32% de 3,6-anhidro-D-galactosa, forma geles elásticos y termorreversibles, presenta baja sinéresis y tiene propiedad tixotrópica, muestra buena estabilidad a ciclos de congelación-descongelación, es soluble en agua caliente a partir de 55°C (Figura 1.4(b)).

La carragenina lamda ( $\lambda$ ), contiene de 32% a 39% de éster sulfato y no contiene 3,6-anhidro-D-galactosa. El elevado contenido en sulfato favorece la formación en zig-zig, no gelifica y produce altas viscosidades (Figura 1.4(c)) (Cubero y col., 2002).

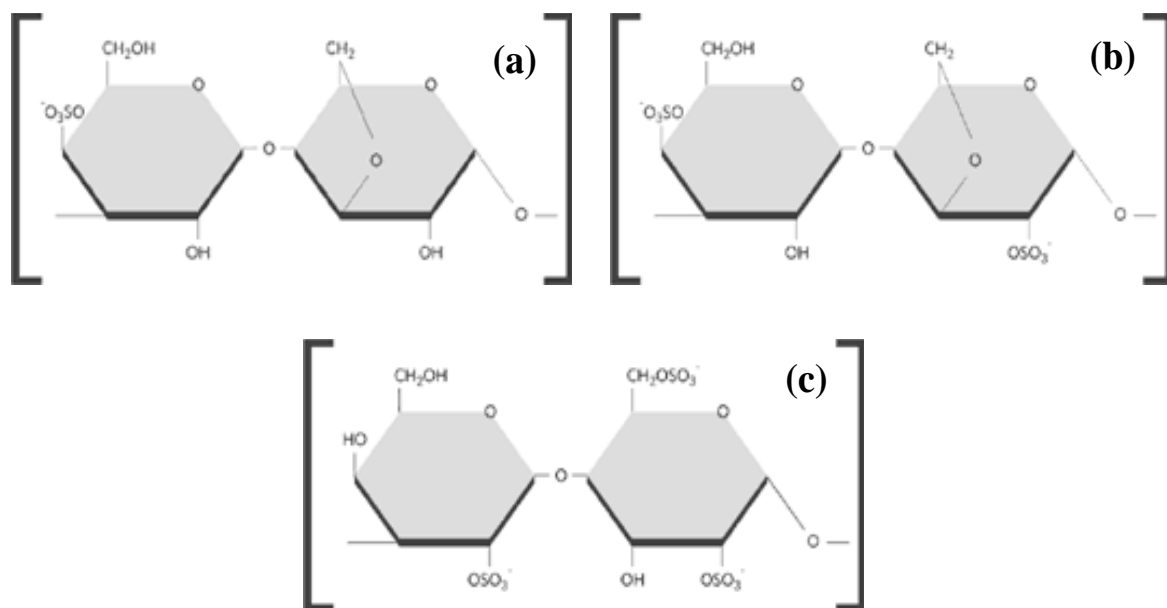


Figura 1.4 Estructura química de las carrageninas: (a) kappa, (b) iota, (c) lamda (Cubero y col., 2002).

#### **1.1.2.2.1. Propiedades, uso y aplicaciones**

Las carrageninas poseen una habilidad exclusiva para formar una amplia variedad de texturas de gel a temperatura ambiente. Pueden ser utilizadas como agentes de suspensión, retención de agua, emulsificación y estabilización en diversas aplicaciones industriales. Son parte de un grupo de polisacáridos que interactúan con proteínas a pH por abajo o por encima del punto isoeléctrico de las proteínas (Gu y col., 2005).

El peso molecular de carragenina  $\lambda$  es de 800000Å (Belitz y Groseh., 1997). Es un tipo de carragenina no gelificante, altamente viscosa, usada por sus propiedades suspensoras y espesantes. Es soluble en agua entre 20 - 80°C dependiendo la concentración y la presencia de cationes; es soluble en leche debido a su insensibilidad a la presencia de iones de calcio y potasio; es soluble en soluciones con hasta 65% de azúcar a temperaturas superiores a 70°C, es soluble en soluciones de salmuera a concentraciones altas (20% a 25%). La viscosidad de las soluciones depende de la concentración, temperatura y la presencia de otros solventes. En general presenta viscosidades que varían de 5 a 800 mPa medidas a 75°C en soluciones de 1,5%. La solución de carragenina  $\lambda$  es bastante estable en los pH neutros o alcalinos, sin embargo los pH bajos afectan su estabilidad especialmente a altas temperaturas. La disminución del pH causa la hidrólisis del polímero, lo cual resulta en la disminución de la viscosidad (Porto, 2003).

Entre los polisacáridos sulfatados, las carrageninas ocupan el primer lugar en cuanto a su uso en la industria alimentaria. Se aplican ampliamente en productos cárnicos como jamones y embutidos, en productos lácteos como helados, flanes, pudines, crema, postres cremosos, quesos, en dulces y confituras, en postres tipo gelatina, salsas, en la industria de bebidas durante la clarificación y refinación de jugos, en cervezas, vinos, jarabes, en la panificación para rellenos, coberturas y masas de pan. Otras de sus aplicaciones industriales se encuentran en las pastas dentales, cosméticos, pinturas y emulsiones (Cubero y col., 2002).

### 1.1.2.3. Goma tragacanto

La goma tragacanto es un exudado gomoso endurecido al aire, que fluye de forma natural obtenido por incisiones del tronco y ramas de *Astragalus gummifer* Labillardiere y otras especies de *Astragalus*, de la familia de las leguminosas originaria de Asia menor y de las regiones montañosas y semidesérticas del Irán, Siria y Turquía (Pasquel, 2001).

Es una molécula relativamente ramificada, formada de una mezcla de polisacáridos: la arabinogalactana o tragacantina (Figura 1.5(a)) que es un polímero soluble en agua, esta formado por L-arabinosa, ácido D-galacturónico, D-fucosa, D-galactosa y D-xilosa, por otro lado el ácido tragacántico o basorina (Figura 1.5(b)) que constituye el 60 a 70% del polisacárido, es insoluble en agua y responsable de la propiedad adsorbente de la goma. La fracción soluble produce un coloide, mientras que la fracción insoluble tienen la capacidad de formar un gel (DEIA, 2001).

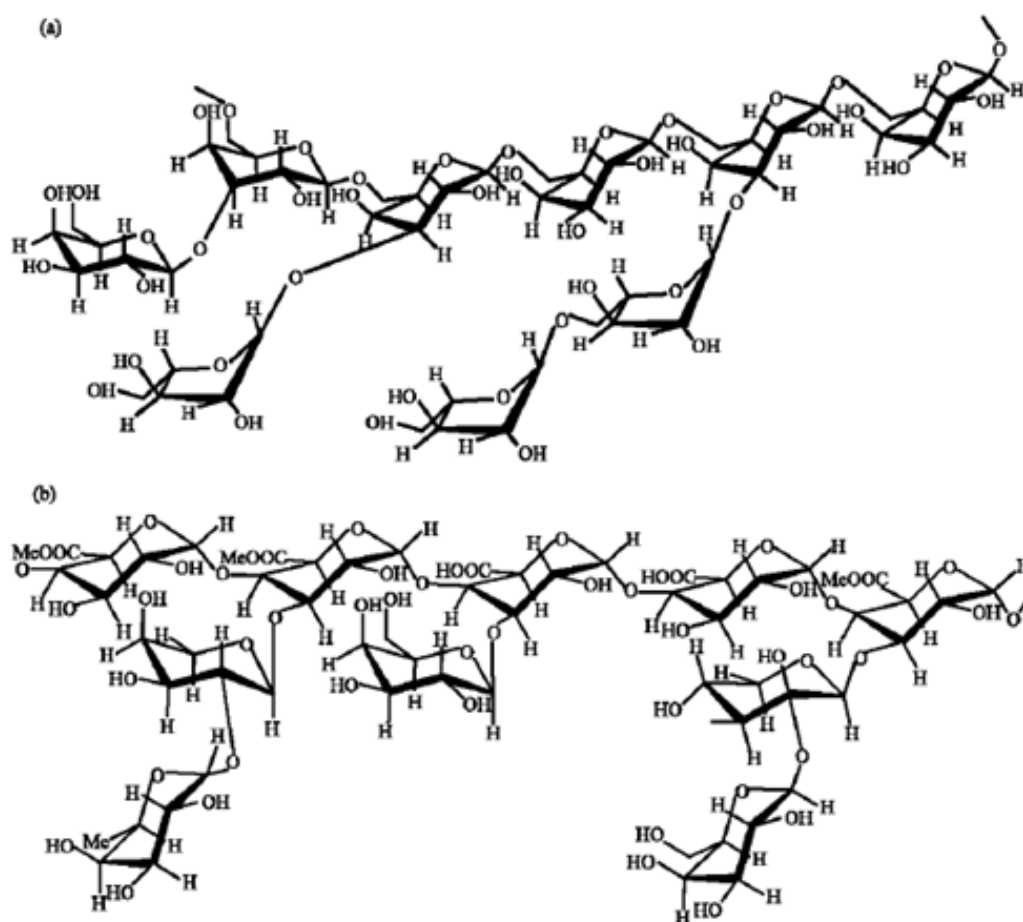


Figura 1.5 Estructura química de la goma tragacanto:  
(a) Arabinogalactana, (b) Ácido tragacántico (Khajavi y col., 2007).

### **1.1.2.3.1. Propiedades, uso y aplicaciones**

La goma tragacanto es un polisacárido ligeramente ácido (pH 5-6), produce la más alta viscosidad de todos los polisacáridos extraídos de plantas. Es soluble en agua fría o caliente, insoluble en alcohol, estable al calor y al ácido (pH <2). Su peso molecular es de 840,000Å (Belitz y Groseh, 1997; Pasquel, 2001).

Generalmente es utilizado en un intervalo de concentraciones entre 0.25 a 0.5%, es pseudoplástico a concentraciones de 0.5%, produce soles coloidales viscosos con textura similar a geles suaves, los cuales son susceptibles a ataques microbianos. Es estabilizante en salsas para ensalada (0.4-1.2%), su adición en helados (0.5%) permite la obtención de una consistencia más suave, forma películas, produce textura cremosa, da cuerpo, es adhesivo, forma suspensiones, es espesante y emulsificante (Belitz y Groseh, 1997).

Las aplicaciones comerciales de la goma tragacanto se dan en emulsiones, cubiertas para panificación y repostería, salsas, aderezos, helados, nieves, paletas heladas, jarabes, saborizantes, confitería, productos farmacéuticos, cosméticos, suspensiones, quesos untables, malteadas (Cubero y col., 2002).

## **1.2. Emulsiones**

Los coloides alimenticios son sistemas multifase que contienen partículas y otras estructuras con dimensiones espaciales características en un intervalo de tamaño coloidal. El término coloides puede ser aplicado a dispersiones, espumas, geles y emulsiones (Dickinson, 2003). Las emulsiones se encuentran en alimentos, cosméticos, en la industria de los pesticidas, en medicamentos, etc. Las emulsiones aceite-agua forman la mayor categoría en el consumo de alimentos (Dickinson y Ritzoulis, 2000).

La aceptación de nuevos productos bajos en grasa que depende cada vez más del éxito de la tecnología de emulsiones. En este aspecto hay una gran necesidad por agentes emulsificantes más efectivos que sean versátiles y seguros, y que contribuyan idealmente con algún beneficio nutricional. Por esta y otras razones es importante su estudio ya que de ello depende la mejora en sus características y propiedades dando como resultado el alargamiento de su vida útil (Phillips y col., 1994).

### 1.2.1. Definición y clasificación

Una emulsión consiste en dos líquidos inmiscibles (usualmente aceite y agua), donde uno de los líquidos es dispersado en pequeños glóbulos en otro. En muchos alimentos, el diámetro del glóbulo se encuentra entre 0.1 a 100  $\mu\text{m}$  (McClements, 2005).

Durante la emulsificación (Figura 1.6), el líquido en forma de glóbulos es la fase dispersa y el líquido alrededor de ellos es la fase continua. Si el aceite forma la fase dispersa y el agua la fase continua, la emulsión es aceite- agua, por ejemplo: aderezos de ensaladas, helados, cremas líquidas y bebidas suaves. Mientras que si el agua es la fase dispersa y el aceite es la fase continua, la emulsión es agua-aceite como la margarina y mantequilla (Dickinson, 2003; McClements, 2005).

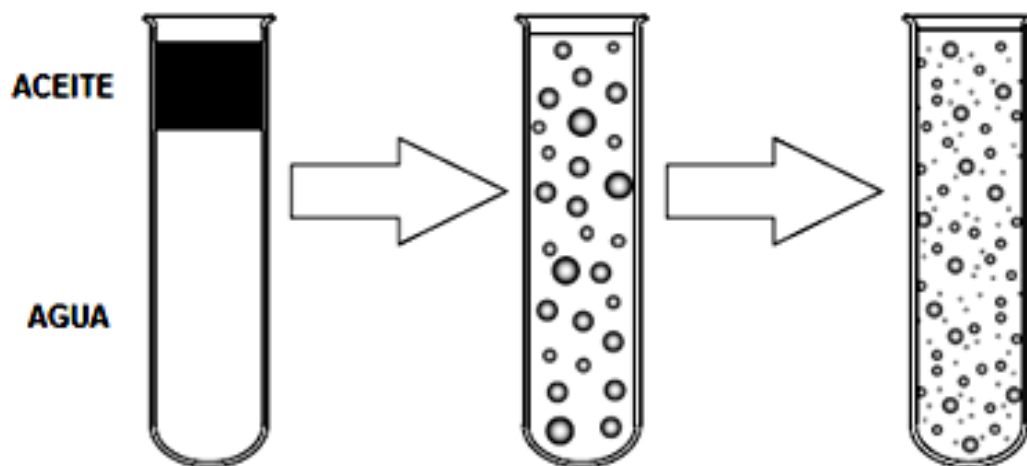


Figura 1.6 Representación esquemática de la formación de emulsiones aceite-agua (McClements, 2005).

En algunas emulsiones la fase dispersa contiene adicionalmente glóbulos inmiscibles con el glóbulo que los contiene y miscibles con la fase continua, las cuales son llamadas emulsiones múltiples o emulsiones dobles. Éstas pueden contener glóbulos de agua dentro de las glóbulos de la fase aceite en una típica emulsión aceite-agua y ser llamadas emulsiones agua-aceite-agua, o bien contener glóbulos de aceite dentro de glóbulos de agua y formar una emulsión aceite-agua-aceite (Figura 1.7). Este tipo de emulsiones ofrecen propiedades estructurales interesantes, sin embargo son poco utilizadas en la industria de alimentos, su producción es pequeña comparada con las emulsiones simples, debido a que requieren de dos pasos sucesivos de homogenización y un estricto control de los mismos, lo

que las hace susceptibles al rompimiento durante su elaboración (Dalglish, 2006; <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S277A.pdf>).

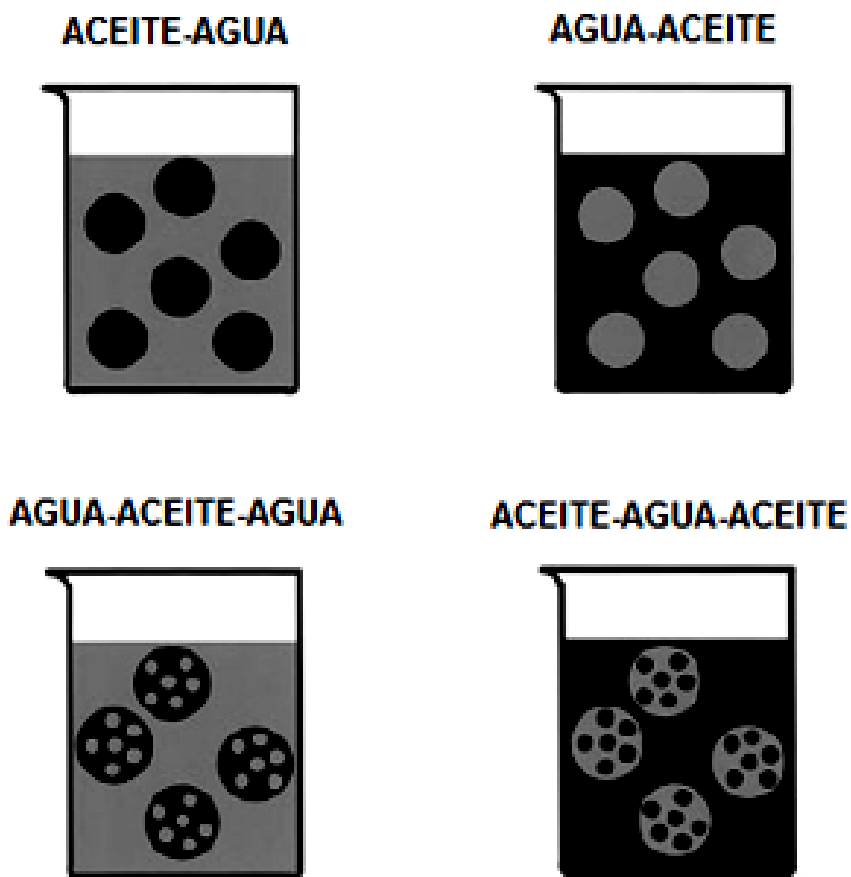


Figura 1.7 Representación esquemática de los tipos de emulsiones (Schramm, 2005).

Dependiendo del tamaño de los glóbulos, las emulsiones también pueden ser clasificadas como: micro-emulsiones (10-100 nm), mini (nano)-emulsiones (100-1000 nm) y macro-emulsiones de (0.5-100  $\mu$ m) (Jafari y col., 2008).

En general, las emulsiones facilitan la inclusión de ingredientes, imparten textura, contribuyen con el gusto y pueden disfrazar sabores indeseables, son bastante complejas porque sus componentes adicionales pueden contener diferentes fases como sólidos dispersos (en pasteles y salchichas), sólidos parciales (en leche, mantequilla, y aderezos), líquidos cristalinos e incorporación parcial de gas (helados y cremas batidas) (Phillips y col., 1994).

## 1.2.2. Estabilizantes y emulsificantes

En la formulación de emulsiones normalmente se distinguen dos componentes: el emulsificante y el estabilizante; los cuales generalmente caen en dos categorías, moléculas pequeñas o biopolímeros (Phillips y col., 1994; Hill y col., 1998; Dickinson, 2003).

La presencia de polisacáridos en emulsiones estabilizadas con proteínas puede tener una gran influencia en las propiedades de la emulsión. El tipo de polisacárido y la carga determinará la naturaleza de las interacciones entre proteína y polisacárido, así como el mecanismo de desestabilización en la emulsión (Jourdain y col., 2008).

### 1.2.2.1. Emulsificantes

El emulsificante es una especie química simple (o mezcla de especies) con superficie activa que promueve la formación de la emulsión por la disminución de la tensión en la interfase aceite-agua, impartiendo un corto periodo de estabilización por la formación de una capa protectora alrededor de los glóbulos dispersos. En términos moleculares un emulsificante es anfifílico ya que contiene un parte hidrofílica y otra lipofílica (Phillips y col., 1994; Dickinson, 2003).

Hay dos extensas clases de agentes emulsificantes usadas en el procesamiento de alimentos: moléculas surfactantes pequeñas (mono y diglicéridos, polisorbatos, ésteres de sucrosa, lecitina, etc.) (Figura 1.8 y Figura 1.9) y biopolímeros (albúmina de huevo, caseinato de sodio) (Dickinson, 2003).

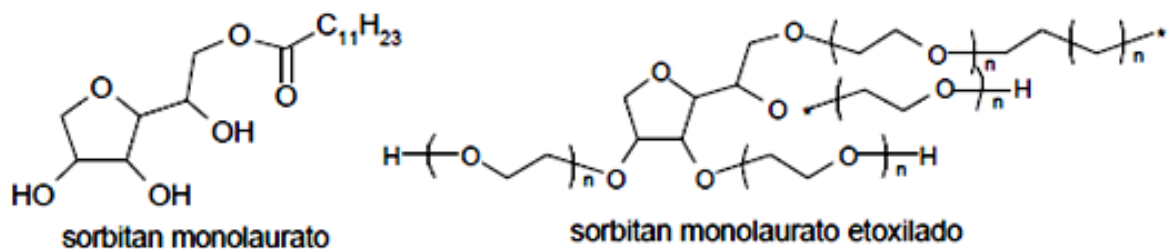


Figura 1.8 Representación esquemática de algunos surfactantes (<http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S303.pdf>).

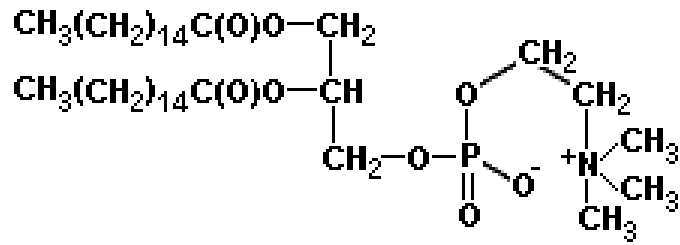


Figura 1.9 Representación esquemática de la lecitina  
 (<http://www.scientificpsychic.com/fitness/aceites-grasas2.html>).

Las proteínas como emulsificantes son las preferidas para formular emulsiones alimenticias, las moléculas de la proteína se difunden y son adsorbidas en interfase aceite-agua. La migración de las proteínas de la solución a la interfase es termodinámicamente favorable debido a que una parte de la energía conformacional e hidratación de la proteína es perdida en la interfase. Una vez en la interfase, la mayoría de las proteínas se desdoblán en diferente grado, se reorienten y reacomodan para formar una película continua adhesiva, donde los segmentos hidrofóbicos se orientan en la fase apolar (aceite), mientras que los segmentos polares lo hacen en la fase continua, disminuyendo la tensión superficial entre las fases, formando así películas interfaciales cohesivas alrededor de los glóbulos de aceite, que proporcionan una barrera electrostática contra el acercamiento de los glóbulos de aceite retardando así la coalescencia (Phillips y col., 1994; Badui, 2006).

La ventaja del uso de proteínas como emulsificantes se debe a que son reconocidas generalmente como aditivos seguros en alimentos, que pueden formar emulsiones físicamente estables y que varían la carga en la superficie (Djordjevic y col., 2008).

### 1.2.2.2. Estabilizantes

Los estabilizantes son normalmente biopolímeros como proteínas o polisacáridos (gomas: guar, carragenina, tragacanto, arabiga, xantana). La principal acción de estabilización de los polisacáridos es incrementar la viscosidad de la fase continua o gelificarla retardando el movimiento de los glóbulos. En general, protegen a la emulsión a largo plazo durante el almacenamiento contra procesos como son el cremado, la floculación y coalescencia (Dickinson, 2003; Sun y col., 2007).



Por la formación hidrodinámica de una espesa capa y porque están generalmente cargadas, las proteínas adsorbidas pueden estabilizar los glóbulos de emulsión por mecanismos estéricos y electrostáticos, mientras que los polisacáridos estabilizan a las emulsiones por la modificación de las propiedades reológicas de la fase continua e influyendo en el estado de la floculación de los glóbulos mediante mecanismos de puentes o agotamiento, dependiendo si la interacción neta del hidocoloide en la superficie es atractiva o repulsiva (Dickinson, 1993; Dickinson, 2003; Dalgleish, 2006).

### 1.2.3. Estructura

El comportamiento de las emulsiones alimenticias aceite-agua se define por las tres partes que conforman el sistema: la grasa o aceite que se encuentra en el interior de los glóbulos, la interfase entre el material graso y la fase continua, y la fase continua misma (Figura 1.10).

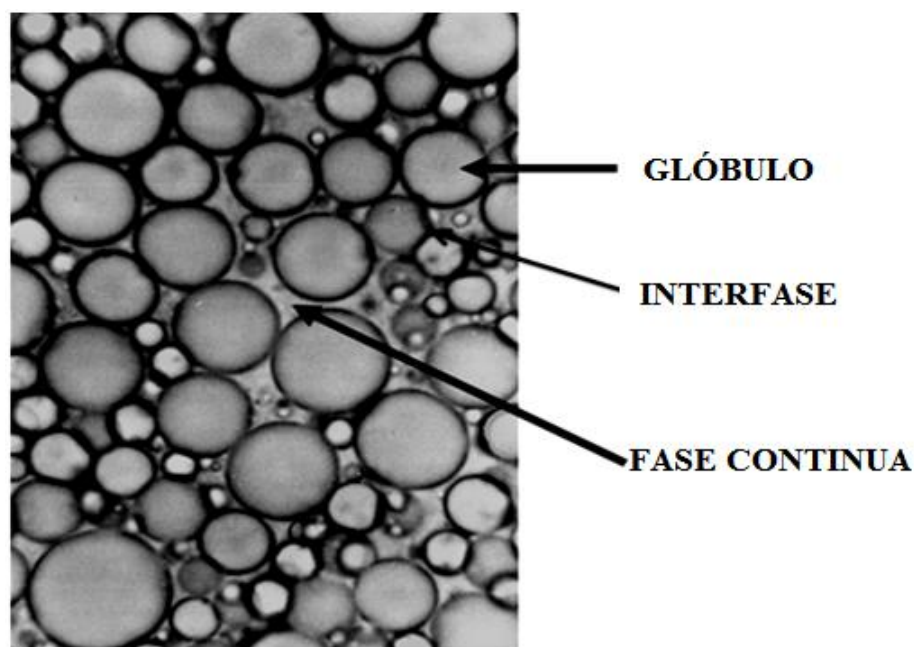


Figura 1.10 Representación esquemática de las partes que componen la emulsión ([http://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec\\_far/emulsiones.pdf](http://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/emulsiones.pdf)).

Las moléculas no polares tienden a localizarse en la fase dispersa, las moléculas polares en la fase continua y las moléculas anfifílicas en la interfase. Cada una de estas fases puede ser químicamente compleja. Los lípidos pueden ser total o parcialmente cristalinos y pueden estar sujetos a cambios químicos tales como la lipólisis u oxidación. La interfase puede

estar compuesta de proteínas o pequeños emulsificantes. Finalmente, la fase continua puede contener iones que pudieran desestabilizar el sistema, o macromoléculas como los polisacáridos que pueden ejercer efectos estabilizadores o desestabilizantes (McClements, 2005; Dalgleish, 2006).

#### **1.2.4. Propiedades**

Muchas de las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de las emulsiones alimenticias son fuertemente afectadas por las interacciones atractivas o repulsivas que actúan entre los glóbulos. Hay diferentes tipos de interacciones coloidales que pueden operar en las emulsiones alimenticias, incluyendo las interacciones de Van der Waals, electrostáticas, estéricas, de agotamiento e hidrofóbicas. Estas interacciones varían en su signo (atractivo o repulsivo), magnitud (fuerte o débil) y su intervalo (amplio o corto). La mayoría de las interacciones glóbulo-glóbulo características en particular en las emulsiones alimenticias, son determinadas por la contribución relativa de los diferentes tipos de interacciones coloidales que operan en sistemas específicos dependiendo de la composición de la emulsión, microestructura y entorno. Cuando las fuerzas atractivas dominan los glóbulos tienden a asociarse unos con otros, pero si las fuerzas repulsivas dominan los glóbulos tienden a permanecer como entidades individuales (McClements, 2005).

Las propiedades más importantes de los productos a base de emulsiones son determinadas por el tamaño de glóbulo, por ejemplo su vida de anaquel, apariencia, consistencia, textura y sabor. Si todos los glóbulos en la emulsión son del mismo tamaño ésta se describe como una emulsión monodispersa y si hay un intervalo de tamaño en los glóbulos presentes ésta se refiere a una emulsión polidispersa (Figura 1.11). En las emulsiones alimenticias se tiene una distribución de tamaños, por lo que es importante conocer el tamaño promedio de las partículas y el ancho de su distribución (McClements, 2005).

Un método ampliamente utilizado para expresar el promedio de tamaño de partícula es el diámetro promedio área-volumen ( $d_{3,2}$ ) o diámetro Sauter, el cual relaciona el promedio del área superficial de los glóbulos expuestos en la fase continua por unidad de volumen de emulsión. Otro método comúnmente utilizado para expresar el tamaño promedio de los glóbulos en emulsiones polidispersas es el diámetro promedio volumen-longitud ( $d_{4,3}$ ) o

diámetro De Brouckere, el cual es la suma de la relación que existe entre el volumen de los glóbulos en cada intervalo de tamaño, multiplicado por el diámetro medio del intervalo de tamaños. Se ha notado que el  $(d_{4,3})$  es más sensible a la presencia de partículas grandes de emulsión que  $(d_{3,2})$ , por lo que es más efectivo para evaluar el fenómeno de la floculación (McClements, 2005).

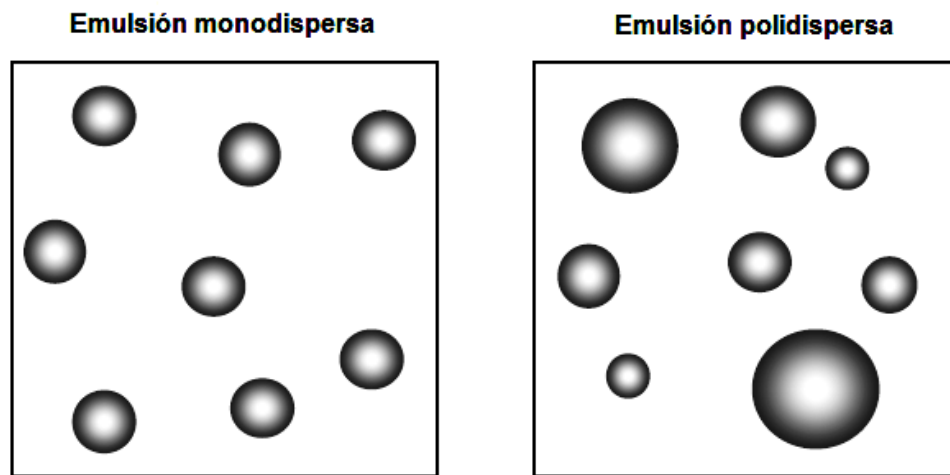


Figura 1.11 Tipos de emulsión según el tamaño de partícula (McClements, 2005).

### 1.2.5. Estabilidad

Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables desde el punto de vista fisicoquímico, su separación en dos fases inmiscibles puede ser rápida o lenta de acuerdo con su estabilidad cinética (Comas y col., 2006).

El término “emulsión estable” es en general usado para describir la capacidad de la emulsión para resistir cambios en sus propiedades con el tiempo (McClements, 2005).

Una emulsión físicamente estable es aquella que no tiene cambios perceptibles en su distribución de tamaño, en el estado de agregación de sus glóbulos, en su arreglo espacial dentro de la muestra, ni fuera de la escala de tiempo utilizada para su observación (Dickinson, 2003).

Hay varios factores y parámetros que afectan las propiedades de una emulsión, incluyendo las condiciones de mezclado y homogenizado, la proporción de los componentes de la emulsión, las condiciones ambientales, entre otros (Mirhosseini y col., 2008).

Por otro lado la estabilidad de la emulsión se relaciona con varios factores como los fenómenos en la interfase, la viscosidad de la fase continua, la fracción volumen de la fase dispersa, el tamaño promedio de los glóbulos y su distribución (Dickinson y Ritzoulis, 2000).

La combinación de proteínas y polisacáridos provee al sistema una alta actividad superficial y alta viscosidad formando espesores cargados tipo gel que pueden adsorberse entre las capas e incrementar la estabilidad de la emulsión (Sun y col., 2007). Sin embargo, con un bajo contenido de polisacárido la emulsión no se estabiliza adecuadamente, las cadenas de polímero se pueden enlazar en pares adyacentes a los glóbulos de aceite cubiertos con proteína y permitir la floculación por puenteo o la coalescencia. Por otro lado, un alto contenido de polisacárido suficiente para cubrir totalmente la superficie de las partículas cubiertas con proteína, en la misma emulsión pudiera llegar a re-estabilizarla como resultado de una combinación de estabilización electrostática y estérica, pero si el contenido de polisacárido se excede es posible promover la floculación por agotamiento (Dickinson y col., 1998; Dickinson y col., 2000).

Por lo tanto, la estabilidad puede ser medida por medio de la velocidad a la cual la emulsión crema, floclula o coalesce. La velocidad de estos cambios puede ser obtenida mediante la determinación del tamaño y distribución de los glóbulos de aceite en la emulsión, a su vez esta determinación puede servir para dos propósitos: estimar la calidad de emulsiones concentradas y predecir la estabilidad de una emulsión en el producto terminado (Mirhosseini y col., 2008).

#### **1.2.5.1. Mecanismos de desestabilización**

Las emulsiones pueden experimentar diferentes inestabilidades. Las que involucran en primera cambios en el tamaño de partícula, como son la coalescencia, la inversión y ruptura, las cuales tienen una reacción en cadena sobre los efectos del cremado, y las que involucran un reordenamiento espacial de los glóbulos respecto a los demás y con respecto al marco de referencia, como son la floculación y el cremado (Lizarraga y col., 2008).

Los principales fenómenos de desestabilización que afectan la homogeneidad de las emulsiones son la migración de partículas o separación gravitacional (cremado) debido a la

diferencia que existe entre la densidad de las fases dispersa y continua, y a la variación o agregación de tamaño (coalescencia, floculación) (Mengual, 1999).

En la floculación, dos glóbulos llegan a ligarse entre sí, siendo separados sólo por una delgada capa de líquido. Cuando más glóbulos son involucrados, se forma un agregado, donde las moléculas emulsificantes permanecen en la superficie de los glóbulos individuales durante el proceso. Pero si la delgada capa de líquido entre los glóbulos se rompe se forman glóbulos más grandes y entonces ocurre la coalescencia. La coalescencia se caracteriza por una distribución amplia de tamaño entre los glóbulos, pero sin la presencia de agregados. Finalmente cuando los glóbulos alcanzan un tamaño tal que son reconocibles a simple vista ocurre la separación de fases y las dos capas son visibles. El cremado ocurre cuando las partículas dispersas clarifican o flotan con respecto a la fase continua (Figura 1.12) (Roland y col., 2003).

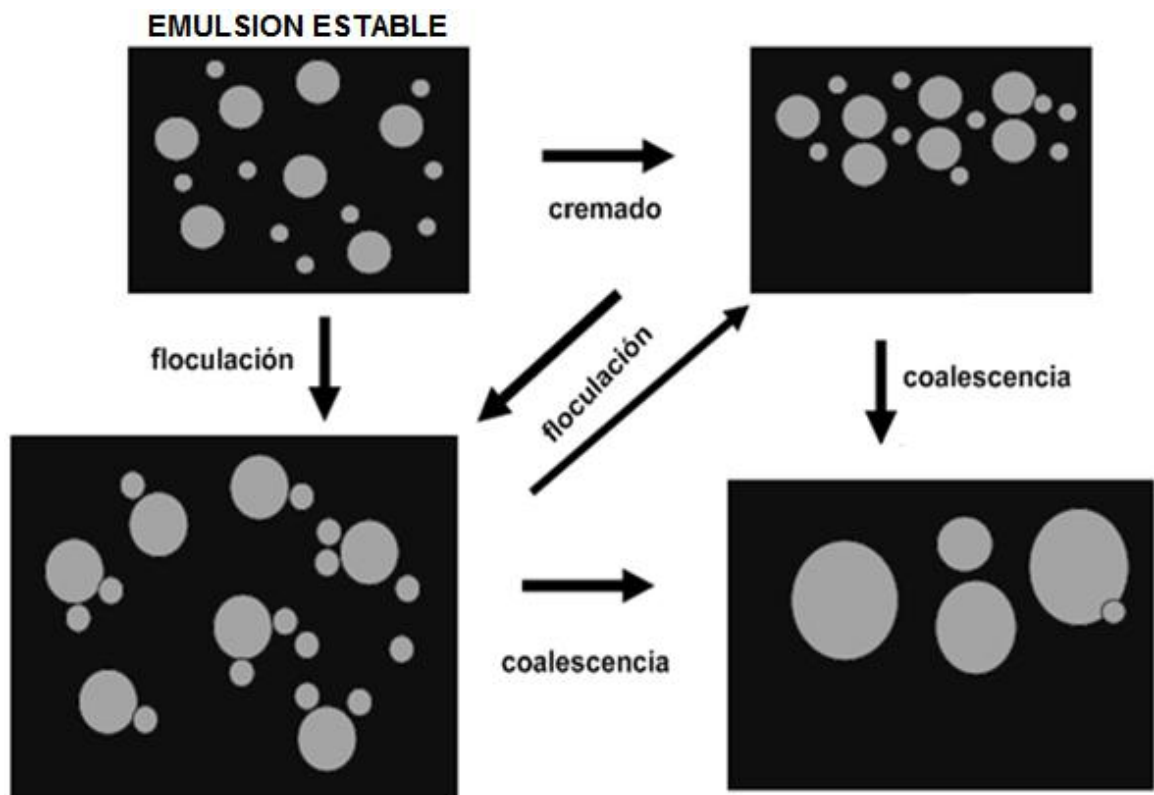


Figura 1.12 Fenómenos de desestabilización más comunes ocurridos en emulsiones ([http://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec\\_far/emulsiones.pdf](http://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/emulsiones.pdf)).

### 1.2.5.1.1. Cremado

El cremado es el proceso por el cual los glóbulos de emulsión tienden a flotar y subir a la parte superior del contenedor para formar una fase empaquetada más densa, sin cambios en el tamaño de partícula (Hill y col., 1998; Robins, 2000).

En una emulsión aceite-agua preparada recientemente en ausencia de emulsificantes ni estabilizantes, la manifestación inicial de inestabilidad más común es el cremado, la cual conduce típicamente a la separación macroscópica de las fases con la separación de las regiones de nata y clarificado. Inicia con el movimiento hacia arriba de los glóbulos de aceite y produce el colapso de la estructura por la influencia de la gravedad. Esto debido a una diferencia significativa de densidades entre el fase dispersa y la fase continua que con el tiempo resulta en la acumulación de glóbulos en la parte superior del contenedor. Seguido por la coalescencia del glóbulo en la parte superior de la muestra (Manoj y col, 1998; Dickinson, 2003, Lizarraga y col., 2008).

La importancia comercial del cremado es grande, va desde la percepción del consumidor hasta la calidad influenciada por la apariencia (Lizarraga, 2008). Se estima que el 40% del costo del desarrollo de una nueva emulsión alimenticia incurre en pruebas de vida de anaquel, donde el criterio principal es el comienzo de una separación visual (Robins, 2000).

La composición de la emulsión impone el comportamiento del cremado y de acuerdo con la ley de Stokes, la velocidad terminal ( $V_s$ ) de una partícula aislada en un medio homogéneo es:

$$V_s = \Delta\rho d^2 g / 18n$$

donde  $\Delta\rho$  es la diferencia entre la densidad del aceite y la fase continua,  $d$  es el diámetro de los glóbulos,  $g$  es la aceleración gravitacional y  $n$  es la viscosidad del medio. Por lo tanto, glóbulos grandes creman más rápido que los pequeños (Blijdenstein y col., 2003).

Cuando hay un número significativo de glóbulos o fracción volumen  $\phi$ , los glóbulos se avecinan y el consecuente flujo de la fase continua en contra del movimiento de los

glóbulos causa la reducción de la velocidad terminal, de manera que la nata se forma a cierta velocidad  $V = V_s \times f(\varphi)$  (Robins, 2000).

El cremado puede ser de varios tipos: IM (emulsión monodispersa), IP (emulsión polidispersa), II (emulsión polidispersa tipo 2) y III (emulsión polidispersa tipo 3). El tipo IM se presenta en emulsiones monodispersas y representa un comportamiento ideal. Inicialmente la fracción volumen es uniforme, pero después de cierto tiempo los glóbulos se mueven a la parte superior de la emulsión a cierta velocidad y algunos inician la formación de la capa de nata, desde que todos los glóbulos se mueven a la misma velocidad la capa inferior a ellos es la fase continua y tiene una marcada interfase entre ellas. De igual manera hay un límite marcado entre los glóbulos de cremado y la apretada capa de nata. En este caso, la velocidad de cremado es constante desde un  $t = 0$  hasta alcanzar la capa de nata (Figura 1.13a.) (Robins, 2000).

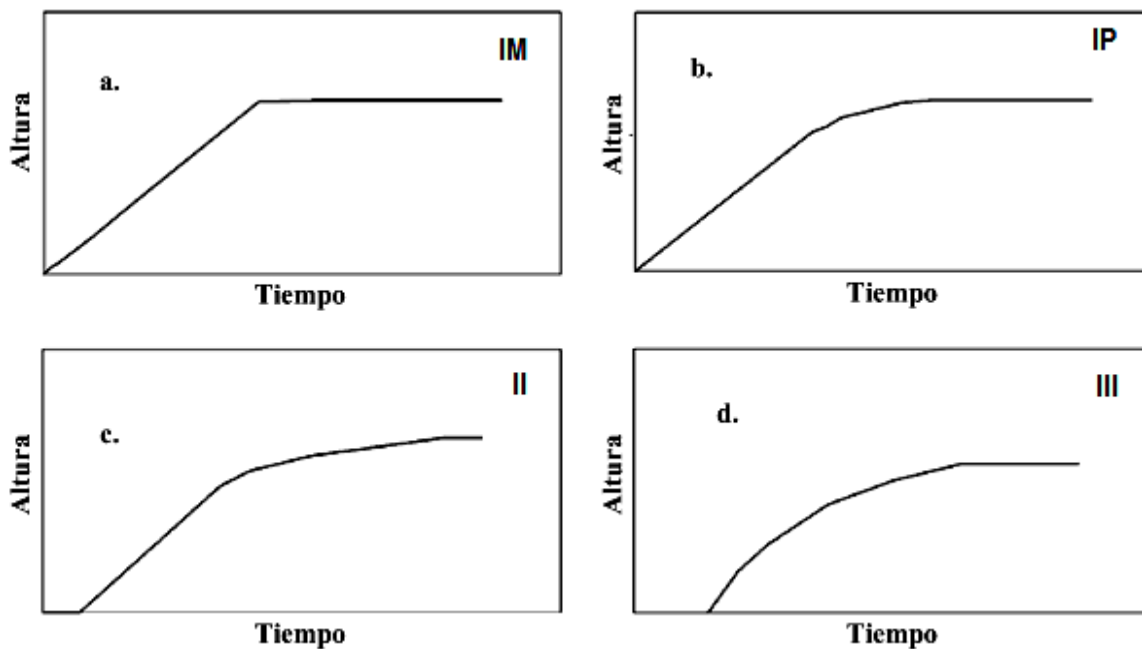


Figura 1.13 Diagrama esquemático de la velocidad de migración de los glóbulos de emulsión en los diferentes tipos de cremado (Robins, 2000).

Cuando los glóbulos son polidispersos se lleva a cabo el cremado tipo IP, en él hay un límite difuso que separa la emulsión del clarificado. Este límite es difícil de monitorear visualmente, dentro del sistema los glóbulos aún se mueven a velocidad constante dependiendo de su tamaño (Figura 1.13a). El comportamiento de la velocidad de cremado

es parecido al tipo IM, sólo que la capa de nata puede reacomodarse hasta empaquetarse más que en las emulsiones monodispersas (Figura 1.13b) (Robins, 2000).

Al utilizar polímeros en la fase continua como son los polisacáridos, la viscosidad de ésta aumenta y hay un mayor dominio de las interacciones existentes entre los glóbulos, reduciendo así la velocidad de cremado de Stokes. En algunos casos, estos polisacáridos se adsorben en la superficie de los glóbulos y causan floculación por puenteo, pero más comúnmente, estos polímeros permanecen en la fase continua a causa de la agregación de los glóbulos por efectos de agotamiento. Si se forman pequeños agregados, éstos pueden cremar individualmente y tener un comportamiento similar al tipo IP, con un amplio tamaño de partícula y un significativo estado de compactación de la nata, los glóbulos se reacomodan cuando los agregados están en contacto (Figura 1.14b) (Robins, 2000).

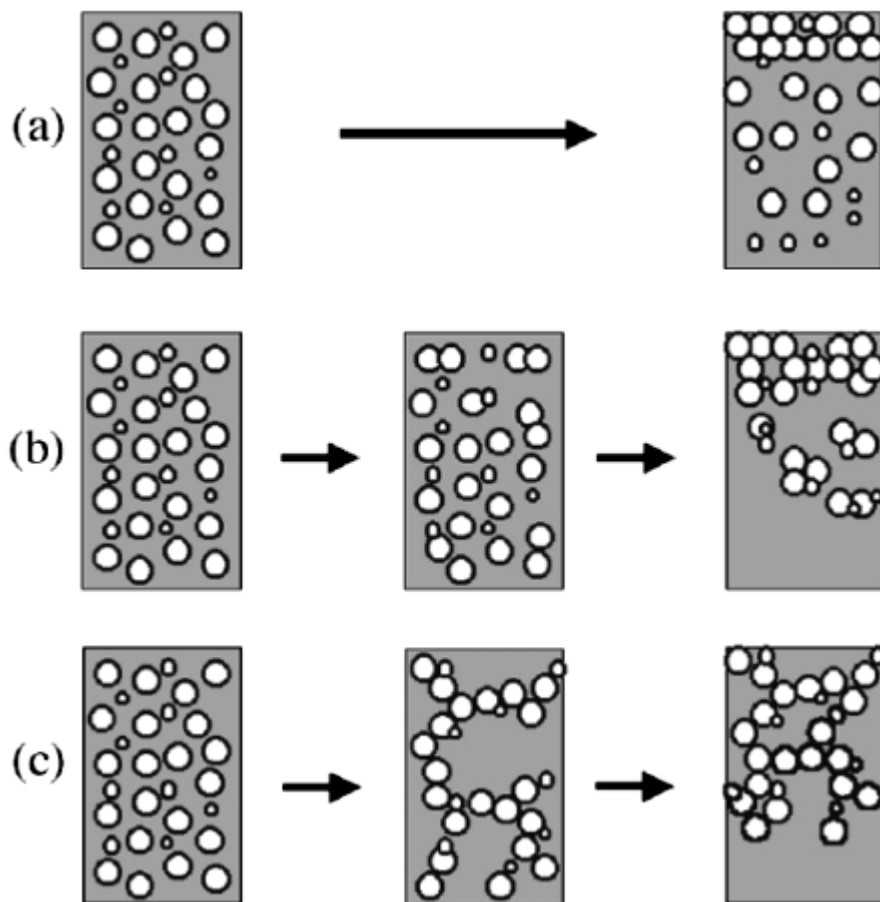


Figura 1.14 Evolución estructural de las emulsiones aceite-agua durante el cremado: (a) cremado de glóbulos individuales, (b) cremado de agregados discretos, (c) cremado debido a la formación de una red emulsión gel que se contrae por efecto de la gravedad (van Aken, 2003).



Si hay una gran fracción volumen inicial de aceite y fuertes interacciones de agotamiento, la emulsión forma estructuras en red simple, las cuales pueden ser descritas como partículas de gel presentando un comportamiento tipo II (Figura 1.14c). El límite inferior es generalmente intenso, claramente visible y puede ascender en el contenedor en tres etapas. Inicialmente, no hay movimiento visible (fase de retraso), posteriormente la red sube continuamente hasta alcanzar la capa de nata, finalmente la fracción volumen sufre compactación con el tiempo hasta alcanzar a una capa uniforme (Figura 1.13c).

El cremado tipo III, es un caso especial del tipo II, donde la red de glóbulos inicialmente es una fuerza de soporte y se comporta como una nata compactada. Hay una fase de retraso antes del cremado y el inicio de la compactación (Figura 1.13d). Las formulaciones que aparentemente son estables al cremado a menudo retrasan la separación de fases, con una estabilidad temporal, ya que la fase de retraso puede ser diseñada para durar meses o años (Robins, 2000).

#### **1.2.5.1.2. Flocculación**

La flocculación es la agregación de los glóbulos que depende de las interacciones entre las capas de estabilizante, las cuales a su vez dependen de factores como la superficie del biopolímero, el espesor de la capa, la densidad de la superficie, las condiciones de la solución acuosa (especialmente pH, fuerza iónica, el contenido de iones divalentes). En ella la distribución de tamaño de partícula permanece sin cambios (Hill y col., 1998; Dickinson, 2003).

En adición al aumento de la viscosidad o gelificación de la fase continua, los polisacáridos pueden también inducir la flocculación de los glóbulos de emulsión. Cuando la flocculación de los glóbulos se produce más rápido que el cremado por efecto de la gravedad, se forma una débil y algunas veces transitoria red de glóbulos de aceite, que si es lo suficientemente fuerte puede mantener los glóbulos en suspensión y hacer estable la emulsión por cierto periodo de tiempo (Manoj y col., 1998). Tal sistema es denotado como una emulsión-gel. Esta emulsión-gel es sensible a la gravedad inducida por la ruptura del gel, la cual permite la separación del clarificado. El clarificado separado limita la vida de anaquel de la

emulsiones y por lo tanto el control de este proceso es importante (Blijdenstein y col., 2004).

La estabilidad de la red de glóbulos de emulsión contra la fuerza de gravedad está relacionada con la microestructura, la cual depende del tipo de interacción glóbulo-glóbulo. Generalmente son distinguidos dos tipos de interacciones gota-gota por inducción del polisacárido: floculación por agotamiento y floculación por puenteo. El tipo de interacción que prevalece depende de la interacción entre el polisacárido y la superficie de la gota de emulsión (Blijdenstein y col., 2004).

### Mecanismos de floculación

Si el polisacárido no está ligado a la superficie de la gota se produce un agotamiento de polisacárido en la región alrededor de los glóbulos de emulsión que induce la atracción glóbulo-glóbulo. La energía de atracción es determinada por la concentración del polisacárido, el intervalo de la interacción es determinado por el radio y giro de la molécula de polisacárido. Esto porque, las uniones formadas por el agotamiento son débiles, reversibles y flexibles (Blijdenstein y col., 2004).

La floculación por agotamiento surge por la presencia de biopolímero no adsorbido en la fase continua a causa de un incremento en las fuerzas atractivas entre los glóbulos (McClements, 2004), esto ocurre cuando pares de partículas aproximan sus superficies a una distancia más pequeña que el diámetro promedio de la molécula libre de polímero en solución acuosa. La exclusión del polímero del espacio que ocupaba es asociado con las fuerzas interpartícula atractivas, resultado de la tendencia del solvente a salir del espacio que ocupa por influencia del gradiente de presión osmótica local. A bajas concentraciones de polímero libre, la entropía vinculada a la agregación de partículas supera el efecto de agotamiento y mantiene estable al sistema. Más allá de cierta concentración crítica del polímero ocurre la floculación por agotamiento, permitiendo la separación de fases (Figura 1.15) (Dickinson, 2003).

La desestabilización de la emulsión se manifiesta con un rápido cremado y la separación del clarificado. Los polisacáridos no adsorbidos permiten el mecanismo de floculación por agotamiento, mientras que cuando ocurre la mezcla entre los biopolímeros el puenteo

generalmente se observa a bajas concentraciones de polisacárido y la aparente re-estabilización con respecto a la separación del clarificado a altas concentraciones por la formación de agregados y redes tipo gel de larga duración (Dickinson, 2003; Jourdain y col., 2008).

Cuando una molécula simple de polisacárido se adsorbe entre dos o más glóbulos de emulsión, los glóbulos se interconectan por puentes. La concentración óptima de polisacárido para la floculación por puenteo es la concentración a la cual la mitad de la interfase está cubierta con polisacárido. La atracción es determinada por la interacción entre el polisacárido y la superficie de la gota. Los enlaces formados por el puenteo son relativamente fuertes e irreversibles. Además los enlaces son inflexibles comparados con los enlaces del agotamiento, porque el polisacárido se une entre las interfases de los glóbulos (Figura 1.15) (Blijdenstein y col., 2004).

La floculación por puenteo en los glóbulos de emulsión puede ser inducida también por adhesión de partículas coloidales cargadas opuestamente e incluso por células bacterianas (Dickinson, 2003).

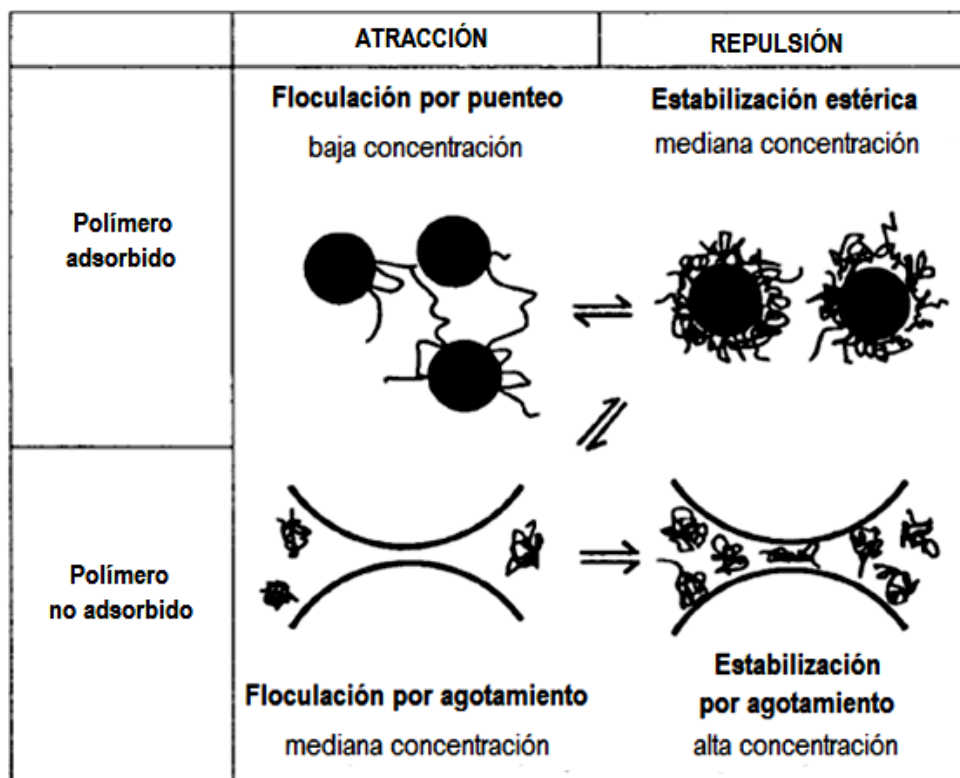


Figura 1.15 Representación esquemática de la floculación (Schramm, 2005).

La floculación por puenteo es más pronunciada a concentraciones de polisacárido donde la superficie de los glóbulos es sólo cubierta parcialmente. Si hay una concentración alta de polisacárido presente en la fase continua, entonces la posibilidad a que ocurra la floculación por puenteo disminuye porque hay suficiente biopolímero que cubra completamente la superficie de los glóbulos. Entonces, si la concentración de biopolímero libre es suficientemente alta puede ocurrir la floculación por agotamiento (McClements, 2004).

### 1.2.5.1.3. Coalescencia

La coalescencia es el proceso por el cual la colisión de dos o más glóbulos resulta en la formación de un glóbulo más grande (Figura 1.16). Este proceso reduce el efecto del área superficial neta en los sistemas de emulsiones y está asociado con la disminución de la energía superficial. La coalescencia permite el rompimiento irreversible de la emulsión, porque esencialmente involucra la disolución de la barrera interfacial. La inestabilidad de la emulsión refleja la coalescencia de los glóbulos en glóbulos más grandes que puede ser retardada por la barrera interfacial de proteína, que actúa como fuerza repulsiva entre los glóbulos. La coalescencia resulta en la disminución del área total (Phillips y col., 1994).

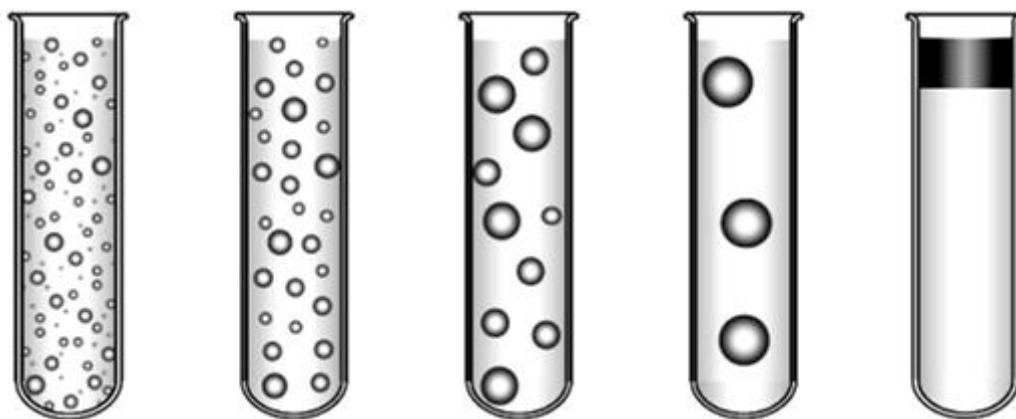


Figura 1.16. Representación esquemática de la coalescencia (McClements, 2005).

Si dos glóbulos se aproximan entre sí, la fase continua entre ellos fluye causando que la superficie activa del material también sea barrida de la zona superficial. Permitiendo cambios en el gradiente de tensión interfacial por el efecto Gibbs-Marangoni, el cual se opone al proceso de adelgazamiento de barrera. Es entonces que, la geometría de los glóbulos altera gradualmente su superficie convexa llegando a ser aplanada y aproximando a los glóbulos uno de otro. De esta manera el polímero y la interfase deben ser realineados a

la forma de la superficie y alterar su tamaño. Por lo tanto los ingredientes de la superficie activa deben trasladarse a las partes adelgazadas y ayudar a la estabilización. Sólo cuando las interfases tienen adelgazamientos y aún cierto espesamiento crítico, habrá ruptura y unión en la fase dispersa de los glóbulos. Se piensa que el rompimiento espontáneo de la barrera es muy bajo y que la coalescencia usualmente ocurre cuando los glóbulos han estado juntas por un largo periodo de tiempo, en una capa de crema o flóculos (Hill y col., 1998).

#### 1.2.5.1.4. Inversión de fases

La inversión de fases en las emulsiones es el cambio del aceite por el agua o viceversa, que ocurre cuando la fracción volumen de aceite es lo suficientemente alta, como en el caso de la margarina o la mantequilla (Figura 1.17) (Hill y col., 1998).

Las emulsiones pueden ser estables como aceite-agua o agua-aceite, pero normalmente no como algo intermedio, aunque pueden formarse emulsiones múltiples. La inversión parece implicar un salto de un estado al otro. Con los abruptos cambios en el tipo de emulsión se marcan cambios en las propiedades de la emulsión, por ejemplo en la viscosidad y la conductividad térmica. La inversión de fases es compleja y probablemente involucra los procesos de cremado, floculación y coalescencia. La fracción volumen de las dos fases es un factor muy importante en el cambio de un estado a otro (Hill y col., 1998).

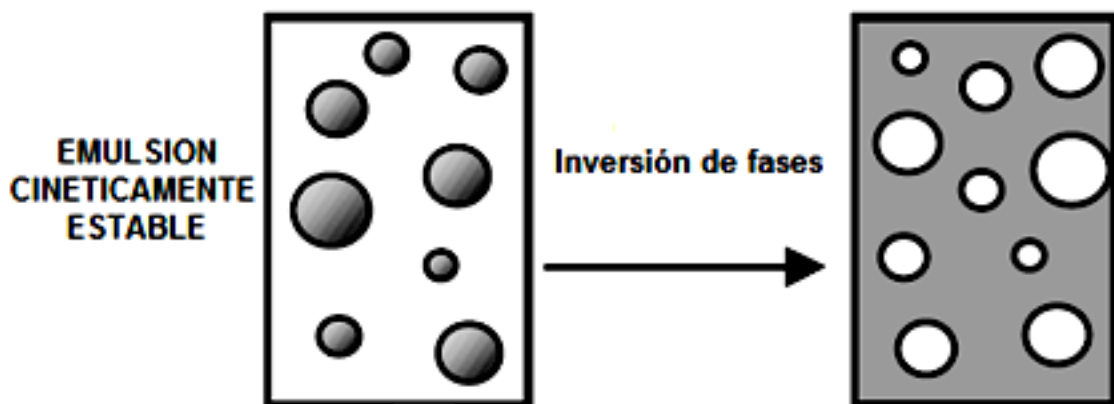


Figura 1.17 Representación esquemática de la inversión de fases (McClements, 2005).

### **1.2.5.2. Métodos de medición**

Comúnmente las técnicas utilizadas para la detección física de la desestabilización se llevan a cabo a simple vista o mediante instrumentos analíticos más precisos y exactos que incluyen la difracción de luz, conductividad eléctrica, microscopia, ultrasonido, espectroscopia, centrifugación, contador Coulter, resonancia magnética nuclear (NMR), entre otros. Pero la mayor limitación para la utilización de estos métodos es que carecen de confiabilidad para el estudio de las emulsiones en tiempo real (Phillips y col., 1994; Mengual, 1999; McClements, 2005).

Una técnica ideal sería exacta, rápida y aplicable en emulsiones alimenticias reales dentro de un intervalo de condiciones de proceso. También sería una ventaja hacerla en línea con mediciones de control no invasivas (Coupland y McClements., 2001).

Las propiedades de las emulsiones alimenticias que más contribuyen a la percepción de sus características son el tamaño de partícula y la concentración de aceite. Sin embargo, la determinación directa de estos parámetros es difícil porque los glóbulos son pequeños. La microscopia electrónica proporciona una adecuada resolución pero la preparación de la muestra es disruptiva y puede generar engaños. La resonancia magnética nuclear ha sido utilizada para la caracterización de emulsiones alimenticias concentradas, pero este instrumento es caro y difícil de operar. La medición de las propiedades eléctricas de las emulsiones pueden ser relacionadas con la distribución del tamaño de partícula (ej.: contador Coulter, técnicas electroacústicas) pero estas técnicas están limitadas por la carga de las partículas y la conductividad del medio. Algunas de estas técnicas son inapropiadas para emulsiones estabilizadas con proteínas, como el contador Coulter, debido a que el uso de sales puede alterar la conformación interfacial de las proteínas e interferir con el estado de dispersión de la emulsión. Los sensores ultrasónicos tienen el potencial de cubrir muchas de las necesidades anteriormente mencionadas, esto ha sido demostrado relacionando en una emulsión la difracción y el ultrasonido con el tamaño y concentración de los glóbulos, así como con propiedades fisicoquímicas de las fases que la componen (Phillips y col., 1994; Coupland y McClements, 2001).

### **1.2.5.2.1. Difracción de luz láser**

La difracción de luz láser es la técnica más utilizada para la caracterización de las emulsiones alimenticias debido a su facilidad de uso y versatilidad, es principalmente utilizada para determinar la distribución y el tamaño de las partículas (Coupland y McClements, 2001; McClements, 2005).

#### **1.2.5.2.1.1. Difracción dinámica de luz láser**

La difracción dinámica de luz láser por sus siglas en inglés DLS es también conocida como difracción de luz quasi-elástica. Es una de las técnicas experimentales más populares para la caracterización de líquidos complejos (suspensiones coloidales, soluciones de polímero, emulsiones, geles). Su uso mide la velocidad de difusión de la partícula. El movimiento de los datos es procesado convencionalmente y se deriva en la distribución de tamaño, donde el tamaño es dado como el “radio de Stokes” o “radio hidrodinámico” de partícula. El diámetro hidrodinámico depende de la masa y la forma (conformación) (Holoubek, 2007).

La DLS es particularmente útil para detectar la presencia de cantidades pequeñas de agregados de polímero y proteína, y para el estudio de muestras que contiene una gama muy grande de masas de partícula. Es valiosa para el monitoreo de cambios en el tamaño. Se basa en la correlación entre el coeficiente de difusión y el tamaño de partícula, DLS es ampliamente usada como un conveniente y no destructivo método para la medición del tamaño de partículas. La técnica es utilizada para la caracterización de partículas en un amplio intervalo de tamaños desde unos cuantos nanómetros hasta varios micrómetros (Holoubek, 2007).

Un instrumento que utiliza DLS es el difractómetro Mastersizer 2000 diseñado para medir el tamaño de partícula, o bien para determinar la distribución de los diferentes tamaños dentro de una muestra. Su funcionamiento se basa en la Teoría Mie, la cual predice con exactitud la forma en que la luz es difundida a través de las partículas homogéneas y esféricas independientemente del tamaño de las mismas, se ocupa de la manera en que la luz atraviesa la partícula o es absorbida por la misma. Esta teoría es exacta, pero requiere de información específica acerca de la partícula a estudiar, tal como su índice de refracción y su absorción (MAN0247S, 1999; Andrea, 2010).

Mastersizer 2000 trabaja utilizando una unidad óptica que capta la pauta real de dispersión de un campo de partículas y continuación, hace uso de dicha teoría y calcula el tamaño de las partículas que han creado la pauta en cuestión.

La determinación del tamaño de partícula se realiza en condiciones de alta dilución y con agitación, con el objeto de que las gotas se distribuyan de manera uniforme. Un volumen pequeño de la emulsión se coloca en un recipiente con agua y un haz de radiación láser incide sobre una cubeta interna transparente por donde recircula la emulsión diluida. La luz dispersada en distintos ángulos por gotas de diferente tamaño pasa por un complejo sistema óptico e incide posteriormente sobre un arreglo de detectores obteniendo un patrón angular de luz dispersada. El software incorporado en el equipo se encarga de traducir este patrón en la correspondiente distribución de tamaño de partícula (Figura 1.18) (Andrea, 2010).

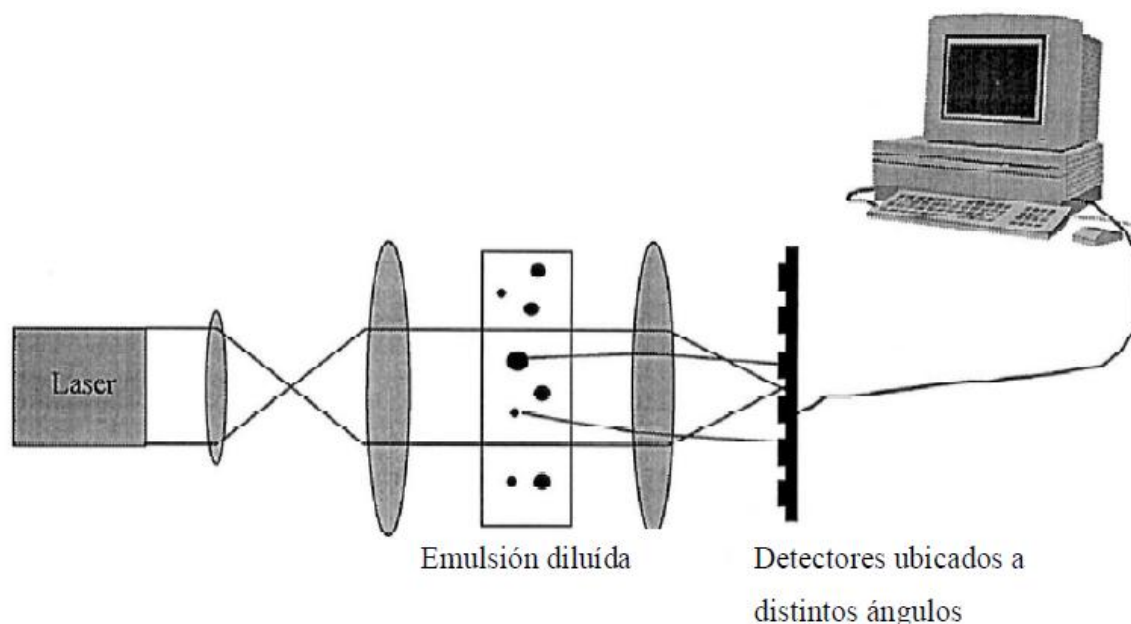


Figura 1.18 Componentes de un equipo de difracción dinámica de luz laser (Andrea, 2010).

#### **1.2.5.2.1.2. Difracción múltiple de luz láser**

La difracción múltiple de luz láser por sus siglas en ingles MLS mide y analiza el fenómeno de inestabilidad en dispersiones de líquidos coloidales con una fracción volumen de 0 a 0.95, con partículas de  $0.1\mu\text{m}$  a  $1\text{mm}$ , de 5 a 50 veces más rápido que si se llevara a cabo a simple vista. Es también una técnica utilizada para caracterizar el estado de



dispersión en muestras coloidales (para propósitos de control de calidad) y para medir el diámetro de partícula en dispersiones (para análisis), así como para la caracterización de la estabilidad fisicoquímica del sistema y la medición de la velocidad de desestabilización de los glóbulos en emulsiones (Mengual, 1999; Bru y col., 2004).

MLS está asociada con el escaneo vertical de la muestra, es como un ojo electrónico de alta resolución que permite visualizar el fenómeno de inestabilidad antes de ser visible para el ojo humano y calcular parámetros físicos y cinéticos (Bru y col., 2004).

La emulsión se coloca en un tubo vertical de vidrio y un haz monocromático de luz infrarroja que pasa de un lado a otro (Figura 1.19). El porcentaje de luz transmitida o difractada es medido a lo largo de la emulsión usando uno o dos detectores para recibir el haz que recorre de arriba abajo la muestra utilizando un motor paso a paso. La variación en la concentración de glóbulos con respecto a la altura de la emulsión puede deducirse como el porcentaje de luz transmitida o difractada, las teorías de Mie, Rayleigh y ópticas en general (Bru y col., 2004; McClements, 2005).

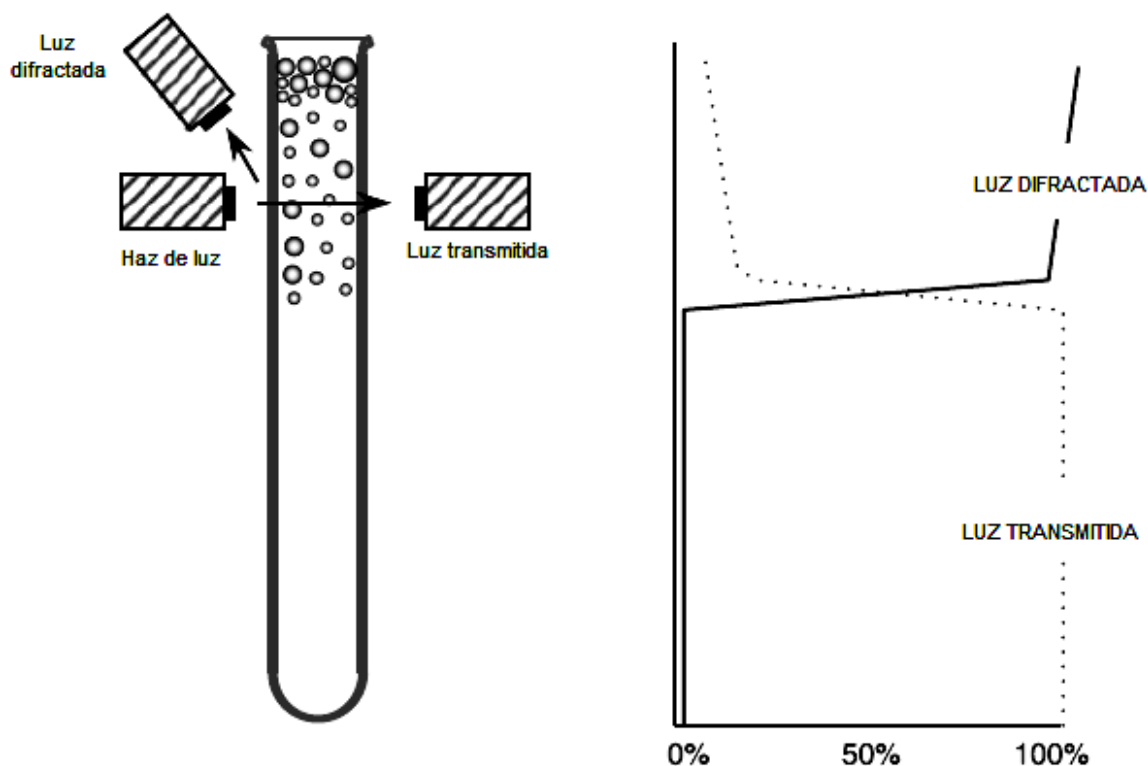


Figura 1.19 Funcionamiento de un difractómetro múltiple de luz láser (McClements, 2005).

Para el estudio de emulsiones concentradas, esta técnica permite un conveniente monitoreo que es sensible a la aparición de la capa clara en la parte inferior del tubo, así como de la capa de crema formada en la parte superior, en una fase bastante temprana del proceso de separación (Jourdain y col., 2008).

Uno de los instrumentos comerciales que basan su funcionamiento en MLS es el analizador óptico Turbiscan MA2000. Está compuesto de un cabezal, conformado por una fuente de impulsos de luz infrarroja (longitud de onda  $\lambda = 850$ ) y dos detectores sincronizados (uno de transmisión y otro de retrodispersión). El detector de transmisión recibe la luz que atravesó la muestra en un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ , mientras que el detector de retrodispersión recibe la luz que fue difractada por la muestra con un ángulo de incidencia de  $135^\circ$ . El cabezal escanea a lo largo de la muestra (alrededor de 65 mm), adquiriendo datos de transmisión o retrodispersión cada  $40 \mu\text{m}$  (Figura 1.20) (Mengual, 1999).

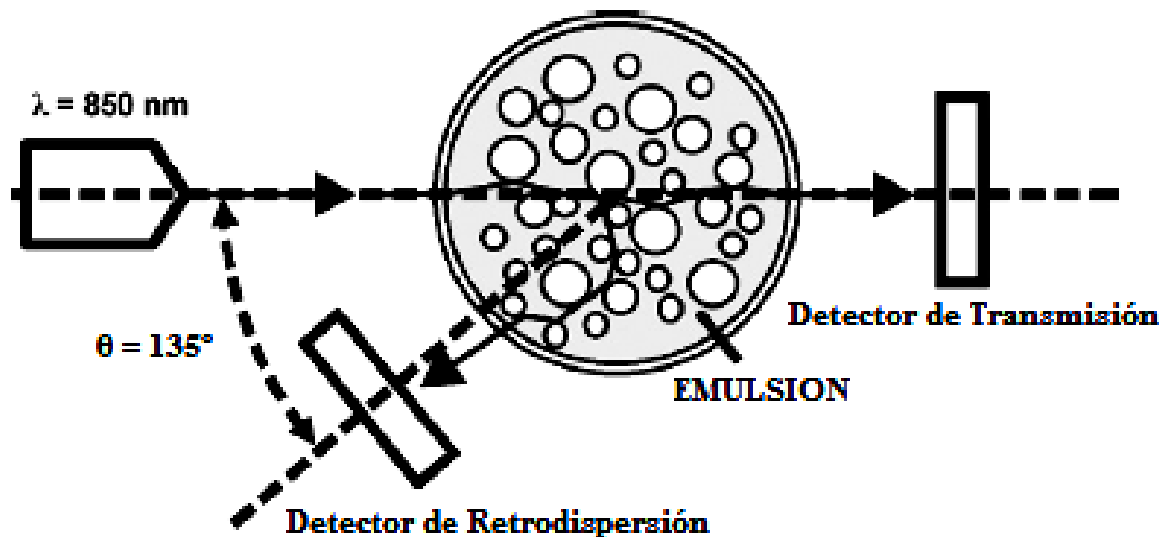


Figura 1.20 Funcionamiento de Turbiscan MA2000 (Pizzino y col., 2009).

La mayor ventaja que tiene MLS comparada con otras técnicas ópticas de análisis como la microscopía y la difracción dinámica de luz láser, es que ésta no es destructiva ya que la muestra no necesita diluirse. Este instrumento es capaz de detectar la migración de partículas y las variaciones en el tamaño en medios concentrados y ópticamente espesos (Burgos – Montes y Moreno, 2008).

### **1.2.5.2.2. Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica proporciona información acerca de la separación gravitacional en la emulsión. Puede ser obtenida insertando electrodos dentro del sistema y midiendo el cambio en la conductividad eléctrica que cruza a diferentes alturas y tiempos. Usando un modelo teórico apropiado la conductividad eléctrica de cada altura en particular de la emulsión puede ser convertida en concentración de glóbulo (McClements, 2005).

La fracción volumen de la fase dispersa puede ser convenientemente determinada mediante la medición de la conductividad eléctrica,  $\epsilon$ . La conductividad del agua es mucho mayor que la del aceite, entonces si hay una disminución en  $\epsilon$  el contenido de aceite en la emulsión aumenta. Esta es determinada usando una celda de conductividad, la cual consiste en una pareja de electrodos conectados a un circuito eléctrico capaz de medir la conductividad eléctrica de la muestra contenida entre los electrodos. La conductividad de la fase continua depende de la concentración de electrolitos presentes, por lo que es importante caracterizar las propiedades eléctricas de las fases componentes (McClements, 2005).

Esta técnica es utilizada para determinar la fracción volumen de la fase dispersa en emulsiones concentradas y ópticamente opacas, sin la necesidad de acondicionar la muestra. Las mediciones son independientes del tamaño de glóbulo, la conductividad eléctrica en la emulsión es dependiente del estado físico de sus constituyentes y es sensible a la fuerza iónica por lo que es necesario tomarlo en cuanto al llevar a cabo un análisis (McClements, 2005).

### **1.2.5.2.3. Microscopía**

Los métodos más directos para observar a través de la emulsión son la microscopía óptica y electrónica. Su mayor desventaja es que las estructuras delicadas de los flóculos pueden ser destruidas por los procedimientos utilizados para preparar las muestras que serán observadas, por otro lado en emulsiones concentradas es difícil determinar si dos glóbulos están floclados o a punto de aproximarse (McClements, 2005).

Estas técnicas tienen la capacidad de proveer información de sistemas estructuralmente complejos en forma de imágenes que son relativamente fáciles de comprender por los seres humanos. Cada técnica microscópica trabaja con diferentes principios fisicoquímicos que pueden ser usados para examinar diferentes niveles y tipos de organización estructural (McClements, 2005).

Un microscopio óptico tiene una serie de lentes que dirigen la luz a través de la muestra y amplían la imagen resultante. La resolución del microscopio óptico es determinada por la longitud de onda de la luz utilizada y el diseño mecánico del instrumento. Teóricamente la resolución límite de un microscopio óptico es de  $0.2 \mu\text{m}$ , pero en la práctica es difícil obtener mediciones confiables por debajo de  $1 \mu\text{m}$ , esto debido a las dificultades técnicas asociadas con el diseño y manufactura de los componentes del microscopio y por el movimiento Browniano de las partículas pequeñas causando que las imágenes aparezcan borrosas. Su aplicación es limitada en muchas emulsiones alimenticias porque éstas contienen estructuras con tamaños inferiores al límite de su resolución, pero puede proveer valiosa información acerca de la distribución de tamaño en las emulsiones que contienen glóbulos grandes por lo que puede ser utilizado para distinguir entre floculación y coalescencia (Figura 1.21) (McClements, 2005).

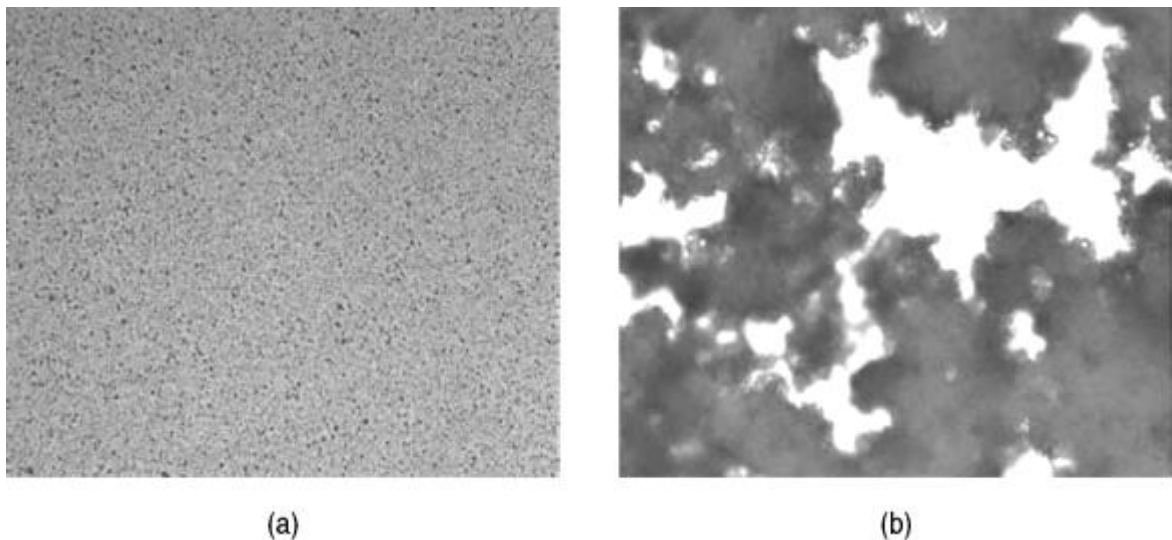


Figura 1.21 Micrografías de emulsiones aceite-agua que contienen glóbulos pequeños usando microscopio óptico: (a) no floculada, (b) floculada (Schramm, 2005).

La microscopia óptica puede involucrar a la transmisión o reflexión de luz, o bien a la luz polarizada incluyendo a la fluorescencia. La combinación de estas técnicas puede ser utilizada para observar diferentes especies dispersas. La reflexión de luz blanca puede hacer que las partículas dispersas sean fácilmente observadas, mientras que el modo de luz fluorescente hace visibles los glóbulos de aceite, todo con el mismo campo de visión en la muestra (Schramm, 2005).

El microscopio electrónico es ampliamente utilizado para examinar la microestructura de las emulsiones alimenticias, particularmente en aquellas que contienen componentes estructurales de menor tamaño, que no pueden ser vistas con la resolución del microscopio óptico ( $<1\mu\text{m}$ ), por ejemplo agregados de proteína, glóbulos pequeños de emulsión, cristales de hielo o aceite, micelas y membranas interfaciales. Es utilizado para proveer de información acerca de la concentración, dimensión y distribución espacial de las entidades estructurales dentro de la muestra, tanto en emulsiones aceite-agua como agua-aceite sólidas o líquidas, siempre que la microestructura no está alterada por la preparación de la muestra. Los microscopios electrónicos son equipos con piezas bastante grandes, relativamente caros de comprar y mantener (McClements, 2005).

Los microscopios electrónicos usan haces de electrones en lugar de haces de luz para determinar la microestructura de los materiales, estos rayos son dirigidos a través del microscopio utilizando una serie de campos magnéticos en lugar de lentes ópticos. Estos haces tienen una longitud de onda más pequeña que los haces de luz, por lo que son capaces de examinar objetos más pequeños; en principio el tamaño más pequeño a observar está por alrededor de 0.2 nm, pero en la práctica lo usual es 1 nm por las limitaciones en la estabilidad y rendimientos de las lentes magnéticas. Dos tipos de microscopio electrónico se utilizan comúnmente para examinar la estructura de los sistemas alimentarios: son la microscopía electrónica de transmisión (MET) y microscopía electrónica de barrido (SEM) (McClements, 2005).

En general, la microscopia electrónica es ampliamente utilizada por los científicos en alimentos para determinar el tamaño de los glóbulos de emulsión, la dimensión y estructura de los flóculos, la morfología de la superficie de los glóbulos y burbujas de aire,

el tamaño, forma y localización de los cristales de grasa y la microestructura de las redes tridimensionales de agregados de biopolímeros (McClements, 2005).

#### **1.2.5.2.4. Reología**

Ya que la floculación por agotamiento causa incremento en la viscosidad de la emulsión, por la eventual formación de partículas tipo gel, ésta puede ser monitoreada mediante la medición del cambio en la viscosidad o en sus propiedades viscoelásticas (McClements, 2005).

Las propiedades viscoelásticas pueden conocerse mediante una prueba mecánica dinámica, en la cual la muestra es modificada por una deformación que varía de manera sinusoidal con el tiempo, lo que resulta en un esfuerzo que varía de modo sinusoidal. El ensayo dinámico permite separar el esfuerzo debido a la deformación sinusoidalmente variable en sus componentes elástico ( $G'$ ) y viscoso ( $G''$ ) (Sharma y col., 2003).

Una indicación de la fuerza atractiva entre los glóbulos floculados puede obtenerse de las mediciones de viscosidad o módulo elástico contra esfuerzo. Con el incremento del esfuerzo los flóculos llegan a ser deformados y romperse, entonces la viscosidad o el módulo elástico disminuyen (McClements, 2005).

## **2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

### **2.1. Objetivos**

#### **Objetivo general**

Evaluar el efecto de la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) en emulsiones aceite-agua a concentraciones de 30 y 60% (v/v), almacenadas a 4, 25 y 40°C mediante difracción dinámica y múltiple de luz láser para determinar su estabilidad.

#### **Objetivos particulares**

1. Determinar la estabilidad a través de la distribución y tamaño de partícula en emulsiones aceite-agua a concentraciones de 30 y 60% (v/v), almacenadas a 4, 25, 40°C y elaboradas con la mezcla albúmina de huevo 2% - polisacárido 0.5% (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto), por medio de difracción dinámica de luz láser.
2. Determinar la estabilidad a través de la difracción múltiple por medio de retrodispersión de luz láser, en emulsiones aceite-agua a concentraciones de 30 y 60% (v/v), almacenadas a 4, 25, 40°C y elaboradas con la mezcla albúmina de huevo 2% - polisacárido 0.5% (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) y calcular velocidad de desestabilización de los glóbulos.

## **2.2. Materiales y métodos**

### **2.2.1 Materiales**

Albúmina de huevo (lote MA010906, Inova Alimentos, Avibel S.A. de C.V., México), carragenina  $\lambda$  (Carralat, lote PGU5303, Extractos Naturales Gelymar S.A.), goma tragacanto (tipo B-1 NF, Industrias Ragar S.A. de C.V., México), aceite de canola (Capullo, México) y agua purificada (Sta. María, México)

### **2.2.2. Preparación de mezclas acuosas albúmina de huevo – polisacárido**

Las disoluciones acuosas de albúmina de huevo 2% - polisacárido 0.5% (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) (p/p), se prepararon con agitación magnética a temperatura ambiente ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Primero se dispersó la albúmina de huevo, una vez incorporada en su totalidad se agregó el polisacárido correspondiente. Se adicionó azida de sodio al 0.05% como conservador.

Las mezclas fueron almacenadas en recipientes de plástico con tapa a temperatura de refrigeración ( $4 \pm 2^\circ\text{C}$ ) (refrigerador comercial, Nieto) durante 72 horas para su máxima hidratación. Una vez hidratada la mezcla se realizó la medición del índice de refracción a temperatura ambiente ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

### **2.2.3. Preparación de emulsiones**

Las emulsiones se prepararon al 30 y 60% (v/v). La emulsificación se llevó a cabo mediante un homogeneizador Ultra - Turax T25 Basic (IKA - Labortechnik, Alemania) a una velocidad de 24000 rpm a temperatura ambiente ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ), debido a que la agitación provoca el calentamiento del sistema, la temperatura fue controlada mediante un baño de agua fría ( $2 \pm 1^\circ\text{C}$ ) (Limited Cambridge CB2 5Q2, Grant Instruments). El tiempo de emulsificación para cada emulsión estudiada se presenta en el Cuadro 2.1.



Cuadro 2.1 Tiempo de emulsificación.

<b>EMULSIÓN</b>	<b>TIEMPO (min)</b>
30C	5
30T	6
60C	10
60T	12

Una vez preparadas las emulsiones, éstas fueron almacenadas a tres diferentes temperaturas: refrigeración ( $4 \pm 2^\circ\text{C}$ ) (refrigerador comercial, Nieto), temperatura ambiente ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ) (aire acondicionado, York) y en cámara con control de temperatura ( $40 \pm 2^\circ\text{C}$ ) (Instrumentos científicos, Craft).

#### **2.2.4 Distribución y tamaño de partícula**

La distribución del tamaño de partícula en función del tiempo se midió en las emulsiones almacenadas a 4, 25 y  $40^\circ\text{C}$  utilizando un difractómetro láser Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, RU) a temperatura ambiente ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

Previamente se determinó el índice de refracción, el cual fue de 1.3369 para las emulsiones elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$ , mientras que en las emulsiones preparadas con albúmina de huevo - goma tragacanto el índice de refracción obtenido fue 1.3372. Para la determinación del tamaño de partícula se colocaron 2 gotas de emulsión que fueron dispersadas por el equipo en agua purificada hasta obtener una obscuración del 15 - 20%. Posteriormente se obtuvo la distribución del tamaño de partícula expresada en % en volumen, a partir de la cual el software Mastersizer 2000 V5.40 calculó el diámetro De Brouckere, correspondiente al diámetro promedio volumen - longitud ( $d_{4,3}$ ), lo anterior se realizó por triplicado con 3 lecturas por muestra.

#### **2.2.5 Velocidad de desestabilización**

La retrodispersión de luz láser a través del tiempo en las emulsiones estudiadas y almacenadas a 4, 25 y  $40^\circ\text{C}$  fue monitoreada mediante un analizador óptico de escaneo vertical Turbiscan MA2000 (Formulation, Francia), a temperatura ambiente ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ) cada

24 horas, utilizando 6 ml de emulsión equivalentes a  $65 \pm 2$  mm de muestra aproximadamente (Figura 2.1).

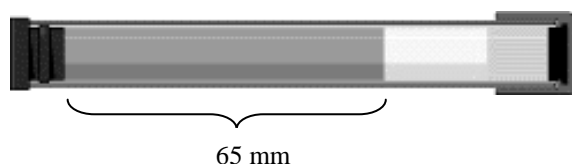


Figura 2.1 Celda de medición.

Turbiscan MA2000 permite visualizar gráficamente el comportamiento presentado por la emulsión mediante la transmisión de luz láser en la fase clarificada o por medio de la retrodispersión de luz en la fase opaca (Figura 2.2).

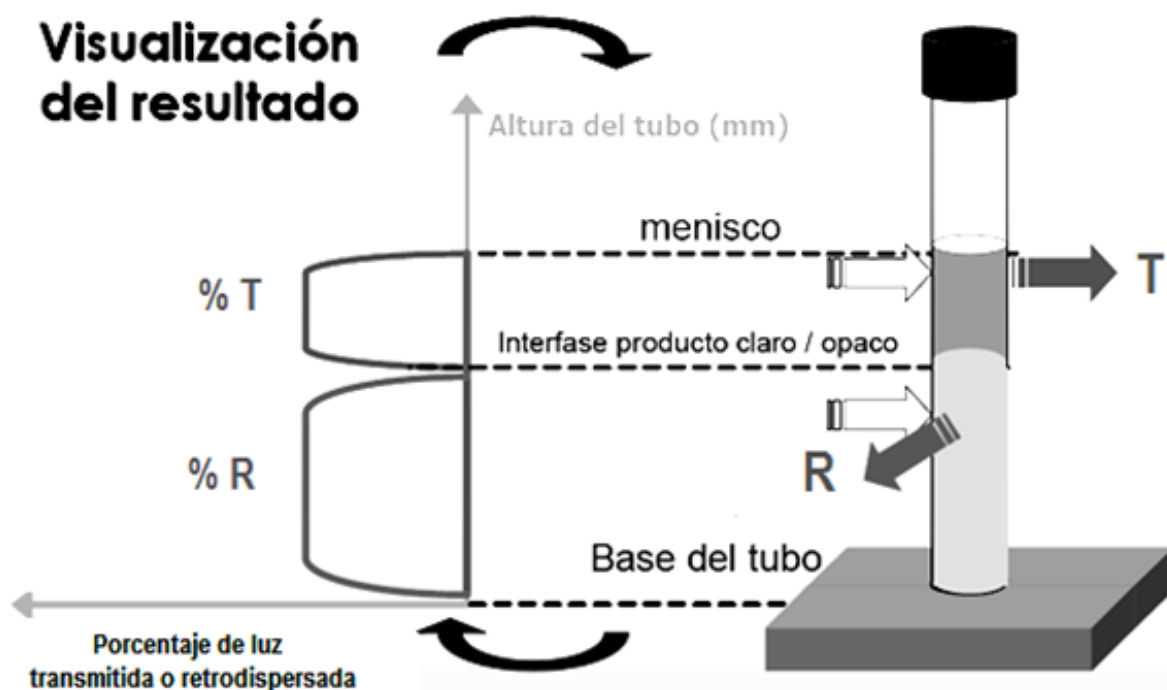
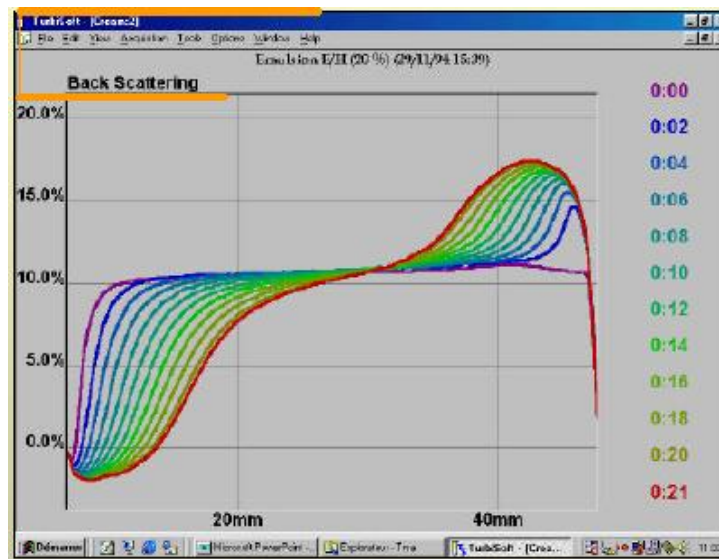


Figura 2.2 Representación esquemática de la visualización del resultado en el Turbiscan MA2000.

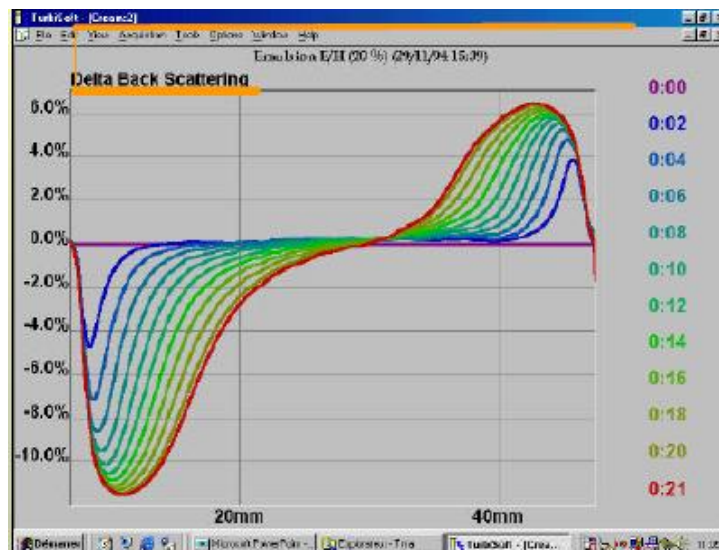
Los resultados obtenidos se pueden visualizar en modo de referencia (Figura 2.3(a)) o en modo bruto (Figura 2.3 (b)).

Cuando un resultado es visualizado en modo de referencia se entiende que los cambios observados se grafican en función a un cierto tiempo, comúnmente esto se realiza en base al tiempo cero ya que es la primer medición realizada y por lo tanto se considera el momento en el cual el sistema es más estable, por otro lado cuando los datos se presentan en modo

bruto estos se observan tal y como se fueron registrando sin tener un comportamiento de referencia.



(a)



(b)

Figura 2.3 Visualización del perfil de retrodispersión: (a) modo de referencia, (b) modo bruto.

En la Figura 2.4 se muestra el comportamiento típico presentado por un perfil de retrodispersión en modo de referencia para una emulsión aceite-agua; en la parte baja se presenta la formación de clarificado y en la parte superior se observa el fenómeno de cremado, con respecto al tiempo cero.

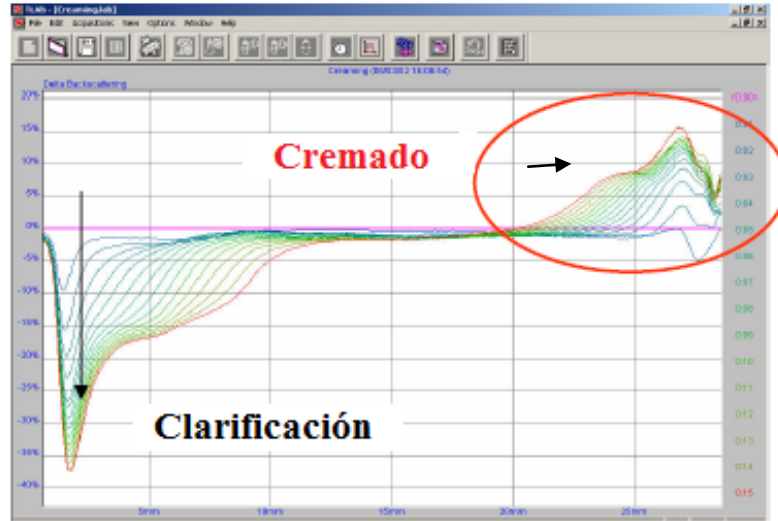
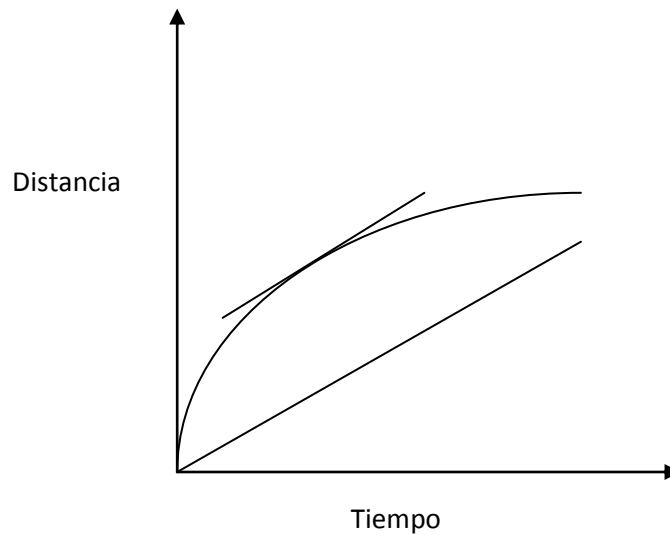


Figura 2.4 Perfil de retrodispersión en modo de referencia de una emulsión aceite-agua.

Una vez obtenido el perfil de retrodispersión en modo de referencia se elaboraron las cinéticas de desestabilización a partir de la distancia recorrida por los glóbulos y el tiempo de almacenamiento (Figura 2.5). Posteriormente se calculó la velocidad de desestabilización por periodos, en base a la ecuación de la recta:  $y = mx + b$ , donde la velocidad de desestabilización en cada etapa corresponde a la pendiente obtenida de la relación que existe entre la distancia recorrida por los glóbulos (espesor de pico de la zona clarificada) (mm) y el tiempo de almacenamiento (días).



2.5. Cinéticas de desestabilización presentadas en emulsiones aceite - agua.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Estabilidad a través de la distribución y tamaño de partícula**

##### **3.1.1. Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 30%**

La distribución de tamaño de partícula en las emulsiones al 30% elaboradas con carragenina  $\lambda$  se presenta en la Figura 3.1. El comportamiento mostrado fue bimodal durante los 21 días a las tres temperaturas de almacenamiento. Las emulsiones al 30% elaboradas con carragenina  $\lambda$  almacenadas en refrigeración (30CR) (Figura 3.1(a)) y las que se mantuvieron a temperatura ambiente (30CA) (Figura 3.1(b)) mostraron una disminución del % en volumen de la población de menor tamaño de aproximadamente 2%, mientras que la emulsión almacenada a 40°C (30CC) (Figura 3.1(c)) sólo redujo su volumen aproximadamente 1.2%, asimismo la población de tamaños mayores aumentó, siendo mayor el incremento en la emulsión 30CC ( $\approx 2\%$ ) con una ligera disminución en la amplitud del pico a los 21 días de almacenamiento.

En la Figura 3.2 se presenta la distribución de tamaño de partícula de las emulsiones al 30% que contienen goma tragacanto. Todas estas emulsiones mostraron un comportamiento bimodal al igual que las elaboradas con carragenina  $\lambda$ ; sin embargo las poblaciones no mostraron cambios notables en el % en volumen durante los 21 días de almacenamiento a las tres temperaturas estudiadas.

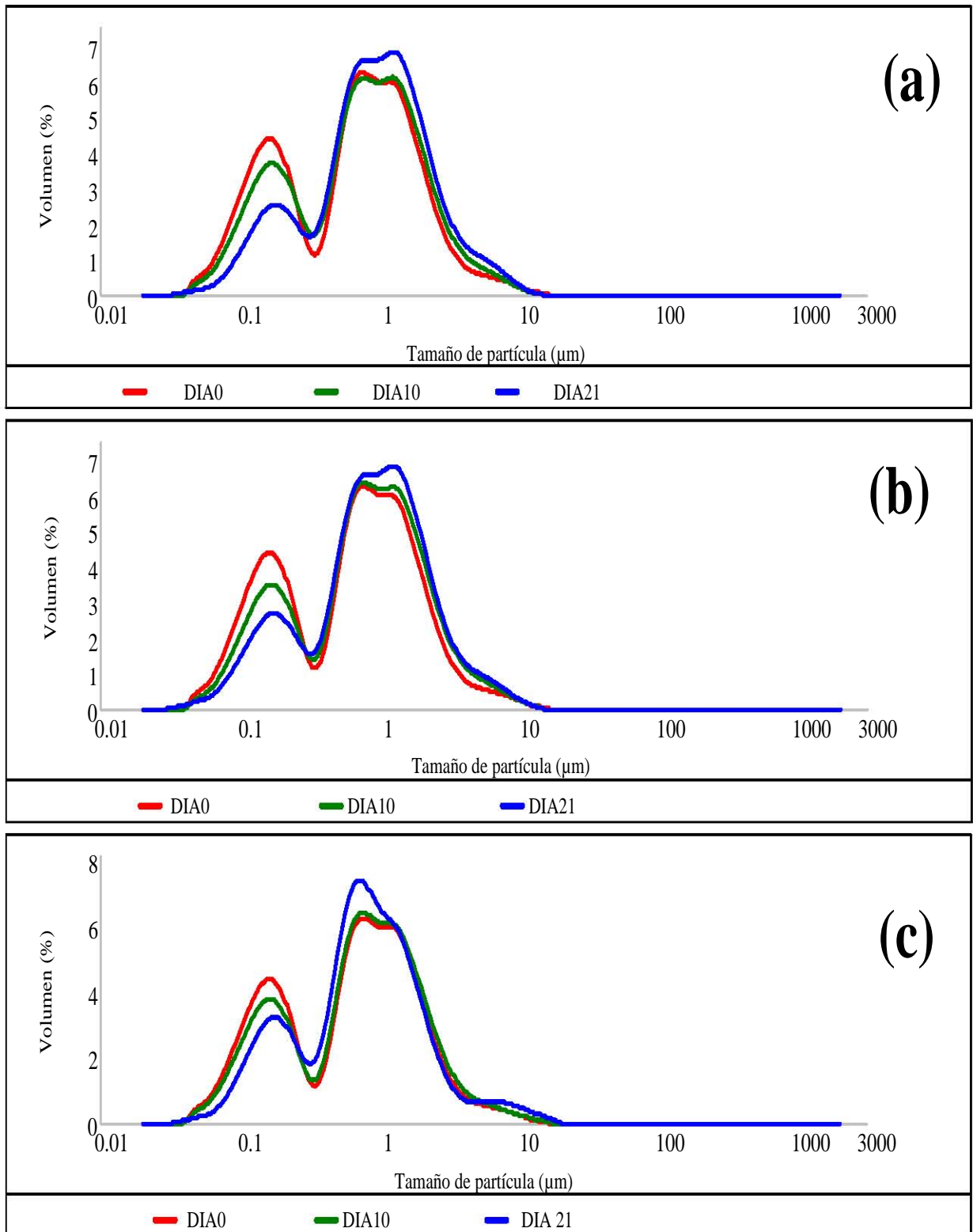


Figura 3.1. Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$ , almacenadas: (a) 4°C, (b) 25°C, (c) 40°C.

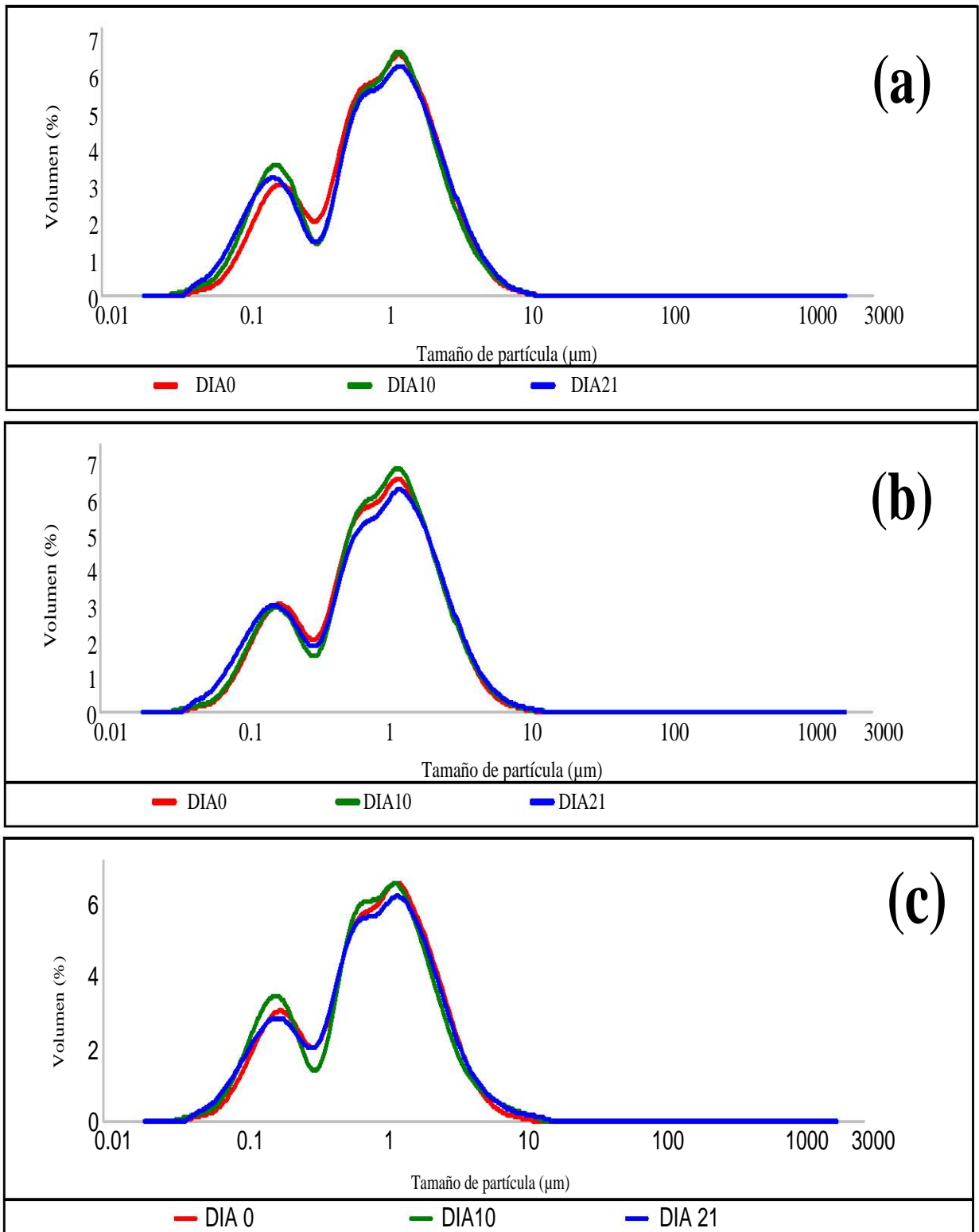


Figura 3.2 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a: (a) 4°C, (b) 25°C, (c) 40°C.

### 3.1.2. Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 60%

La distribución de tamaño de partícula de las emulsiones al 60% elaboradas con carragenina  $\lambda$  se presenta en la Figura 3.3. Estas emulsiones, del mismo modo que las emulsiones al 30% presentaron un comportamiento bimodal a las tres temperaturas de almacenamiento.

La emulsión almacenada en refrigeración (60CR) no mostró cambios durante los 21 días de almacenamiento (Figura 3.3(a)), mientras que la emulsión conservada a temperatura ambiente (60CA) (Figura 3.3(b)) presentó un ligero aumento en el % en volumen de la población de tamaños pequeños ( $\approx 1\%$ ), respecto a la emulsión almacenada a  $40^{\circ}\text{C}$  (60CC) (Figura 3.3(c)) sólo se muestran resultados hasta el día 3 sin cambios aparentes ya que en esta emulsión se presentó rápidamente deshidratación, lo que impidió la realización de la prueba.

En la Figura 3.4 se presenta la distribución de tamaño de partícula de las emulsiones al 60% que contienen goma tragacanto. En estas emulsiones se observó al igual que en las elaboradas con carragenina  $\lambda$  una distribución bimodal; no se manifestaron cambios en la emulsión almacenada en refrigeración (60TR) (Figura 3.4(a)), en la emulsión mantenida a temperatura ambiente (60TA) (Figura 3.4(b)) se observó un ligero aumento en el % en volumen de la población de tamaños menores durante 21 días de almacenamiento, mientras que en la emulsión almacenada a  $40^{\circ}\text{C}$  (60TC) (Figura 3.4(c)) sólo se obtuvo lectura hasta el día 10, ya que del mismo modo que en las emulsiones con carragenina  $\lambda$  se presentó deshidratación en las muestras, esta emulsión presentó el mayor incremento en el % en volumen en la población de menor tamaño ( $\approx 2\%$ ) con respecto a las demás emulsiones y una disminución en la amplitud de la población de tamaños mayores.



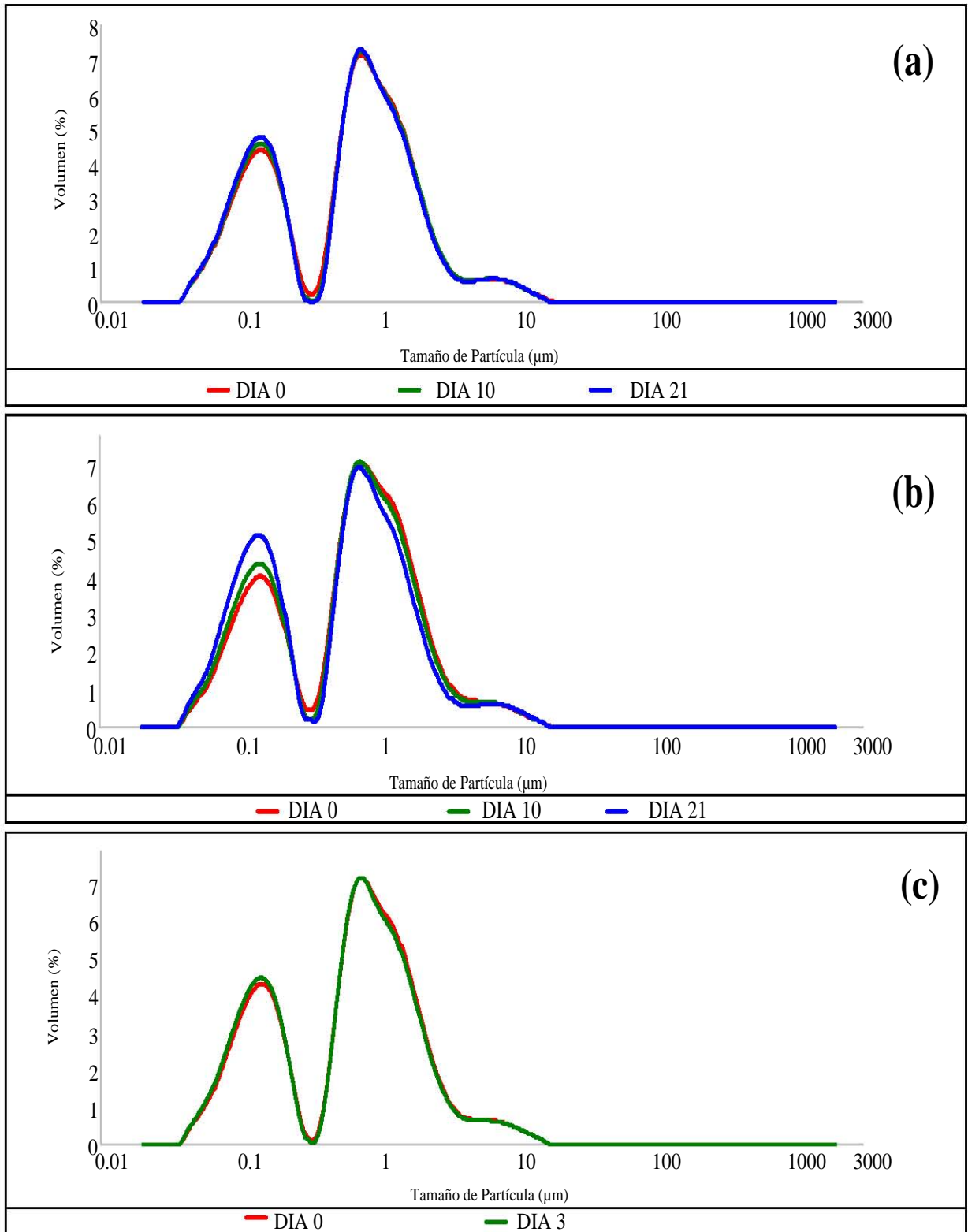


Figura 3.3 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$ , almacenadas a: (a) 4°C, (b) 25°C, (c) 40°C.

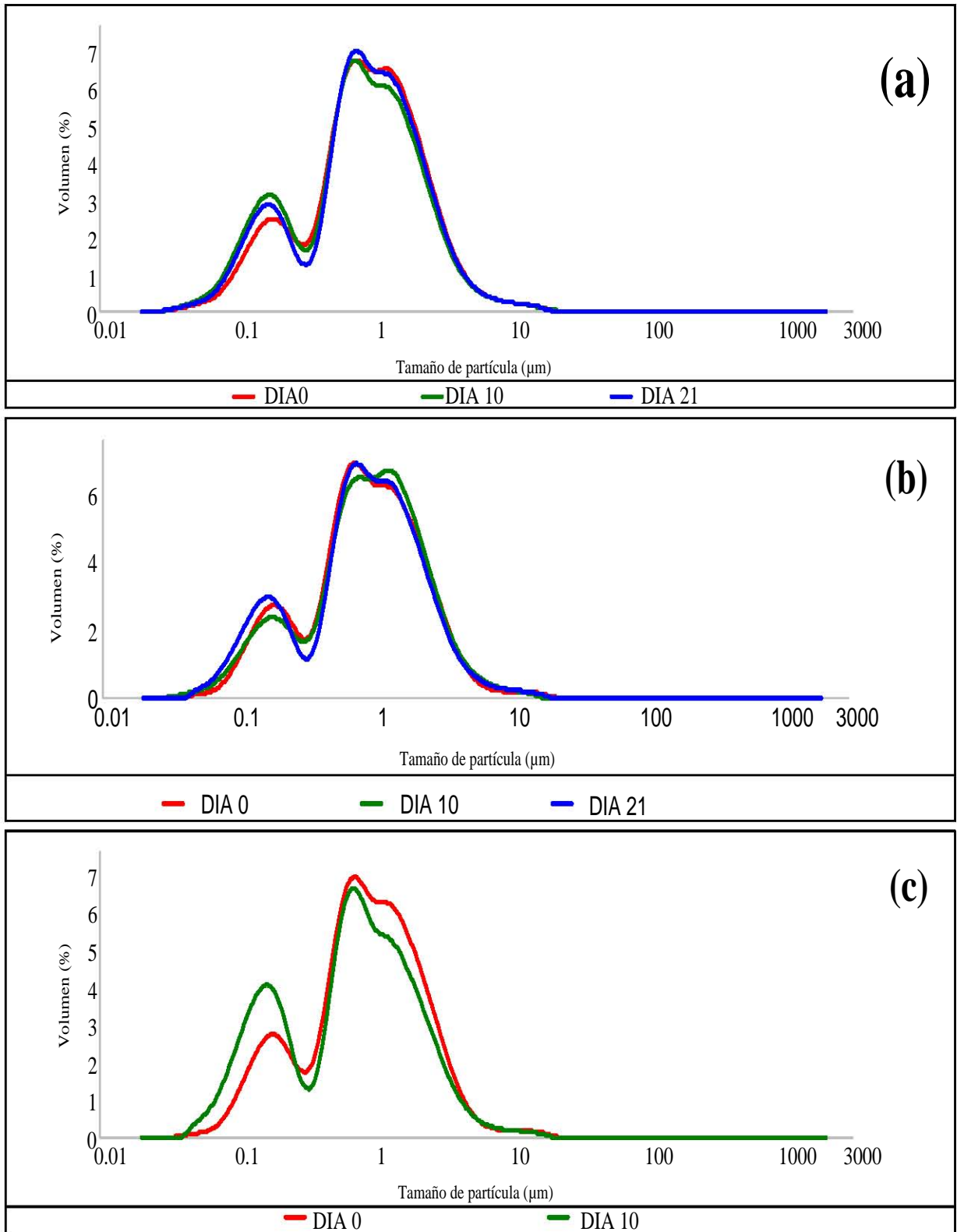


Figura 3.4 Distribución de tamaño de partícula de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a: **(a)** 4°C, **(b)** 25°C, **(c)** 40°C.

### 3.1.3. Tamaño de partícula de emulsiones al 30%

El tamaño de partícula correspondiente al diámetro De Brouckere ( $d_{4,3}$ ) de las emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$  o albúmina de huevo - goma tragacanto se resume en Cuadro 3.1. Los resultados obtenidos mantuvieron una baja dispersión y variación entre las réplicas, ya que la desviación estándar de los datos fue pequeña ( $<0.052$ ) y su coeficiente de variación fue menor al 5.3% (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1 Tamaño de partícula de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo- (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) almacenadas a 4, 25 y 40°C.

<b>Diámetro De Brouckere (<math>\mu\text{m}</math>)</b>						
<b>EMULSION</b>	0 días	3 días	7 días	10 días	14 días	21 días
<b>30CR</b>		<b>1.06</b>	<b>1.26</b>	<b>1.14</b>	<b>1.24</b>	<b>1.34</b>
D.E.		0.036	0.015	0.027	0.015	0.019
C.V.		3.4	1.1	2.3	1.2	1.4
<b>30CA</b>	<b>1.05</b>	<b>1.16</b>	<b>1.15</b>	<b>1.20</b>	<b>1.13</b>	<b>1.30</b>
D.E.	0.024	0.023	0.009	0.024	0.032	0.003
C.V.	2.3	1.9	0.7	2.0	2.8	0.2
<b>30CC</b>		<b>0.82</b>	<b>1.27</b>	<b>1.14</b>	<b>1.13</b>	<b>1.24</b>
D.E.		0.024	0.007	0.014	0.06	0.006
C.V.		2.8	0.5	1.1	5.3	0.4
<b>30TR</b>		<b>1.09</b>	<b>1.12</b>	<b>1.23</b>	<b>1.18</b>	<b>1.28</b>
D.E.		0.023	0.025	0.029	0.043	0.044
C.V.		2.1	2.2	2.3	3.6	3.4
<b>30TA</b>	<b>1.27</b>	<b>1.15</b>	<b>1.11</b>	<b>1.23</b>	<b>1.19</b>	<b>1.30</b>
D.E.	0.025	0.052	0.051	0.026	0.022	0.04
C.V.	1.9	4.5	4.6	1.9	1.8	3.0
<b>30TC</b>		<b>1.13</b>	<b>1.16</b>	<b>1.27</b>	<b>1.19</b>	<b>1.32</b>
D.E.		0.029	0.035	0.032	0.045	0.043
C.V.		2.5	2.9	2.4	3.8	3.2

Las emulsiones al 30% elaboradas con carragenina  $\lambda$  mostraron un  $d_{4,3}$  inicial menor (1.05  $\mu\text{m}$ ) que las que contenían goma tragacanto (1.27  $\mu\text{m}$ ). Las emulsiones con carragenina  $\lambda$  presentaron un aumento en el tamaño de partícula durante los 21 días de almacenamiento de aproximadamente 0.24  $\mu\text{m}$ , mientras que las emulsiones elaboradas con goma tragacanto no mostraron un aumento considerable ( $<0.03$   $\mu\text{m}$ ) a las tres temperaturas de almacenamiento.

El aumento en el tamaño de partícula en las emulsiones elaboradas con carragenina  $\lambda$  almacenadas a 40°C (30CC) y en refrigeración (30CR) durante los primeros 10 días presentó una tendencia similar, mientras que la emulsión que se mantuvo a temperatura ambiente (30CA) permaneció ligeramente por arriba de ellas; sin embargo a los 21 días de almacenamiento la emulsión 30CR alcanzó el mayor diámetro De Brouckere con 1.34  $\mu\text{m}$  seguida de la emulsión 30CA con un  $d_{4,3}$  de 1.30  $\mu\text{m}$  y con un menor tamaño de partícula la emulsión 30CC con 1.24  $\mu\text{m}$ , debido probablemente a que en esta muestra se presentó cierta deshidratación ocasionada por la permeabilidad del recipiente en el que fue almacenada (Figura 3.5).

Las emulsiones con goma tragacanto al día 10 presentaron variación del  $d_{4,3}$  a las tres temperaturas de almacenamiento, debido posiblemente al reacomodo de los glóbulos, al día 21 se observó una ligera influencia de la temperatura sobre al tamaño de partícula con respecto al  $d_{4,3}$  inicial, ya que la emulsión almacenada en refrigeración (30TR) presentó el menor tamaño de partícula con 1.28  $\mu\text{m}$ , mientras que el  $d_{4,3}$  en la emulsión mantenida a temperatura ambiente (30TA) alcanzó 1.30  $\mu\text{m}$  y con un tamaño ligeramente más grande la emulsión almacenada a 40°C (30TC) con 1.32  $\mu\text{m}$  (Figura 3.5).

En general en las emulsiones al 30% elaboradas con carragenina  $\lambda$ , se observó un aumento en el tamaño de partícula a través del tiempo, de igual modo la distribución de tamaño presentó un mayor % en volumen en tamaños más grandes, aparentemente la temperatura influyó de manera inversa sobre el diámetro De Brouckere, ya que al disminuir la temperatura de almacenamiento el tamaño de partícula aumentó más que en las emulsiones almacenadas a temperatura ambiente y 40°C, esto pudiera deberse a que el sistema ya era inestable.

Por otro lado, las emulsiones que contenían goma tragacanto no mostraron cambios notables en el tamaño de partícula ni en su distribución, sin embargo se observó una ligera influencia de la temperatura de almacenamiento sobre el tamaño de partícula, ya que a los 21 días la emulsión almacenada a 40°C presentó un  $d_{4,3}$  mayor que en las emulsiones almacenadas a temperatura ambiente y en refrigeración, respecto al diámetro inicial. Con lo anterior, es posible señalar que las emulsiones al 30% elaboradas con goma tragacanto son

más estables con respecto al cambio en el tamaño de partícula que las emulsiones que contienen carragenina  $\lambda$ .

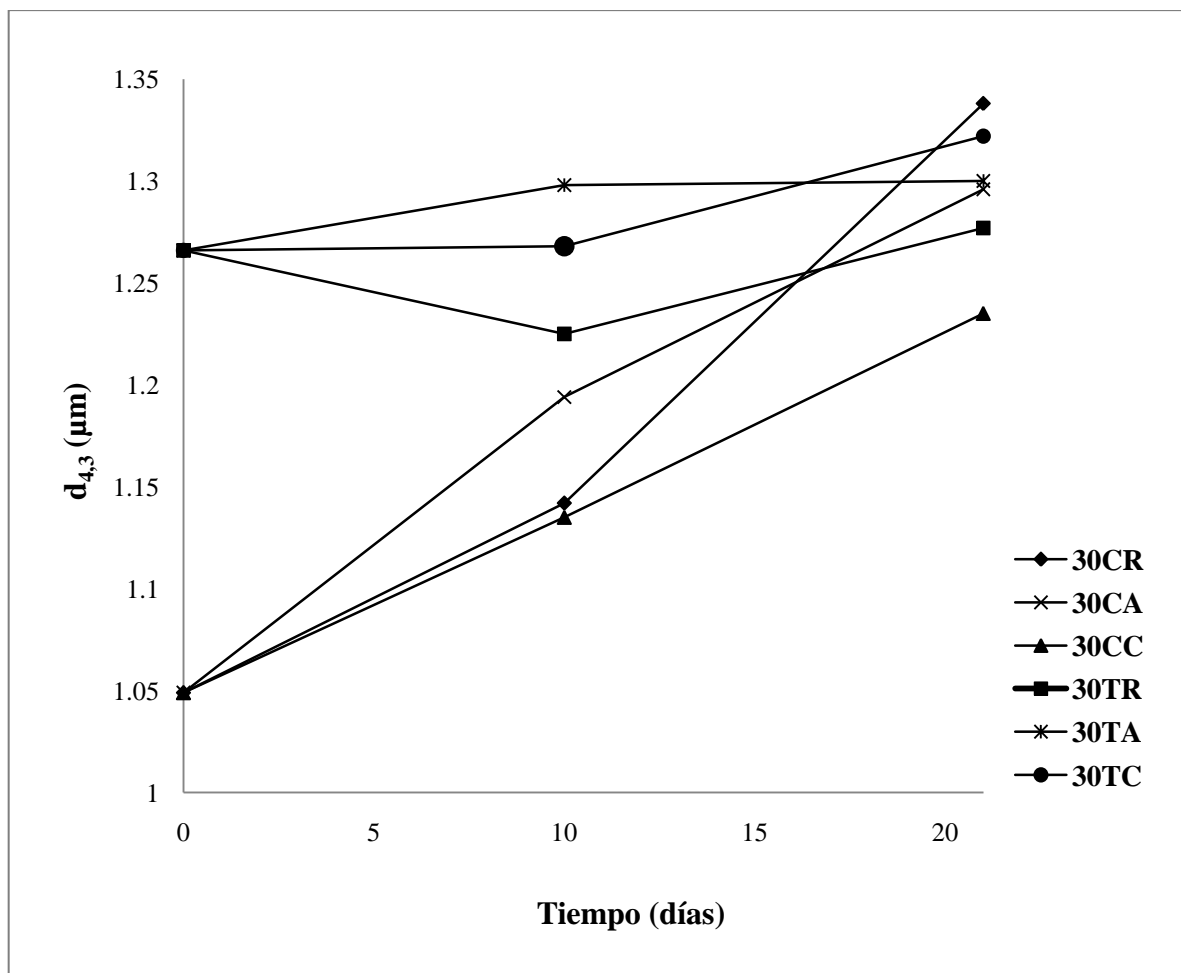


Figura 3.5 Comportamiento del tamaño de partícula a través del tiempo en emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$  y albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a 4, 25 y 40°C.

### 3.1.4. Tamaño de partícula de emulsiones al 60%

El diámetro De Brouckere ( $d_{4,3}$ ) de las emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$  o albúmina de huevo - goma tragacanto se presenta en Cuadro 3.2. Estos resultados también mantuvieron una baja dispersión y variación entre las réplicas, con una desviación estándar de  $<0.046$  y un coeficiente de variación menor al 4.6% (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2 Tamaño de partícula de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo- (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) almacenadas a 4 y 25°C.

<b>Diámetro De Brouckere (<math>\mu\text{m}</math>)</b>							
<b>EMULSION</b>	0 días	3 días	7 días	10 días	14 días	17 días	21 días
<b>60CR</b>	<b>1.11</b> 0.027 2.4	<b>1.06</b>	<b>1.08</b>	<b>1.10</b>	<b>1.09</b>	<b>1.06</b>	<b>1.08</b>
D.E.		0.034	0.022	0.027	0.02	0.031	0.024
C.V.		3.1	2.0	2.4	1.7	2.9	2.1
<b>60CA</b>		<b>1.08</b>	<b>1.07</b>	<b>1.08</b>	<b>1.12</b>	<b>1.06</b>	<b>1.01</b>
D.E.		0.008	0.023	0.014	0.01	0.038	0.034
C.V.		0.7	2.1	1.2	0.8	3.6	3.4
<b>60CC</b>		<b>1.10</b>					
D.E.		0.016					
C.V.		1.4					
<b>60TR</b>	<b>1.28</b> 0.03 2.3	<b>1.35</b>	<b>1.25</b>	<b>1.34</b>	<b>1.28</b>	<b>1.25</b>	<b>1.30</b>
D.E.		0.045	0.07	0.005	0.029	0.025	0.007
C.V.		3.3	5.6	0.3	2.2	1.9	0.5
<b>60TA</b>		<b>1.29</b>	<b>1.28</b>	<b>1.30</b>	<b>1.29</b>	<b>1.29</b>	<b>1.26</b>
D.E.		0.06	0.046	0.032	0.051	0.015	0.005
C.V.		4.6	3.6	2.4	3.9	1.2	0.4
<b>60TC</b>		<b>1.30</b>	<b>1.17</b>	<b>1.10</b>			
D.E.		0.049	0.01	0.023			
C.V.		3.732	0.9	2.0			

Las emulsiones preparadas con carragenina  $\lambda$  mostraron un  $d_{4,3}$  inicial menor (1.11  $\mu\text{m}$ ) con respecto a las elaboradas con goma tragacanto (1.28  $\mu\text{m}$ ). Ambos polisacáridos mantuvieron sin cambios notables el tamaño de partícula de las emulsiones almacenadas a 4°C durante los primeros 21 días. En la emulsión elaborada con carragenina  $\lambda$  y almacenada a temperatura ambiente (60CA) el  $d_{4,3}$  se redujo hasta 1.01  $\mu\text{m}$ , mientras que en la emulsión con goma tragacanto almacenada a 25°C (60TA) el  $d_{4,3}$  sólo disminuyó ligeramente (1.26  $\mu\text{m}$ ) (Figura 3.6).

Por otro lado, todas las emulsiones al 60% almacenadas a 40°C presentaron una evidente deshidratación lo que impidió la disolución de la emulsión para su correcta medición, motivo por el cual no fue posible dar seguimiento a los cambios en el tamaño de partícula; por tal efecto no se mencionarán dichas emulsiones en esta parte del análisis de resultados.

En cuanto a la distribución y tamaño de partícula las emulsiones al 60% sólo se estudiaron durante 21 días, no fue posible obtener resultados posteriormente por causas ajenas a este estudio; en general estas emulsiones presentaron un comportamiento bimodal al igual que

las emulsiones al 30%, respecto al tamaño de partícula no se apreciaron cambios notables durante los 21 días de almacenamiento a las tres temperaturas estudiadas.

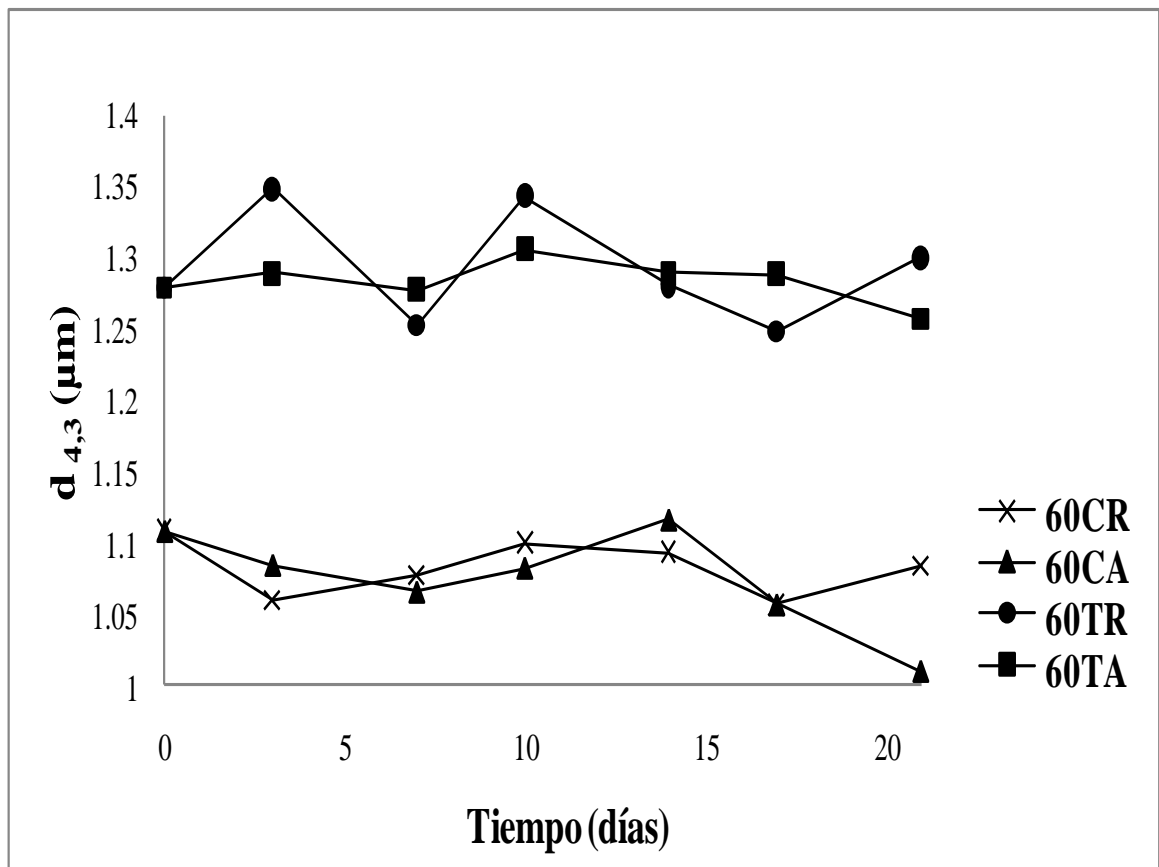


Figura 3.6 Comportamiento del tamaño de partícula a través del tiempo en emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$  y albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a 4 y 25°C.

## 3.2. Estabilidad a través de la velocidad de desestabilización

### 3.2.1. Perfiles de retrodispersión de luz láser de emulsiones al 30 %

El comportamiento presentado en todas las emulsiones estudiadas es similar; al inicio el haz de luz láser recorre el total de la muestra sin mostrar cambios medibles (periodo de retraso), pero con el paso del tiempo los glóbulos se desplazan hacia la parte superior de la emulsión debido al movimiento browniano o a la fuerza de gravedad (Manoj, 1998; Fennema, 2000, McClements, 2005), lo que ocasiona que el % de luz retrodispersa disminuya en la parte baja de la celda, sumado a esto se observa un incremento en el espesor del pico formado en función del tiempo, ya que la cantidad de glóbulos presentes

en la parte baja de la muestra se reduce como resultado de la separación de fases dentro del sistema (Figura 3.7), lo anterior ocurre dependiendo la concentración de la emulsión (30 ó 60%), el polisacárido empleado (carragenina  $\lambda$  o goma tragacanto) y la temperatura de almacenamiento (4, 25 ó 40°C).

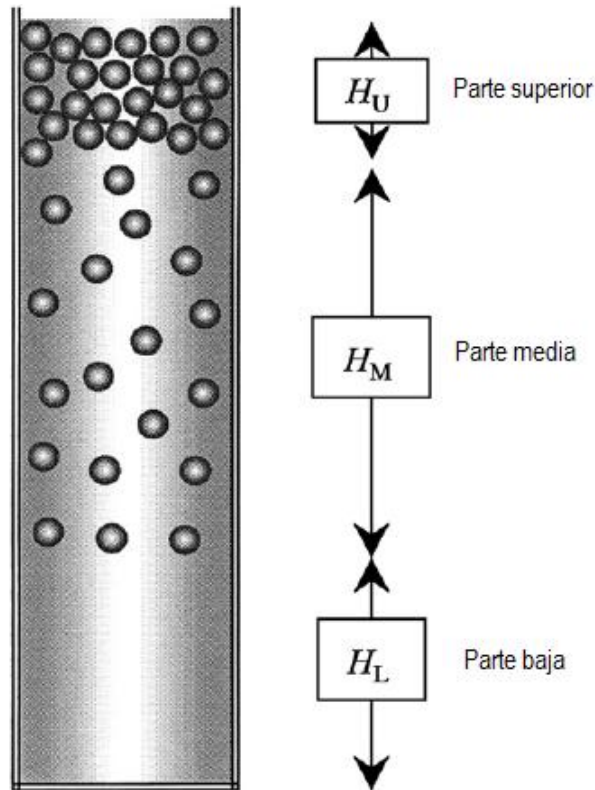


Figura 3.7 Comportamiento de la emulsión con el tiempo: Parte baja, región agotada de glóbulos; parte media, región con una concentración de glóbulos más cercana a la original; parte alta, región con empaquetamiento de glóbulos (Lizarraga y col., 2008).

En la Figura 3.8 se presentan los perfiles de retrodispersión de luz láser en modo de referencia de las emulsiones al 30%, elaboradas con carragenina  $\lambda$ . En ellos se observa que la retrodispersión de luz láser disminuyó rápidamente en la parte baja de la muestra (6 - 22 mm) hasta alcanzar un 80% aproximadamente, también se presentó un rápido incremento en el espesor de pico formado, reflejándose en la presencia de clarificado a las tres temperaturas de almacenamiento casi al mismo tiempo.



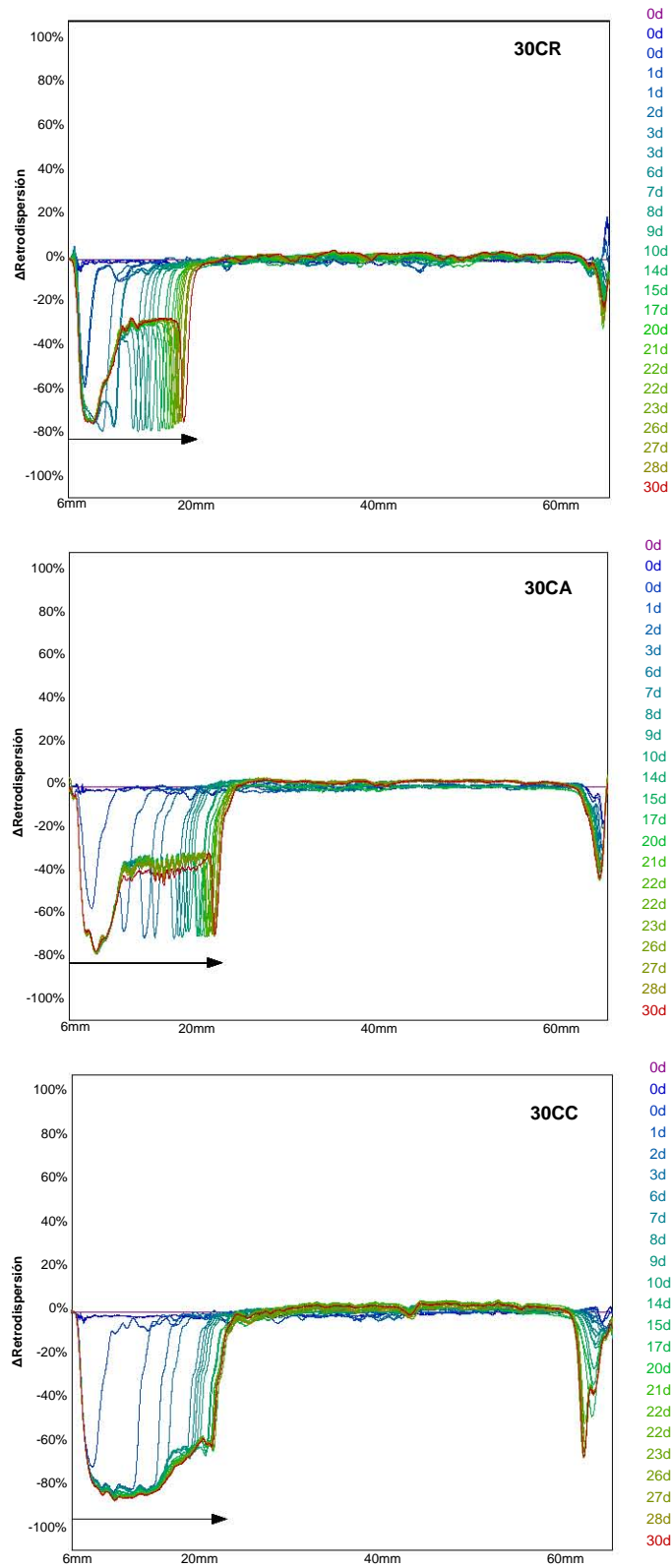


Figura 3.8 Perfiles de retrodispersión de luz láser a través del tiempo en modo de referencia de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$ , almacenadas a 4, 25 y 40°C.

En las emulsiones almacenadas a temperatura ambiente (30CA) y a 40°C (30CC) la separación se presentó a los 0.4 días, mientras que la emulsión refrigerada (30CR) mostró clarificado a los 1.2 días; con respecto a los 30 días de almacenamiento, la cantidad de clarificado fue más o menos la misma a las tres temperaturas ( $\approx 15$  mm) y su apariencia fue totalmente clara, lo que indica un alto grado de inestabilidad que no depende de la temperatura de almacenamiento ya que el sistema fue totalmente floculado o bien contiene flóculos en coexistencia con glóbulos no floculados (Manoj y col., 1998). En la parte media de la muestra (25 - 55 mm) se observó un ligero incremento en la retrodispersión de luz láser ( $\approx 3\%$ ) a las tres temperaturas de almacenamiento y en la emulsión almacenada a 40°C, se observó una ligera apariencia coagulada en esta parte, el desplazamiento de los glóbulos hacia esta zona fue debido a la gran floculación dentro del sistema, que dio lugar al incremento en el tamaño de partícula y por ende ocasionó un importante proceso de cremado (Figura 3.9).

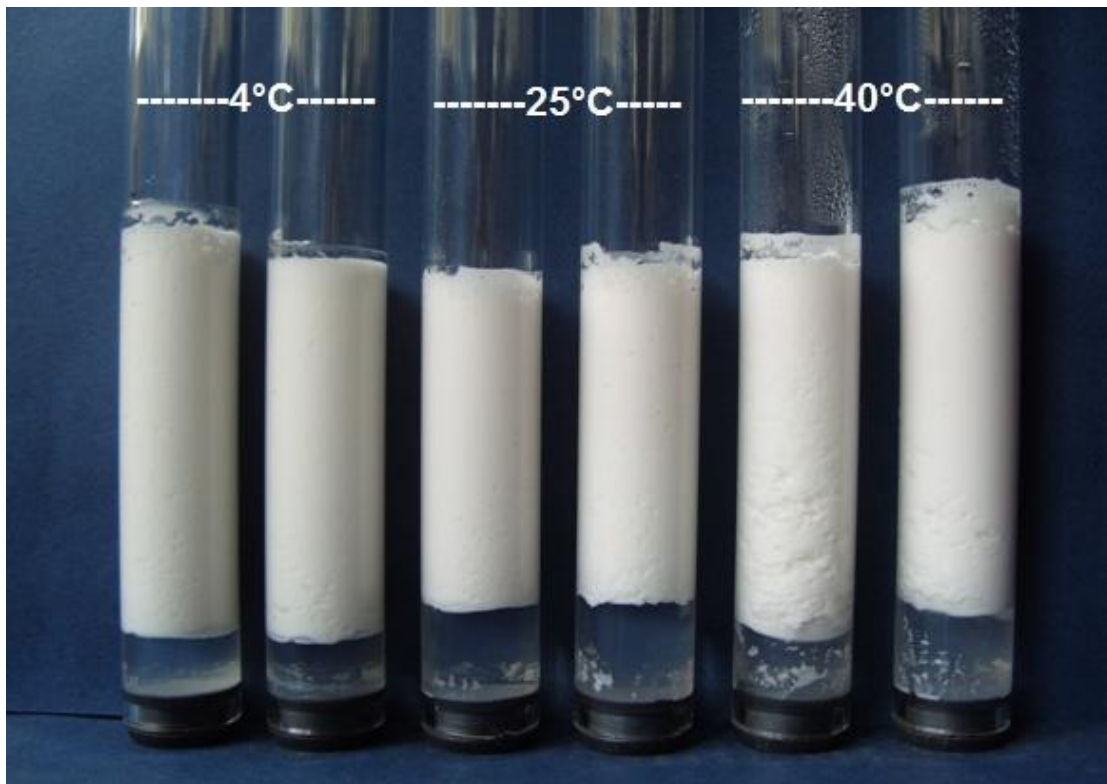


Figura 3.9 Fotografía de emulsiones al 30%, elaboradas con carragenina  $\lambda$  a los 30 días de almacenamiento.

Los perfiles de retrodispersión de luz láser en modo de referencia de las emulsiones al 30% que contienen goma tragacanto se muestran en la Figura 3.10.

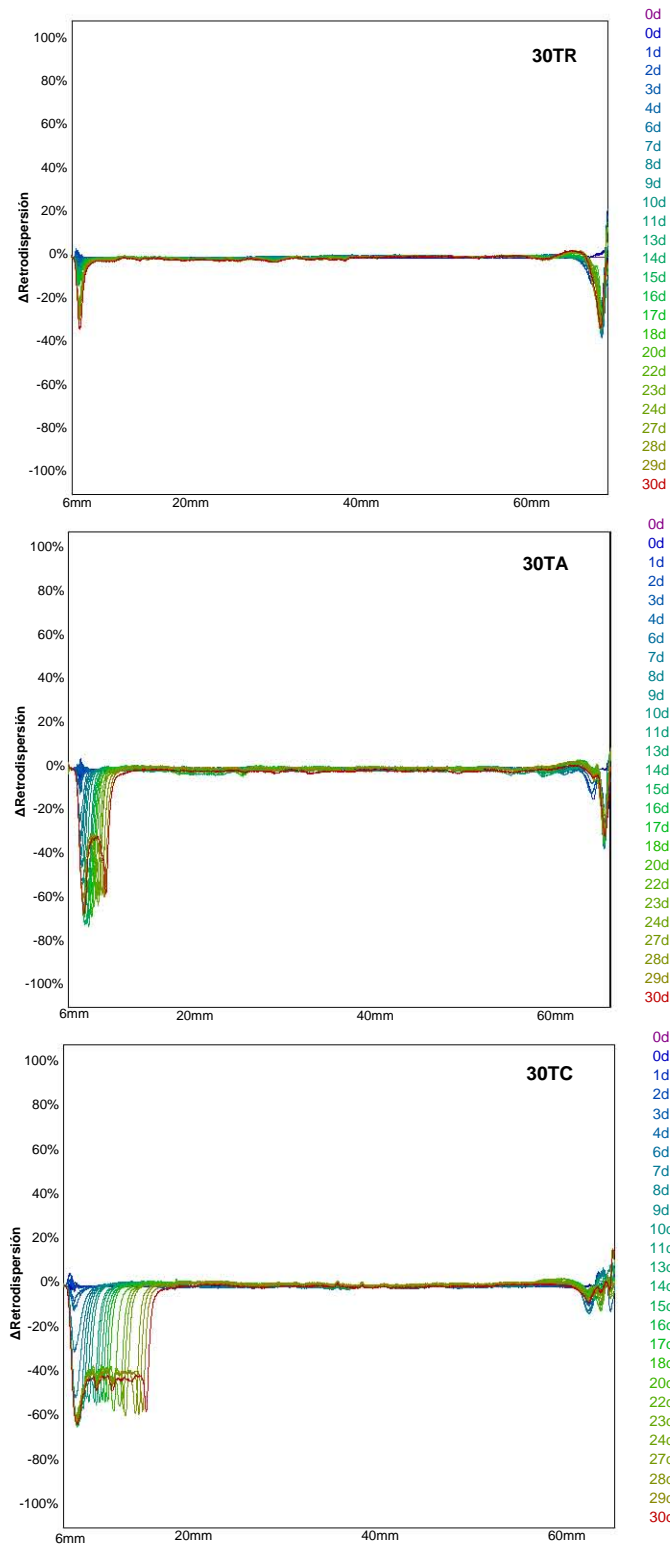


Figura 3.10 Perfiles de retrodispersión de luz láser a través del tiempo en modo de referencia de emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a 4, 25 y 40°C.

En estas emulsiones se presentaron espesores de pico más pequeños respecto a las emulsiones elaboradas con carragenina  $\lambda$  en la parte baja de la muestra, también se observó la disminución del % de luz retrodispersa en todas las emulsiones dependiendo de la temperatura de almacenamiento, lo que sugiere la influencia de la temperatura sobre la separación de fases. La emulsión almacenada en refrigeración (30TR) alcanzó una retrodispersión de luz del 35% sin mostrar separación de fases, mientras que las emulsiones almacenadas a temperatura ambiente (30TA) y a 40°C (30TC) alcanzaron aproximadamente un 70% y una separación de fases a partir del día 21.5 y 10.1 respectivamente. Es claro que al aumentar la temperatura de almacenamiento se acelera la separación de fases, obteniendo la mayor cantidad de clarificado en la emulsión almacenada a 40°C (30TC) ( $\approx 10$  mm) y una apariencia ligeramente turbia, lo que indica que dentro de la fase clara existen pequeños glóbulos de aceite suspendidos (Manoj y col., 1998), mientras que la emulsión almacenada en refrigeración (30TR) no presentó separación de fases a los 30 días de almacenamiento. En la zona media de las muestras no se observaron cambios notables en la cantidad de luz retrodispersa, ya que su proceso de desestabilización fue más lento respecto a las elaboradas con carragenina  $\lambda$ , es posible que los glóbulos no formaran flóculos o coalescieran, sino que se desplazaran como partículas individuales, por lo tanto el proceso de cremado se vio reducido considerablemente (Figura 3.11).

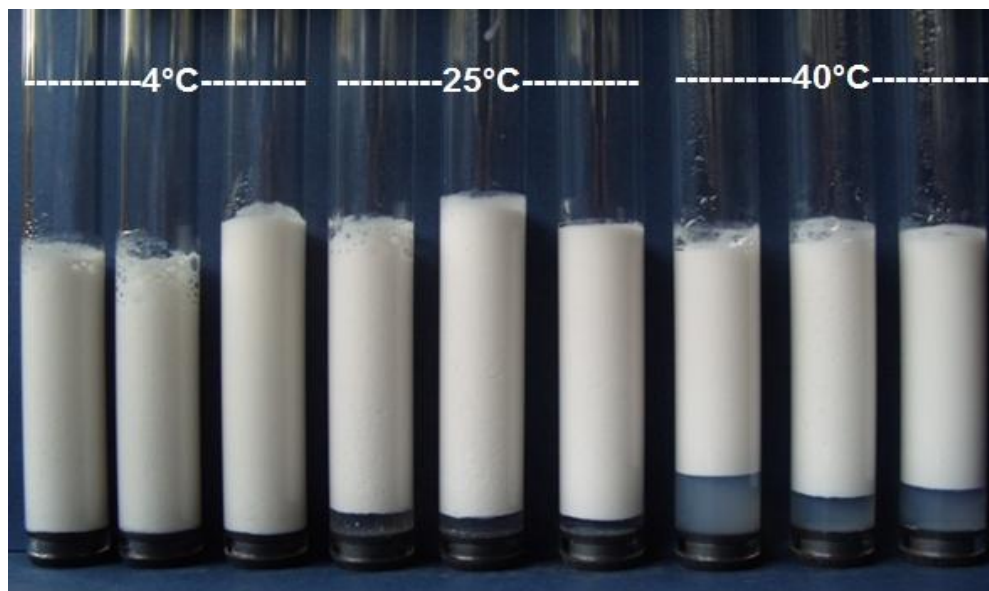


Figura 3.11 Fotografía de emulsiones al 30%, elaboradas con goma tragacanto a los 30 días de almacenamiento.

Todas las emulsiones al 30% elaboradas con carragenina  $\lambda$  y goma tragacanto presentaron una disminución en la cantidad de luz retrodispersa en la parte superior de la muestra (61 mm en adelante) (Figura 3.9 y Figura 3.11), debido a una disminución en el volumen de la emulsión ocasionado probablemente por la salida de aire atrapado dentro del sistema o bien a un mal llenado de la muestra en la celda de medición.

### **3.2.2. Perfiles de retrodispersión de luz láser de emulsiones al 60 %**

Los perfiles de retrodispersión de luz láser en modo de referencia de las emulsiones al 60%, elaboradas con carragenina  $\lambda$ , se muestran en la Figura 3.12. En ellos se observa que en la parte baja del tubo de la emulsión mantenida a temperatura ambiente (60CA) el % de luz retrodispersa alcanzó un 55%, con un espesor de pico de aproximadamente 3 mm, seguida por la emulsión refrigerada (60CR) con 45% y un espesor de pico de alrededor de 5 mm, mientras que la emulsión almacenada a 40°C (60CC) sólo obtuvo el 20% de retrodispersión de luz y poco menos de 2 mm de espesor; con base en lo anterior, la emulsión almacenada a 40°C es aparentemente más estable con respecto al perfil de retrodispersión mostrado, ya que el % de luz retrodispersa no aumentó considerablemente a largo del tiempo y tampoco incrementó su espesor. Sin embargo, las características físicas finales de la emulsión (apariencia amarillenta y consistencia coagulada) cambiaron notablemente con respecto a las iniciales (apariencia blanca y consistencia tersa) a diferencia de las características finales de la emulsión almacenada a 4°C que no presentó cambios apreciables. La emulsión almacenada a 40°C presentó en la parte superior la formación de una ligera capa amarilla, causada probablemente por el inicio de la coalescencia del glóbulo en esta zona. En la zona media de las muestras se presentó una disminución no uniforme del % de luz retrodispersa, siendo más notable en la emulsión 60CA ( $\approx 5\%$ ), esto sugiere un ligero incremento en el tamaño de partícula o bien la compactación de la estructura en red formada (Figura 3.13).

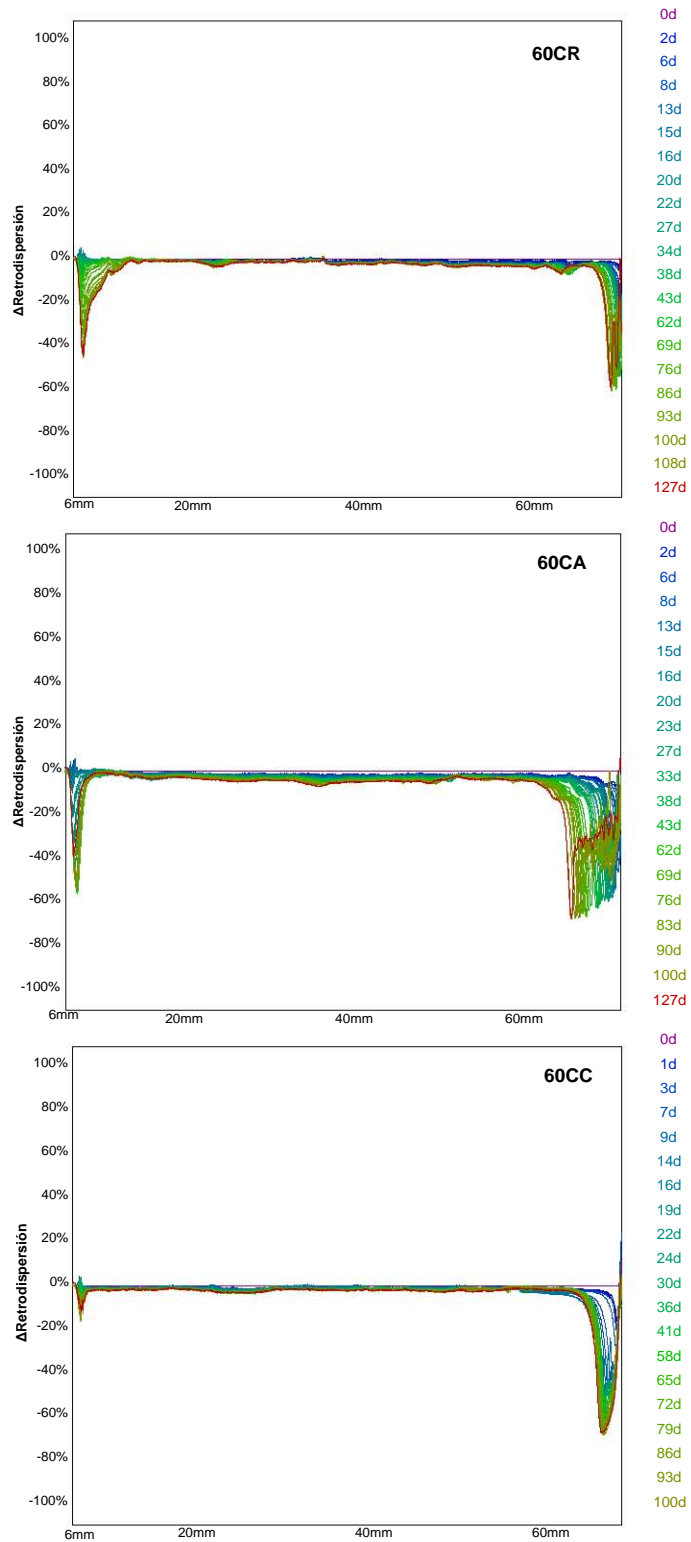


Figura 3.12 Perfiles de retrodispersión de luz láser a través del tiempo en modo de referencia de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$ , almacenadas a 4, 25 y 40°C.

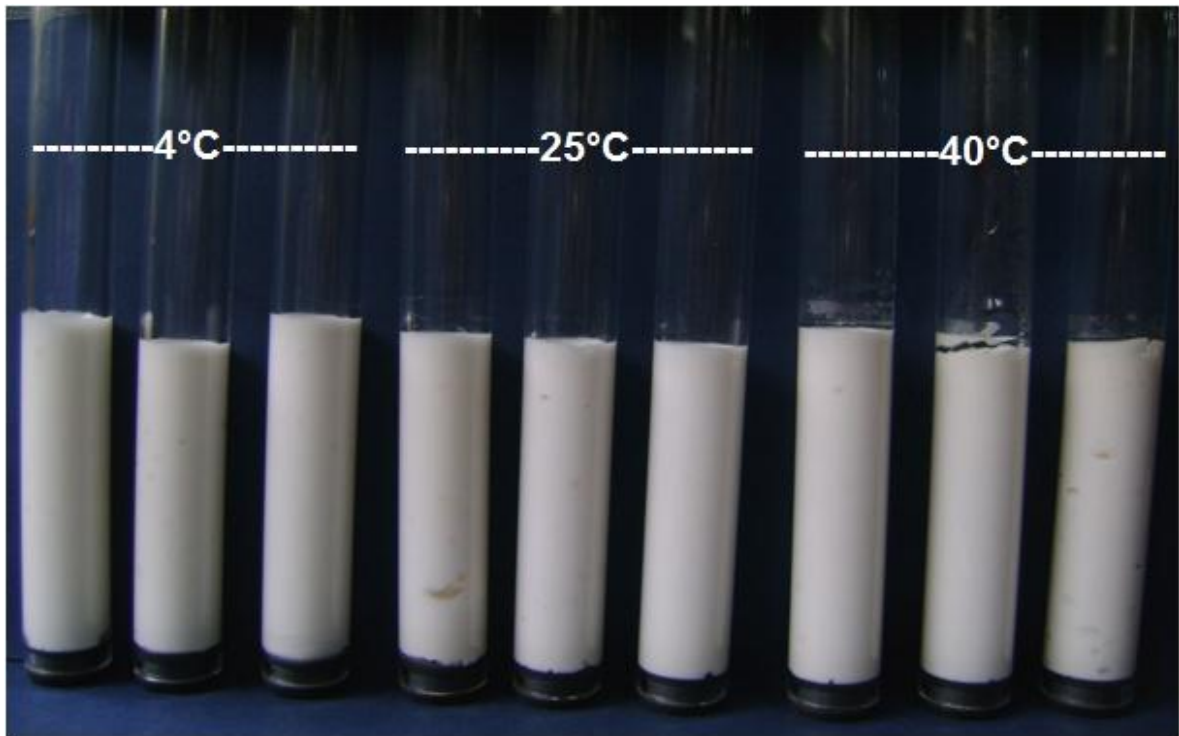


Figura 3.13 Fotografía de emulsiones al 60%, elaboradas con carragenina  $\lambda$  a los 127 días de almacenamiento.

La Figura 3.14 muestra los perfiles retrodispersión de luz láser en modo referencia de las emulsiones al 60% que contienen goma tragacanto. Al igual que en las emulsiones al 60% con carragenina  $\lambda$  en la parte baja del tubo se presentó la disminución en el % de luz retrodispersa a las tres temperaturas de almacenamiento.

La emulsión almacenada a 40°C (60TC) disminuyó su retrodispersión de luz hasta un 70% con un espesor de pico de 4 mm aproximadamente, la emulsión mantenida a temperatura ambiente (60TA) obtuvo un 80% y un espesor de pico de alrededor de 6 mm, sin embargo la emulsión almacenada en refrigeración (60TR) alcanzó un 35% de retrodispersión de luz con un espesor de pico menor a 2 mm; lo anterior sugiere que la emulsión almacenada en temperatura de refrigeración fue más estable ya que no presentó cambios notables, por otro lado la emulsión almacenada a 40°C aparentemente fue más estable que la mantenida a temperatura ambiente, pero del mismo modo que la emulsión 60CC ésta sufrió cambios en sus características físicas iniciales (apariencia y consistencia). Estas emulsiones no presentaron cambios en la retrodispersión de luz de la zona media (Figura 3.15).

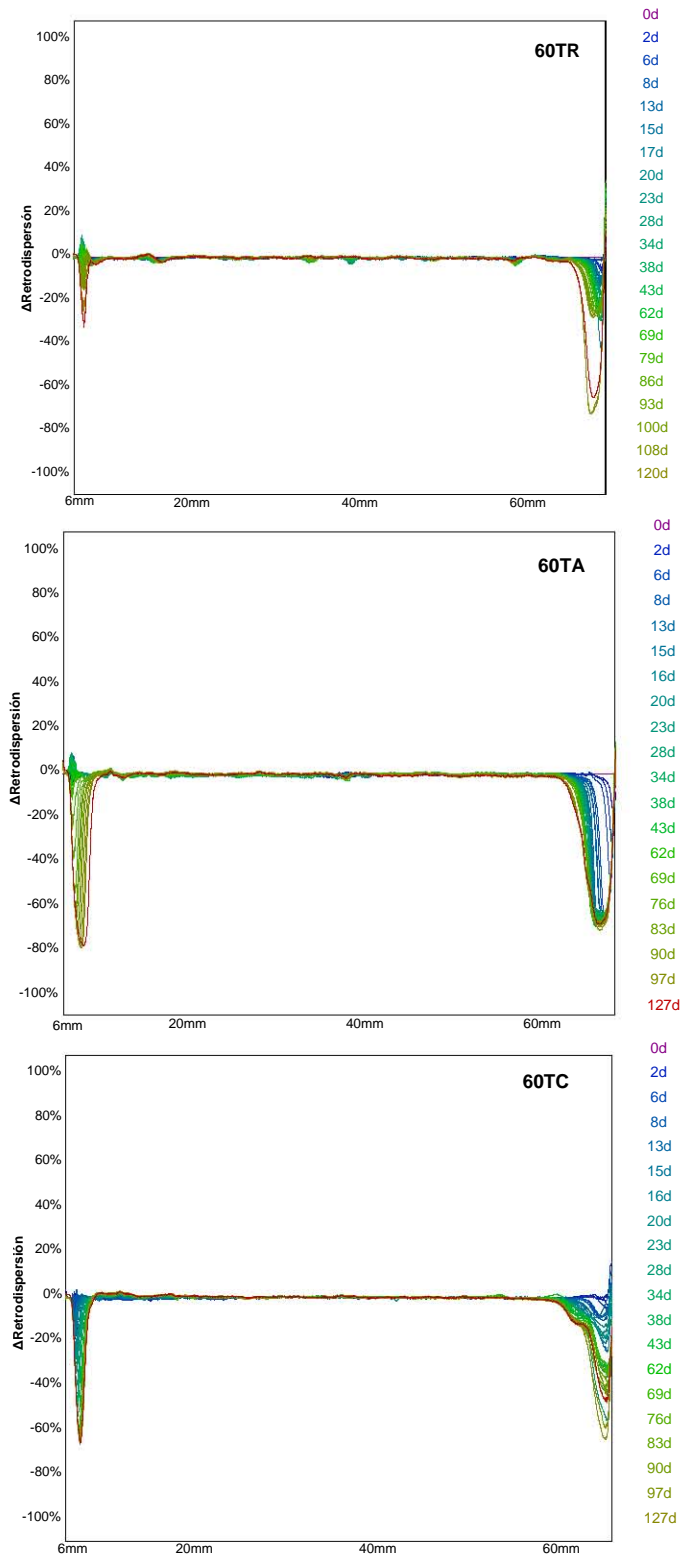


Figura 3.14 Perfiles de retrodispersión de luz láser a través del tiempo en modo de referencia de emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenadas a 4, 25 y 40°C.



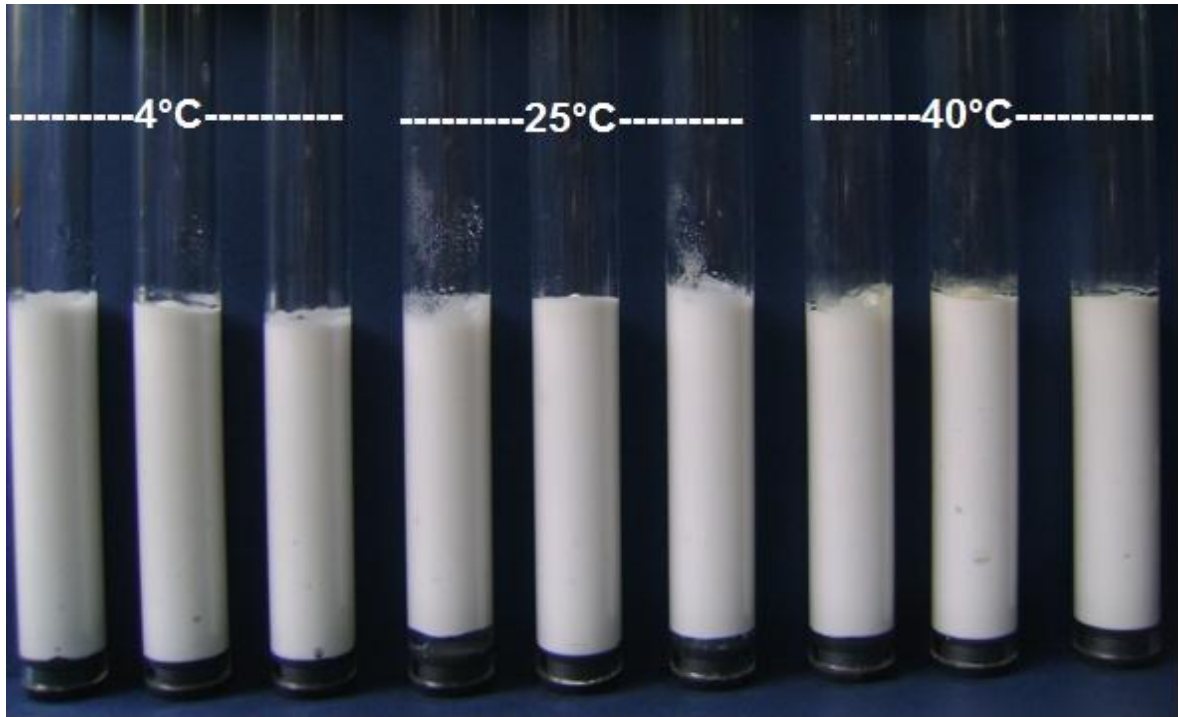


Figura 3.15 Fotografía de emulsiones al 60%, elaboradas con goma tragacanto a los 127 días de almacenamiento.

Todas las emulsiones al 60% mostraron una disminución en el volumen de la muestra (Figura 3.13 y Figura 3.15) reflejándose en disminución de la luz retrodispersa en la parte superior de la emulsión, del mismo modo que en las emulsiones al 30% por una posible compactación de la misma.

### **3.2.3. Velocidad de desestabilización**

#### **3.2.3.1 Emulsiones al 30%**

En la Figura 3.16 se presentan las cinéticas de desestabilización de las emulsiones al 30%. Las emulsiones elaboradas con carragenina  $\lambda$  muestran la presencia de 4 etapas: inicialmente se presentó un pequeño periodo de retraso (donde la velocidad es igual cero) seguido por un rápido proceso de desestabilización en un corto tiempo, posteriormente los glóbulos se acomodaron y empaquetaron. Las emulsiones que contienen goma tragacanto sólo presentarán dos etapas: un periodo de retraso al inicio y posteriormente un proceso de desestabilización constante.

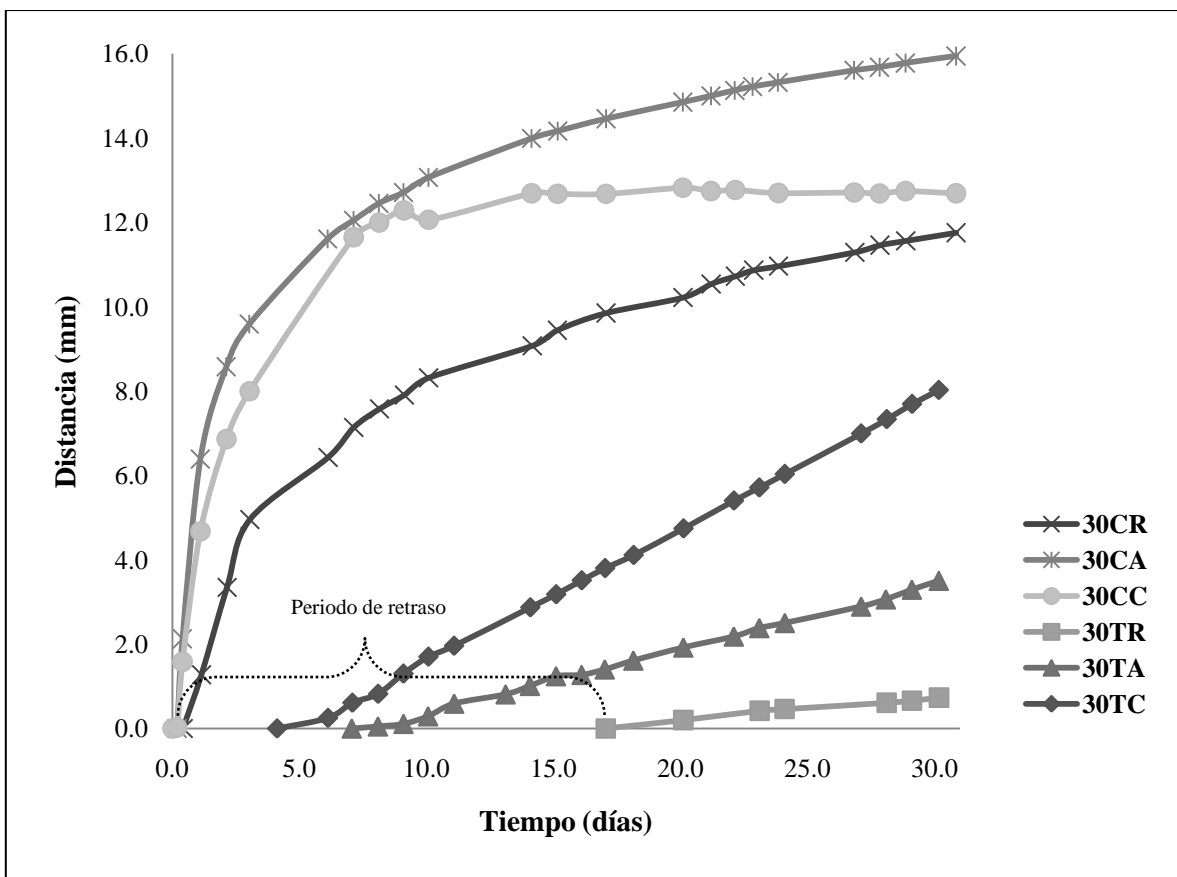


Figura 3.16 Cinéticas de desestabilización en emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C.

En las emulsiones con carragenina  $\lambda$  el periodo de retraso fue mínimo (0.4 días) a las tres temperaturas con respecto al tiempo total de almacenamiento (30 días) por lo que resulta imperceptible (Cuadro 3.3), una vez iniciado el proceso de desestabilización la emulsión 30CA mostró la mayor velocidad de desestabilización (6.76 mm/día), mientras que emulsión 30CR fue la que se desestabilizó más lentamente (1.91 mm/día), la emulsión 30CC presentó un velocidad intermedia (4.91mm/día) debido probablemente al efecto de la temperatura (40°C) sobre las propiedades de la proteína o bien por la deshidratación de la muestra, que impidió el movimiento de los glóbulos reflejando un aparente estancamiento en el proceso de desestabilización respecto a la emulsión almacenada a 25°C, por otro lado el reacomodo de los glóbulos y su posterior empaquetamiento se llevó a cabo a partir del día 3 a las tres temperaturas de almacenamiento, ocasionado la disminución considerable de la velocidad (Cuadro 3.4).

Por otro lado, las emulsiones con goma tragacanto mostraron un incremento en el periodo de retraso con respecto a las emulsiones elaboradas con carragenina  $\lambda$ , el cual aumentó conforme disminuyó la temperatura de almacenamiento, alcanzando una duración de 17 días para la emulsión refrigerada (30TR) y para las emulsiones almacenadas a 25 y 40°C permaneció hasta los 7.1 y 5.6 días respectivamente. La separación visible de fases se presentó a partir de 10.1 días en la emulsión 30TC y desde el día 21.5 en la emulsión 30TA, mientras que no se observó clarificado en la emulsión 30TR durante los 30 días de almacenamiento (Cuadro 3.3). Una vez iniciado el proceso de desestabilización, la velocidad permaneció constante durante los 30 días de almacenamiento, para la emulsión almacenada a 40°C fue de 0.31 mm/día, mientras que la emulsión mantenida a 25°C alcanzó una velocidad de 0.15 mm/día, la emulsión refrigerada sólo obtuvo un desplazamiento de 0.05mm/día (Cuadro 3.4).

Cuadro3.3 Periodo de retraso y separación de fases en emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C.

<b>EMULSION</b>	<b>Periodo de retraso (días)</b>	<b>Separación de fases (días)</b>
<b>30CR</b>	0.4	1.2
<b>30CA</b>	0.4	0.4
<b>30CC</b>	0.4	0.4
<b>30TR</b>	17	-----
<b>30TA</b>	7.1	21.5
<b>30TC</b>	5.6	10.1

Cuadro 3.4 Velocidad de desestabilización en emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C.

<b>EMULSION</b>	<b>VELOCIDAD (mm/día)</b>			
	<b>0.4 - 1.1días</b>	<b>1.1 – 3días</b>	<b>3 – 10días</b>	<b>10 – 30días</b>
<b>30CR</b>	1.905		0.484	0.165
<b>30CA</b>	6.760	1.667	0.489	0.130
<b>30CC</b>	4.908	0.566	0.625	0.016
<b>30TR</b>				0.053
<b>30TA</b>				0.152
<b>30TC</b>				0.319

El comportamiento observado en las emulsiones elaboradas con carragenina  $\lambda$  sugiere un rápido proceso de cremado a consecuencia de un alto grado de floculación en el sistema, debido a que el biopolímero no adsorbido es excluido de la región entre dos glóbulos generando una presión osmótica atractiva entre las moléculas de biopolímero y la fase continua, que impulsa a los glóbulos a permanecer juntos (Robins, 2002; Klinkesorn y col., 2004; Blijdenstein y col., 2003; Blijdenstein y col., 2004), aunado a la baja consistencia de la fase continua ( $K = 0.071 \text{ Pa s}^n$ ;  $n = 0.745$  (Ver Anexo)) que permite el movimiento de los glóbulos por efecto de la gravedad, ocasionó un rápido proceso de cremado dentro del sistema.

Por otro lado, la considerable disminución de la velocidad de cremado en las emulsiones elaboradas con goma tragacanto se debe probablemente a que los glóbulos polidispersos y no floculados formaron muchos aglomerados pequeños que se comportaron como partículas individuales que se mueven independientemente hacia la parte superior de la muestra, también fue importante la influencia de la consistencia de la fase continua ( $K = 0.51 \text{ Pa s}^n$ ;  $n = 0.547$  (Ver Anexo)) ya que al ser mayor con respecto a la presentada por la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$  contribuyó a la disminución considerable del desplazamiento de los glóbulos ayudando a estabilizar por un mayor tiempo el sistema. En este tipo de emulsiones se caracteriza porque el límite que separa la fase emulsión del clarificado es difusa y difícil de monitorear visualmente, aunque dentro de la emulsión los glóbulos tienen un movimiento a velocidad constante dependiendo de su tamaño excepto los extremadamente pequeños, posteriormente cuando los glóbulos alcanzan la parte superior de la emulsión forman una capa de crema que se reacomoda cuando lo agregados se ponen en contacto hasta un mayor empaquetamiento (Robins, 2000; Lizarraga y col., 2008; Sun y Gunasekaran, 2007; Blijdenstein y col., 2003; Blijdenstein y col., 2004), en este caso no se presentó el reacomodo de los glóbulos debido al tiempo que duró el estudio.

### **3.2.3.2. Emulsiones al 60%**

Las cinéticas de desestabilización de las emulsiones al 60% se muestran en la Figura 3.17. Todas estas emulsiones mostraron la presencia de 3 etapas: un periodo de retraso, un proceso de desestabilización y una etapa de reacomodo de los glóbulos.

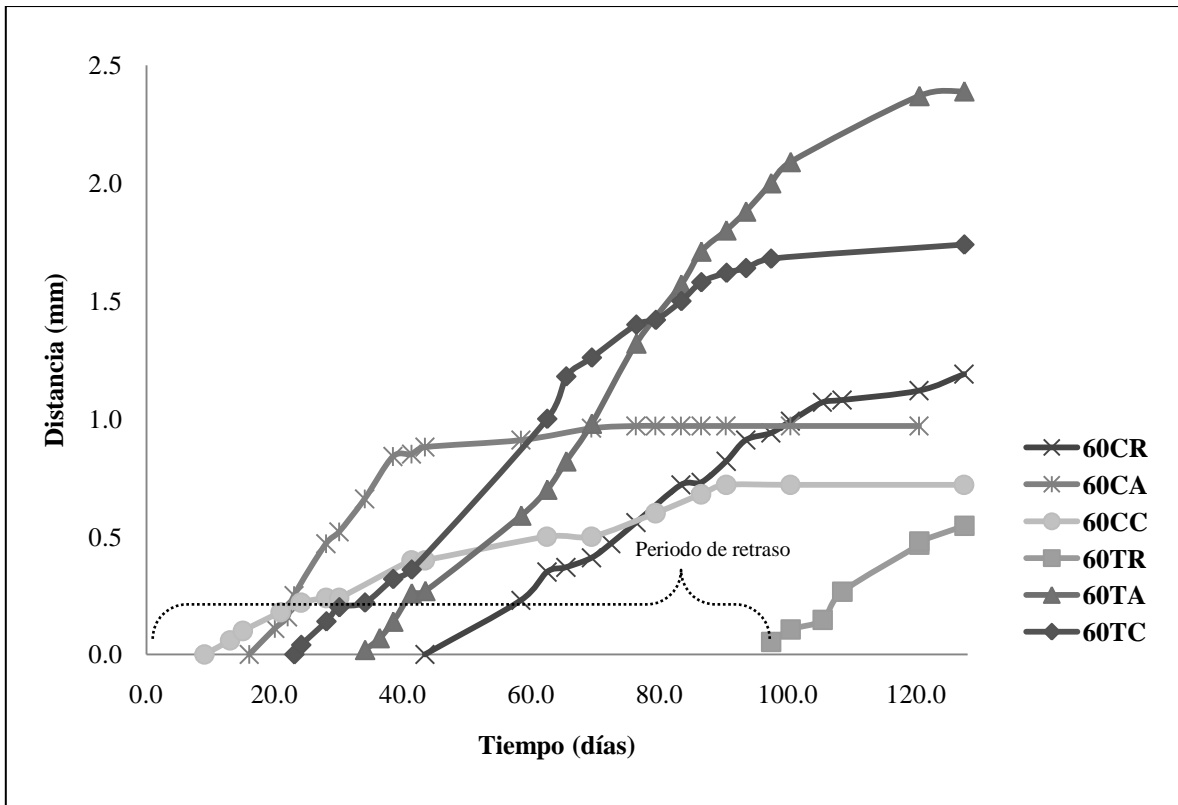


Figura 3.17 Cinéticas de desestabilización en emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C.

Para el caso de las emulsiones con carragenina  $\lambda$ , el periodo de retraso disminuyó conforme aumentó la temperatura de almacenamiento de manera tal que en la emulsión 60CC se mantuvo durante 7.5 días, en la emulsión 60CA permaneció durante 16 días, mientras que en la emulsión 60CR alcanzó los 43.4 días (Cuadro 3.5), posteriormente la velocidad de desestabilización alcanzada fue mayor en la emulsión 60CA (0.036 mm/día) que en la emulsión 60CR (0.017 mm/día), mientras que la emulsión 60CC presentó la velocidad más baja en esta etapa (0.008 mm/día). El reacomodo de los glóbulos se llevó a cabo lentamente en las emulsiones 60CA y 60CC con una velocidad aproximada de 0.001 mm/día, la emulsión refrigerada prácticamente no presentó este reacomodo (Cuadro 3.6), estas emulsiones no presentaron separación de fases a ninguna de las temperaturas de almacenamiento.

En las emulsiones que contienen goma tragacanto el periodo de retraso aumentó conforme disminuyó la temperatura de almacenamiento, la emulsión 60TC alcanzó un periodo de

retraso de 23.1 días, seguida por la emulsión 60TA en la que permaneció durante 34.1 días, en la emulsión 60TR alcanzó los 98 días (Cuadro 3.5). Al término de este periodo, el proceso de desestabilización para la emulsión 60TC se llevó a cabo a una velocidad de 0.026 mm/día, mientras que la emulsión 60TA mantuvo esta etapa a 0.032 mm/día y para el caso de la emulsión 60TR la velocidad se redujo hasta 0.016 mm/día, por otro lado en la emulsión 60TR no se presentó el reacomodo de los glóbulos durante el tiempo de almacenamiento, mientras que en las emulsiones almacenadas a 25 y 40°C, esta etapa fue muy lenta (Cuadro 3.6). Las emulsiones almacenadas a 25 y 40°C mostraron una pequeña separación de fases, la emulsión 60TA mostró separación al día 74.6 mientras que en la emulsión 60TC se presentó a partir del día 50.5, la emulsión 60TR no mostró separación de fases durante los 127 días de almacenamiento (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5 Periodo de retraso y separación de fases en emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C.

EMULSION	Periodo de retraso (días)	Separación de fases (días)
60CR	43.4	No presentó
60CA	16	No presentó
60CC	7.5	No presento
60TR	98	No presentó
60TA	34.1	74.6
60TC	23.1	50.5

Cuadro 3.6 Velocidad de desestabilización en emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto), almacenadas a 4, 25 y 40°C.

EMULSION	VELOCIDAD (mm/día)			
	10 – 30días	30 – 40días	40 – 90días	90 – 127días
60CR			0.017	0.089
60CA	0.036		0.001	
60CC	0.008			0.001
60TR				0.016
60TA			0.032	0.016
60TC	0.026			0.003

El comportamiento mostrado por las emulsiones al 60% sugiere que a altas concentraciones de aceite, las emulsiones forman estructuras en red simples que pueden describirse como partículas – gel (emulsiones gelificadas) debido a una fuerte interacción de agotamiento entre los glóbulos (Robins, 2002). Esto ocurre porque la velocidad de floculación es mayor a la velocidad de cremado; los flóculos llegan a encontrarse hasta superponerse y entonces formar una gran estructura en red antes de cremar. De esta manera las emulsiones son espesas y llegan a ser relativamente estables contra el cremado por cierto tiempo (periodo de retraso), después de este periodo de retraso las emulsiones se separan debido al reacomodo de la estructura (Blijdenstein y col., 2003). Inicialmente no hay movimiento, posteriormente la red sube continuamente hasta alcanzar la capa de crema, adicionalmente sufre una compactación a lo largo del tiempo hasta llegar a formar una capa uniforme. El movimiento de los flóculos para formar la capa de crema llega a ser extremadamente difícil cuando la floculación es amplia, esto debido a que los glóbulos en la capa de crema son empaquetados fuertemente causando que la emulsión llegue a ser rígida y que los glóbulos ya no puedan moverse más lejos, entonces la repulsión electrostática juega un papel predominante en la velocidad del cremado (Robins, 2000; Lizarraga y col., 2008). Por lo tanto, para estas emulsiones la velocidad de cremado dependió de dos factores, de la consistencia de la fase continua y de la atracción causada por el agotamiento entre los glóbulos, retardando así el flujo del clarificado a través de la red y reforzando los enlaces glóbulo - glóbulo (Blindenstein y col., 2004).

Las emulsiones al 30% elaboradas con goma tragacanto son más estables al proceso de desestabilización que las emulsiones que contienen carragenina  $\lambda$ , ya que en las emulsiones con goma tragacanto el periodo de retraso fue más largo a las tres temperaturas de almacenamiento (Figura 3.18), una vez iniciada la inestabilidad cinética, la velocidad de desestabilización se redujo conforme disminuyó la temperatura de almacenamiento y la separación de fases se presentó mucho después que en las emulsiones elaboradas con carragenina  $\lambda$ , en la emulsión con goma tragacanto almacenada en refrigeración, no se observó presencia de clarificado, las emulsiones preparadas con goma tragacanto no mostraron cambios apreciables en su distribución y tamaño de partícula debido posiblemente a que el movimiento de los glóbulos se llevó a cabo individualmente sin la formación de flóculos o agregados, asociado a las propiedades tensoactivas y a la elevada

consistencia de la mezcla de albúmina de huevo 2% - goma tragacanto 0.5%, mantuvieron por un mayor tiempo estable al sistema.

En las emulsiones al 60% se observó una distribución bimodal de tamaños con una mínima variación en el tamaño de partícula, tanto para las emulsiones elaboradas con carragenina  $\lambda$  como para las que contenían goma tragacanto, las emulsiones almacenadas a 40°C mostraron aparentemente una mayor estabilidad ya que no presentaron incrementos notables en el % de luz retrodispersa, así como en el espesor del pico formado, no obstante se observaron cambios en el color y consistencia de la mismas al término del almacenamiento, indicando que el aumento de la temperatura de almacenamiento si desestabiliza el sistema ya que ocasiona cambios en las características iniciales de la emulsión, no necesariamente con un aumento en la velocidad de desestabilización. A una temperatura de almacenamiento de 4°C, la estabilidad en la emulsión fue mayor, ya que no se observó separación de fases con ninguno de los polisacáridos empleados, sin embargo la emulsión que contenía goma tragacanto mostró un período de retraso de casi el doble de tiempo que la elaborada con carragenina  $\lambda$ , lo que sugiere que existe una mejor estabilización del sistema utilizando goma tragacanto (Figura 3.18), debido a que la consistencia de la fase continua fue mayor con respecto a la mezcla albúmina de huevo 2% - carragenina  $\lambda$ , aunado a que puede existir una mayor repulsión electrostática entre la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto debido a la estructura del polisacárido.

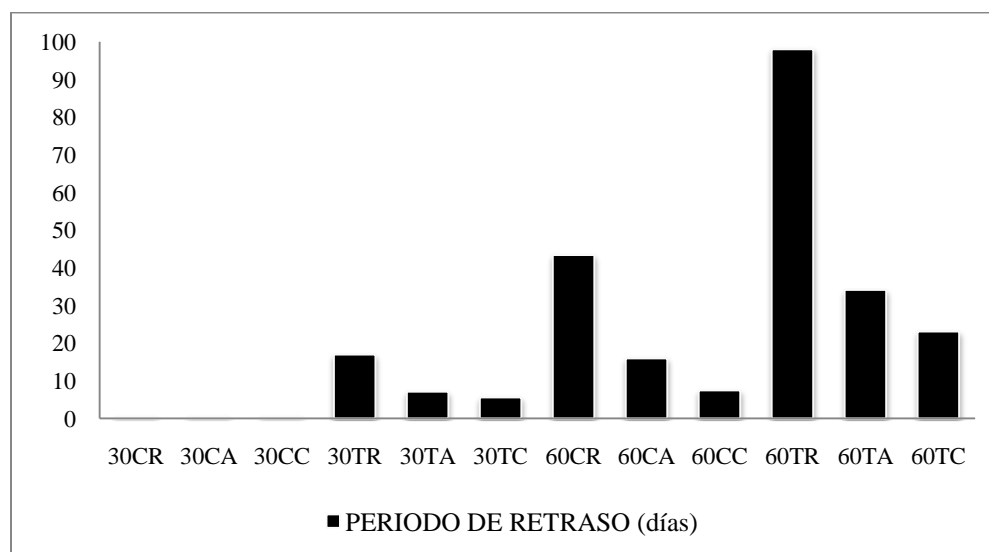


Figura 3.18 Comportamiento del periodo de retraso mostrado por emulsiones al 30 y 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) almacenadas a 4, 25 y 40°C.



Con lo anterior se puede establecer que las emulsiones al 60% son más estables que las emulsiones al 30% a la misma concentración de proteína - polisacárido, debido a que la concentración de aceite juega un papel dominante en la estabilidad de las emulsiones. De igual manera a lo reportado por Sun y Gunasukaran (2009), la estabilidad del sistema se mejoró con el aumento en la concentración de aceite, debido al incremento en el empaquetamiento de los glóbulos, con una mayor consistencia en la emulsión y la disminución de la velocidad de desestabilización. Se observó que a una concentración baja de aceite, la desestabilización fue rápida debido a que la formación de floculos o agregados que cremaron rápidamente en virtud de su propio peso, a diferencia de lo que ocurrió en las emulsiones concentradas, donde la concentración del aceite no tuvo efectos notables en el tamaño de partícula, pero si resultó en un mayor empaquetamiento de los glóbulos y en la formación partícula - gel dentro del sistema que ocasionó el incremento en el periodo de retraso y por ende la emulsión permaneció estable por más tiempo

## CONCLUSIONES

Las emulsiones al 30 y 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo al 2% – carragenina  $\lambda$  al 0.5% y albúmina de huevo al 2% - goma tragacanto al 0.5% presentaron un comportamiento bimodal de la distribución de tamaño de partícula independientemente de la temperatura a la que fueron almacenadas.

Las emulsiones elaboradas con albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$  presentaron un tamaño de partícula menor (1.04  $\mu\text{m}$  al 30% y 1.10  $\mu\text{m}$  al 60%) que las que contenían goma tragacanto (1.26  $\mu\text{m}$  al 30% y 1.27  $\mu\text{m}$  60%) en el día cero, sin embargo el aumento en la concentración de aceite no mostró efectos notables sobre el tamaño de partícula.

Las emulsiones al 30%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$  mostraron un aumento en el tamaño de partícula durante los 21 días almacenamiento a las tres temperaturas sin que la temperatura influyera sobre el incremento, mientras que las emulsiones elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto no mostraron cambios notables en el  $d_{4,3}$  a las temperaturas de almacenamiento empleadas. Las emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) tampoco mostraron cambios importantes en el tamaño de partícula durante 21 días de almacenamiento.

Las emulsiones al 30% elaboradas con la mezcla la mezcla albúmina de huevo al - carragenina  $\lambda$  son las más inestables, ya que presentaron una separación de fases muy rápida sin importar la temperatura almacenamiento, mientras que las emulsiones al 30% elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, existe una gran influencia de temperatura sobre la separación de fases, ya que a menor temperatura de almacenamiento la separación de fases se presentó posteriormente.

La emulsión elaborada con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto, almacenada en refrigeración fue la más estable en cuanto a las emulsiones al 30% durante los 30 días de almacenamiento, ya que no presentó separación de fases.

Con el incremento en la concentración de la fase dispersa se observa una disminución relevante en el espesor de pico formado, por lo tanto el proceso de desestabilización se reduce significativamente.

Las emulsiones al 60%, elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - carragenina  $\lambda$  no presentaron separación de fases a los 127 días de almacenamiento, sin embargo al finalizar el estudio se observaron cambios en la apariencia y consistencia iniciales, no así durante el almacenamiento a bajas temperaturas (4°C) ya que disminuyó la magnitud de estos cambios.

Las emulsiones al 60% elaboradas con la mezcla albúmina de huevo - goma tragacanto y almacenadas a 25 y 40°C mostraron una pequeña cantidad de clarificado a los 127 días de almacenamiento, mientras que la emulsión refrigerada no presentó separación de fases y por lo tanto fue la más estable al proceso de desestabilización de las emulsiones al 60%.

## **RECOMEDACIONES**

Evaluar mediante microscopía el comportamiento de las emulsiones al 30 y 60 % elaboradas con la mezcla albúmina de huevo – polisacárido (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) para identificar el tipo de interacciones glóbulo – glóbulo presentes en el sistema y poder diferenciar la presencia de floculación o coalescencia.

Estudiar el comportamiento reológico de las emulsiones analizadas para conocer sus propiedades viscoelásticas y asimismo definir su importancia sobre la estabilidad del sistema.

Emplear recipientes de vidrio con taparroca para el almacenamiento de las emulsiones y así evitar la deshidratación presentada en las muestras mantenidas a 40°C, con la finalidad de determinar la distribución y el tamaño de partícula por un periodo de tiempo mayor.

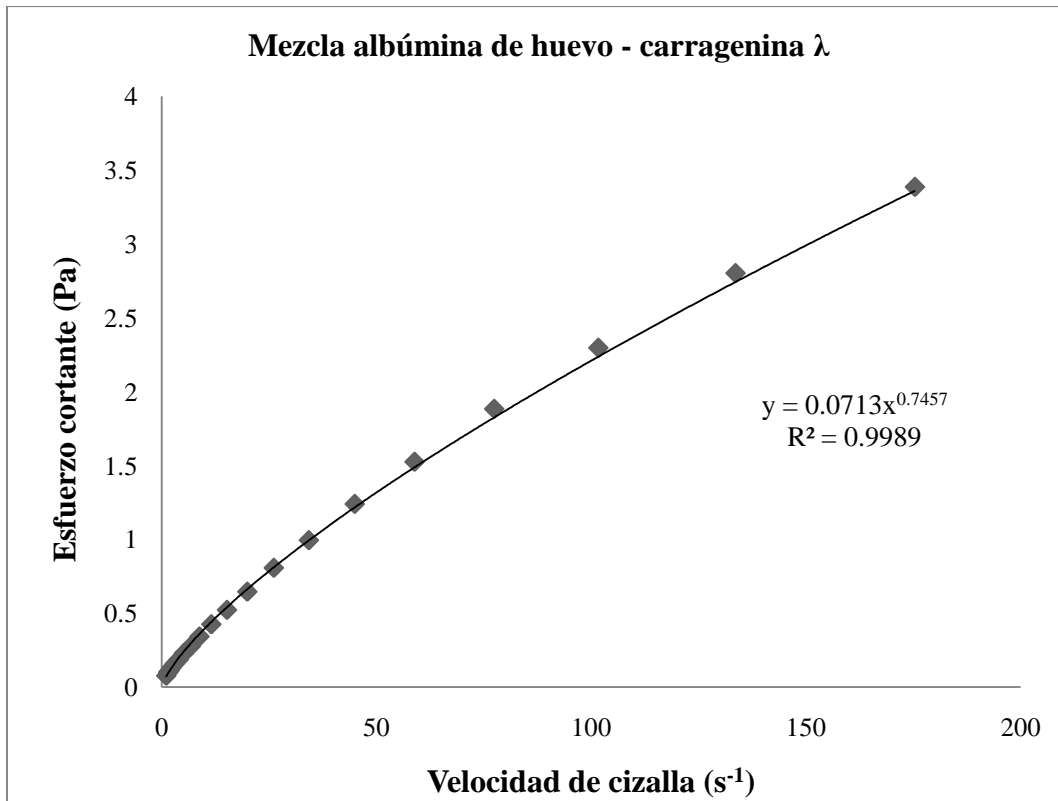
Utilizar las mezclas albúmina de huevo 2% - polisacárido 0.5% (carragenina  $\lambda$ , goma tragacanto) en sistemas reales que presenten problemas de baja estabilidad, para identificar las ventajas de su aplicación y considerar su implementación a nivel industrial.

## ANEXO

### 1. Caracterización reológica de las mezclas albúmina de huevo – polisacárido

#### Mezcla albúmina de huevo 2% – carragenina $\lambda$ 0.5%

La caracterización se llevó a cabo mediante un viscosímetro Rheometer LS-100, DG-1 de cilindros concéntricos con ayuda del programa Physica US200 propio del equipo. Se utilizaron 8ml de muestra a temperaturas a  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ . Las variables obtenidas fueron velocidad de cizalla ( $\text{s}^{-1}$ ) y esfuerzo cortante (Pa).

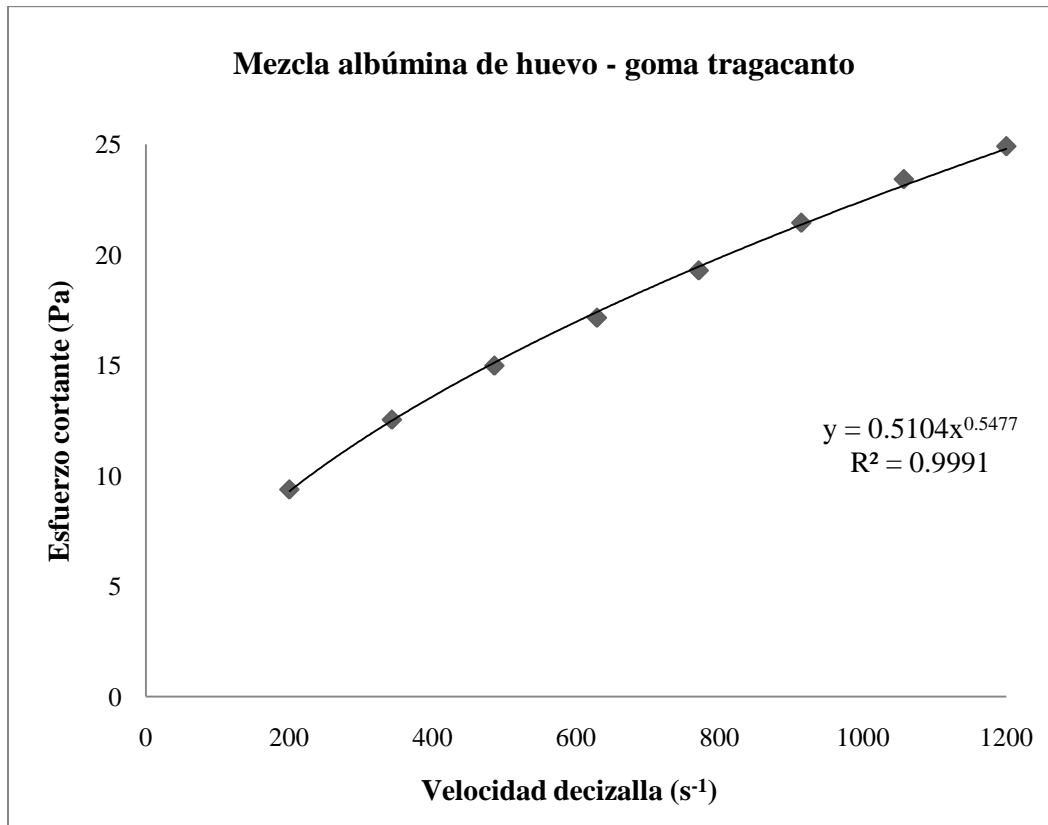


Donde el índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) es 0.7457 y el índice de consistencia ( $k$ ) 0.0713 es  $\text{Pa s}^n$ .

### Mezcla albúmina de huevo 2% – goma tragacanto 0.5%

La caracterización se realizó mediante un viscosímetro Rheomat Mettler RM 180 de cilindros concéntricos a temperatura ambiente ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ), se utilizaron 15 ml de muestra.

Las variables obtenidas fueron velocidad de cizalla ( $\text{s}^{-1}$ ) y esfuerzo cortante (Pa).



Donde el índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) es 0.5477 y el índice de consistencia ( $k$ ) 0.5104 es  $\text{Pa s}^n$ .

## REFERENCIAS

- Andrea, C. N. (2010). *Comportamiento de hidroxipropilmetilcelulosa y sus mezclas con  $\beta$ -lactoglobulina en solución, interfases y emulsiones*. Tesis de doctorado. Universidad de Buenos Aires- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Astiasaran, I., Martínez, J. A. (2000). *Alimentos, Composición y Propiedades*. México: Mc-Graw-Hill.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos* (4° ed.). México: Pearson Education.
- Belitz, H.D., Groseh, W. (1997). *Química de Alimentos*. (2° ed.). España: Acribia.
- Blijdenstein, T. B. J., van Vliet, T., van der Linden, E., van Aken, G. A. (2003). *Suppression of depletion flocculation in oil-in-water emulsions: a kinetic effect of  $\beta$ -lactoglobulin*. Food Hydrocolloids, 17, 661-669.
- Blijdenstein, T. B. J., van Winden, A. J. M., van Vliet, T., van der Linden, E., van Aken, G. A. (2004). *Serum separation and structure of depletion- and bridging-flocculated emulsions: a comparison*. Colloids and Surfaces, 245, 41-48.
- Bru, P., Brunel, L., Buron, H. Cayre, I., Ducarre, X., Fraux, A., Mengual, O., Meunier, G., de Sainte Marie, A., Snabre, P. (2004). *Particles size and rapid analyses of concentrated dispersions. Use of multiple light scattering technique*. No publicado.
- Burgos-Montes, O., Moreno, R. (2008). *Stability of concentrated suspensions of AL203-SiO2 measured by multiple light scattering*. Journal of the European Ceramic Society. No publicado.
- Comas, D. I., Wagner, J. R., Tomas, M. C. (2006). *Creaming stability of oil in water (O/W) emulsions: Influence of pH on soybean protein-*lecithin* interaction*. Food Hydrocolloids, 20, 990-996.
- Coultate, T. P. (1998). *Manual de Química y Bioquímica de los Alimentos* (2ª. ed.). España: Acribia.
- Coupland, J. N., McClements, D. J. (2001). *Droplet size determination in food emulsions: comparison of ultrasonic and light scattering methods*. Journal of Food Engineering, 50, 117-120.

- Cubero, N., Monferrier, A., Villalta, J. (2002). *Aditivos Alimentarios*. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Dagleish, D.G. (2006). *Food emulsions – their structures and structure - forming properties*. Food Hydrocolloids, 20, 415-422.
- DEIA. *Diccionario de Especialidades para la Industria Alimentaria*. (2001). 14<sup>a</sup> ed. México: THOMSON, PLM.
- DEIA. *Diccionario de Especialidades para la Industria Alimentaria*. (2006). 16<sup>a</sup> ed. México: THOMSON, PLM.
- Dickinson, E. (1993). *Towards more natural emulsifiers*. Trend in Food Science & Technology, 4, 330-334
- Dickinson, E. (2003). *Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems*. Food Hydrocolloids, 17, 25-39.
- Dickinson, E. Pawlowsky, K. (1998) *Influence of  $\kappa$ -carrageenan on the properties of a protein-stabilized emulsion*. Food Hydrocolloids, 12, 417-423.
- Dickinson, E. Ritzoulis, C. (2000). *Creaming and rheology of oil-in-water emulsions containing sodium dodecyl sulfate and sodium caseinate*. Journal of Colloid and Interface Science, 224, 148–154.
- Djordjevic, D., Cercaci, L., Alamed, J., McClements, D. J., Decker, E. A. (2008). *Stability of citral in protein–and gum arabic-stabilized oil-in-water emulsions*. Food Chemistry, 106, 698-705.
- Fennema, O. R. (2000). *Química de los Alimentos*. 2<sup>a</sup> ed. España: Acribia.
- Galazka, V. B., Dickinson, E., Ledward, D. (2000). *Influence of high pressure processing on protein solutions and emulsions*. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 5, 182-187.
- González, S. J. (2003). *Propiedades reológicas de emulsiones concentradas aceite-agua estabilizadas con una mezcla proteína - polisacárido anionico*. Tesis de Maestría. Fisicoquímica. Métodos y Metrología. UNAM - FESC.
- Gu, Y. S., Decker, E. A., McClements, D. J. (2005) *Influence of pH and carrageenan type on properties of  $\beta$  – lactoglobulin stabilized oil-in-water emulsions*. Food Hydrocolloids, 19, 83 – 91.



- Hill, S. E., Ledward, D. A., Mitchell, J.R. (1998). *Functional properties of food macromolecules* (2<sup>a</sup> ed.) Gran Bretaña: Aspen Publication.
- Holoubek, J. (2007). Some *applications of light scattering in materials science*. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radioactive Transfer, 106, 104-121.
- Jafari, S.M., Assadpoor, E., He, Y., Bhandari, B. (2008). *Re - coalescence of emulsion droplets during high-energy emulsification*. Food Hydrocolloids, 22, 1191-1202.
- Jourdain, L., Leser, M. E., Schmitt, C., Michel, M., Dickinson. E. (2008). *Stability of emulsion containing sodium caseinate and dextran sulfate: Relationship to complexation in solution*. Food Hydrocolloids, 22, 647-659.
- Khajavi. R., Mossavi, S. H., Kiumarsi, A. Rashidi. A. (2007). *Gum Tragacanth Fibers from Astragalus gummifer Species: Effects of influencing factors on mechanical properties of fibers*. Journal of Applied Sciences, 7 (19). 2861-2865.
- Klinkesorn, U., Sophanodora. P. Chinachoti, P., McClemenst, D. J. (2004). *Stability and rheology of corn oil-in-water emulsions containing maltodextrin*. Food Research International, 37, 851 -859.
- Lizarraga, M. S. Pan, L.G., Añon, M. C., Santiago, L. G. (2008). *Stability of concentrated emulsions measured by optical and rheological methods. Effect of processing conditions — I. Whey protein concentrate*. Food Hydrocolloids, 22, 868-878.
- Madiedo, J. M. Bower, C. Mackley, M. R. Gallegos, O. (1997). *Reología de emulsiones estabilizadas por biopolímeros*. Grasas y Aceites, 48 (6), 405-410.
- MAN0247S. (1999). *Guía para los operadores* (2<sup>a</sup> ed.). Inglaterra: Malvern Instruments.
- Manoj, P., Fillery – Travis, A. J., Watson, A. D., Hibberd, D. J. Robins, M. M. (1998). *Characterization of a depletion – flocculated polydisperse emulsion I. creaming behavior*. Journal of Colloid and Interface Science, 207, 283 -293.
- McClements, D. (2004). *Protein-stabilized emulsions*. Current Opinion in Colloid and Interfase Science, 9, 305-313.
- McClements, D. J. (2005). *Food Emulsions: Principles, Practices and Techniques*. Boca Raton, FL: CRC Press.

- McClements, D.J. (2006). *Non – covalent interaction between proteins and polysaccharides*. *Biotechnology Advances*, 24, 621-625.
- Mengual, O. (1999). *TURBISCAN MA2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis*. *Talanta*, 50, 445-456.
- Mine, Y. (1995). *Recent advances in the understanding of egg white protein functionality*. *Trends in Food Science & Technology*, 6, 225 -232.
- Mirhosseini, H., Tan, C. P., Hamid, N. S.A., Yusof, S. (2008). *Optimization of the contents of arabic gum, xanthan gum and orange oil affecting turbidity, average particle size, beverage polydispersity index and density in orange emulsion*. *Food Hydrocolloids*, 22, 1212-1223.
- Pasquel, A. (2001). *Gomas: una aproximación a la industria de alimentos*. *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria*, 1, 1-8.
- Phillips, L., Whitehead, D., Kinsella, J. (1994). *Structure-function properties of food proteins*. E.U.: Academic Press.
- Pizzino, A., Catte, M., Van Hecke E., Salager, J., Aubry, J. (2009). *On line light backscattering tracking of the transitional phase inversion of emulsions*. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 338, 148-154.
- Primo, E. (1998). *Química de Alimentos*. España: Síntesis.
- Robins, M. (2000). *Emulsions — creaming phenomena*. *Current Opinion in Colloid and Interfase Science*, 5, 265-272.
- Robins, M. (2002). *Emulsions – creaming and rheology*. *Current Opinion in Colloid and Interfase Science*, 7, 419 - 425.
- Roland, I., Piel, G., Delattre, L., Evrard, B. (2003). *Systematic characterization of oil-in-water emulsions for formulation design*. *International Journal of Pharmaceutics*, 263, 85-94.
- Schramm, L.L. (2005). *Emulsions, foams and suspensions*. *Fundamentals and Applications*. Canada: Wiley-VCH.
- Sharma, S. K., Mulvanen, S. J. Rizvi, S. H. (2003). *Ingeniería en alimentos. Operaciones Unitarias y Prácticas de Laboratorio*. México: Limusa Willey.
- Stadelman, W. J., Cotterill, O. J. (1995) *Egg science and technology*. 4<sup>a</sup> ed. New York: Haworth Food & Agricultural Products Press.

- 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 xantan gum*. Food Hydrocolloids, 23, 165-174.
- Sun, C., Gunasekaran, S., Richards, M. P. (2007). *Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions*. Food Hydrocolloids, 21, 555-564.
- van Aken. G. A., Blijdenstein, T. B. J., Hotrum, N. E. (2003) *Colloidal destabilization mechanisms in protein-stabilized emulsions*. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 8, 371-379.
- Wong, P. D., Dominic, W. S. (1995). *Química de los Alimentos: Mecanismos y Teoría*. España: Acribia.
- Wongsasulak, S. Kit, K. M., McClements, D. J., Yoovidhya, T., Weiss, J. (2007). *The effect of solution properties on the morphology of ultrafine electrospun egg albumen – PEO composite fibers*. Polymer, 48, 448 – 457.

### Consultas electrónicas

- Ampliación de Tecnología de los Alimentos. *Estructura y función de proteínas*. Extraído el 20 de enero del 2010 desde <http://www.itescham.com/Syllabus/Doctos/r637.PDF>
- Cuaderno FIRP S303-PP. Surfactantes. *Surfactantes no iónicos* (Extraído el 27 de enero del 2010 desde <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S303.pdf>
- Cuaderno S122-N. *Fenómenos Interfaciales en Dispersiones Polifásicas y en Medios Porosos*. Extraído el 27 de enero del 2010 desde <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S122N.pdf>
- Cuaderno S277-A. *Emulsiones Múltiples*. Extraído el 11 de febrero del 2010 desde <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S277A.pdf>
- Fernández Arévalo Mercedes. *Emulsiones*. Extraído el 10 de noviembre del 2009 desde [http://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec\\_far/emulsiones.pdf](http://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/emulsiones.pdf)

- Grasas, Aceites, Ácidos grasos, Triglicéridos. Extraído el 29 de agosto del 2010 desde <http://www.scientificpsychic.com/fitness/aceites-grasas2.html>
- Porto, S. (2003). *Carragenina*. Extraído el 29 de septiembre del 2009 desde <http://www.agargel.com.br/carragenina.html>