



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

COMPORTAMIENTO AL FLUJO Y ESTABILIDAD DE
EMULSIONES ALIMENTICIAS ELABORADAS CON
TRAGACANTO Y ALBÚMINA DE HUEVO: EFECTO DE LA
FASE CONTINUA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A

Vergara Herrera Cinthya Maara Mariel

ASESORAS

M. en C. Julieta González Sánchez

Dra. María Guadalupe Sosa Herrera



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
 UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: **VOTO APROBATORIO**
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



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
EXÁMENES PROFESIONALES

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **TESIS**
Comportamiento al flujo y estabilidad de emulsiones alimenticias elaboradas con tragacanto y albúmina de huevo: efecto de la fase continua

Que presenta la pasante: **Cinthya Maara Mariel Vergara Herrera**
 Con número de cuenta: **40802397-9** 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 Izcalli, Méx. a 07 de agosto de 2012.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	IA. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
VOCAL	IA. Patricia Muñoz Aguilar	
SECRETARIO	M. en C. Julieta González Sánchez	
1er SUPLENTE	M. en C. Virginia Agustina Delgado Reyes	
2do SUPLENTE	IA. Maritza Rocandio Pineda	

AGRADECIMIENTOS

A mi padre Juan Luis:

Por darme una carrera para mi futuro y ser el pilar de mi educación, por tus consejos y motivaciones brindadas para hacer de mi una mejor persona.

A mi madre Ma. Elena:

Por creer en mí en todo momento, por tu apoyo incondicional, por el tiempo y el amor que siempre me has brindado.

A mi hermano Juan Luis:

Por poner a prueba mi paciencia y mis habilidades de negociación, por brindarme la motivación necesaria en cada momento.

A mis amigos:

A Josué, Mariana, Eder, Ana, Joce, Rubén, Itzel, Ernesto, Ceci, Diego y Brenda por todos los momentos vividos y su apoyo incondicional en las buenas y en las malas.

A mis asesoras M. en C. Julieta y la Dra. María Guadalupe:

Por los conocimientos, el tiempo, la paciencia y el apoyo brindado, por alentarme a alcanzar mi meta.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por enseñarme a ser una persona de valores, por poner a mi alcance una gran cantidad de conocimientos y por formar una nueva Ingeniera en Alimentos.

GRACIAS

“Por mi raza hablara el espíritu”

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO I.....	10
ANTECEDENTES.....	10
1.1 Emulsiones alimentarias.....	10
1.1.2 Emulsificantes.....	12
1.1.3 Estabilizantes.....	13
1.1.4 Estabilidad de emulsiones.....	14
1.1.5 Fenómenos de inestabilidad de emulsiones.....	16
1.2 Biopolímeros en emulsiones.....	22
1.2.1 Proteína: Albúmina de huevo.....	22
1.2.2 Polisacárido: Goma tragacanto.....	24
1.2.3 Interacción de biopolímeros.....	24
1.3 Reología de fluidos.....	26
1.3.1 Fluidos newtonianos.....	27
1.3.2 Fluidos no newtonianos.....	28
1.4 Reología de emulsiones.....	33
1.4.1 Fracción volumen.....	34
1.4.2 Tamaño de partícula.....	36
1.4.3 Interacciones coloidales.....	37
1.5 Métodos para cuantificar la estabilidad.....	37
CAPÍTULO II.....	40
METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	40
2.1 Objetivos.....	40
2.2 Desarrollo experimental.....	40
2.2.1 Materiales.....	40

2.2.2 Métodos	42
2.2.3 Tratamiento estadístico.....	48
CAPÍTULO III	49
RESULTADOS	49
3.1 Tamaño de partícula en sistemas acuosos	49
3.2 Tamaño de glóbulo en emulsión	50
3.3 Pruebas reológicas en sistemas acuosos	52
3.4 Pruebas reológicas en emulsión	61
3.5 Cinética de desplazamiento en emulsiones.....	67
CONCLUSIONES	74
REFERENCIAS	76

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de dispersiones.....	9
Cuadro 2. Clasificación de los fluidos no newtonianos.....	28
Cuadro 3. Modelos matemáticos que describen a los fluidos no newtonianos.....	28
Cuadro 4. Condiciones de prueba utilizadas para comportamiento al flujo de fases continuas.	42
Cuadro 5. Condiciones de prueba utilizadas para comportamiento al flujo de emulsiones.....	43
Cuadro 6. Diámetro obtenido para los distintos sistemas acuosos.....	50
Cuadro 7. Diámetro obtenido para las distintas emulsiones elaboradas.....	52
Cuadro 8. Valores de los distintos parámetros reológicos para cada uno de los sistemas acuosos evaluados.....	59
Cuadro 9. Valores de n , k y σ_0 para las distintas emulsiones.....	66
Cuadro 10. Periodos de retraso y velocidades de desplazamiento para las distintas emulsiones.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de dispersiones	9
Figura 2. Homogeneización primaria (1), homogeneización secundaria (2)	11
Figura 3. Inestabilidad termodinámica.....	14
Figura 4. Fenómenos de inestabilidad.....	16
Figura 5. Cremado	17
Figura 6. Coalescencia	20
Figura 7. Comportamiento de la mezcla proteína-polisacárido.....	24
Figura 8. Representación gráfica del comportamiento reológico newtoniano	27
Figura 9. Curva de los distintos comportamientos reológicos, a) Esfuerzo de cizalla contra velocidad de cizalla, b) Viscosidad aparente contra velocidad de cizalla	29
Figura 10. Viscosidad aparente contra velocidad de cizalla en líquidos ideales y no ideales	30
Figura 11. Viscosidad de fluidos dependientes del tiempo	32
Figura 12. Comportamiento de las partículas al evaluar la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla	34
Figura 13. Arreglo de las partículas respecto a la fracción volumen.....	36
Figura 14. Dispositivo de luz dispersada en un tubo vertical.....	37
Figura 15. Detector T y BS de Turbiscan MA 2000.....	46
Figura 16. Fenómenos de inestabilidad presentados en emulsiones.....	47
Figura 17. Cinética de desplazamiento para emulsiones	48
Figura 18. Comportamiento reológico de los sistemas acuosos elaborados con goma tragacanto (0.3% y 0.5%) o albúmina de huevo (1% y 2%)	54
Figura 19. Viscosidad aparente para distintos sistemas acuosos elaborados con goma tragacanto (0.3% y 0.5%)	54
Figura 20. Comportamiento reológico de los sistemas acuosos elaborados con albúmina de huevo (1% y 2%)	55

Figura 21. Viscosidad aparente para distintos sistemas acuosos elaborados con albúmina de huevo (1% y 2%)	56
Figura 22. Comportamiento reológico de sistemas acuosos elaborados con mezclas de tragacanto (0.3%) y albúmina de huevo (1% y 2)	57
Figura 23. Viscosidad aparente de sistemas acuosos elaborados con mezcla de tragacanto (0.3%) y albúmina de huevo (1% y 2%).....	58
Figura 24. Comportamiento reológico de los sistemas acuosos elaborados con mezcla de tragacanto (0.5%) y albúmina de huevo (1% y 2%).....	59
Figura 25. Viscosidad aparente de sistemas acuosos elaborados con mezcla de tragacanto (0.5%) y albúmina de huevo (1% y 2%).....	59
Figura 26. Comportamiento reológico de emulsiones elaboradas únicamente con goma tragacanto (0.5%) o albúmina de huevo (1% y 2%)	63
Figura 27. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla para emulsiones elaboradas con goma tragacanto (0.5%) o albúmina de huevo (1% y 2%)	63
Figura 28. Comportamiento reológico de emulsiones elaborados con mezclas de tragacanto (0.3% y 5%) y albúmina de huevo (1% y 2)	64
Figura 29. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla para emulsiones elaboradas con mezclas de goma tragacanto (0.3% y 5%) y albúmina de huevo (1% y 2%).....	66
Figura 30. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con albúmina de huevo al 1%	68
Figura 31. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con albúmina de huevo al 2%)	68
Figura 32. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con tragacanto al 0.5%	69
Figura 33. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con mezcla de tragacanto al 0.3% y albúmina al 1%	70
Figura 34. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con mezcla de tragacanto al 0.3% y albúmina al 2%	70
Figura 35. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con mezcla de tragacanto al 0.5% y albúmina al 1%	71

Figura 36. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con mezcla
de tragcanto al 0.5% y albúmina al 2% 71

Figura 37. Distancia recorrida en función del tiempo de las distintas emulsiones..... 73

RESUMEN

El presente trabajo comprende el estudio de dos diferentes biopolímeros utilizados para la elaboración de distintos sistemas acuosos así como de las emulsiones derivadas a partir de estos; está armado de tal forma que en el Capítulo I se presentan los antecedentes necesarios para poder comprender la base de esta investigación, donde se tratan temas sobre la estabilidad de emulsiones, los diferentes fenómenos que pueden llegar a desestabilizarlas, así como las características de los distintos biopolímeros utilizados en la investigación, y se muestran, además los diferentes comportamientos reológicos que tanto fases continuas como emulsiones pueden llegar a presentar.

En la metodología utilizada para llevar a cabo la experimentación (Capítulo II) se presentan los objetivos a cumplir, los métodos seguidos para elaborar las fases acuosas y las emulsiones, al mismo tiempo, se mencionan las distintas pruebas que se realizaron a los sistemas referidos, sus condiciones y procedimientos, también se presenta la secuencia de cálculo utilizada para los diferentes resultados obtenidos en las distintas pruebas.

En el Capítulo III, se describen y analizan los resultados obtenidos en cada prueba, las emulsiones elaboradas con mezclas de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 1% y 2% presentaron coeficientes de variación altos debido a la presencia de espuma la cual no pudo ser eliminada del sistema. Además, se pudo conocer que la variación de la concentración de albúmina de huevo no presentó cambios considerables en las pruebas de comportamiento al flujo en fase continua, al mismo tiempo las mezclas de goma tragacanto al 0.3% con albúmina al 1% y 2% en fase continua, presentaron ligeros cambios en los parámetros reológicos, sin embargo los resultados obtenidos en la cinética de desplazamiento (estabilidad) mostraron variación debido a la concentración de proteína. Cabe resaltar que las emulsiones elaboradas con goma tragacanto al 0.3% se desestabilizaron inmediatamente después de su elaboración por lo que no fue posible realizar ninguna prueba.

INTRODUCCIÓN

Las emulsiones alimenticias son dispersiones que consisten en la unión forzada de dos fases no miscibles naturalmente (fase dispersa y fase continua). La fase dispersa se mantiene distribuida en forma de gotitas en la fase continua, obteniendo una mezcla homogénea y estable entre las dos sustancias inmiscibles (Cubero y col., 2002). En el campo de los alimentos las emulsiones tienen mayor estudio e importancia ya que existe una gran cantidad de productos de este tipo que se consumen a diario como son la mantequilla, aderezos, margarinas, cremas, mayonesas, helados, leche, entre otros. Generalmente, los líquidos inmiscibles que conforman una emulsión son de naturaleza no polar (oleosa) y polar (acuosa), y la mezcla de ambos da lugar a dos tipos de emulsiones: emulsiones aceite en agua (o/w) y emulsiones agua en aceite (w/o) (Aranberri y col., 2006). Dada la diferente naturaleza de las fases oleosas y acuosas que conforman a estas dispersiones se espera que exista diferencia de densidades y al mismo tiempo diferentes tipos de interacciones entre las partículas, que conduzcan tarde o temprano a una separación de fases como consecuencia de los fenómenos de inestabilidad que se pueden presentar en las emulsiones tales como la migración de partículas (cremado, sedimentación) y la variación de tamaño de partícula (coalescencia, floculación), que en la práctica suponen el fin de su vida útil (Muñoz y col., 2007; Charalambous y Doxastakis, 1989). Esto se vuelve un problema serio a no ser que se compense la inestabilidad termodinámica de estos sistemas mediante lo que se puede denominar estabilidad cinética, dicha estabilidad se puede lograr formulando emulsiones estables a las cuales se les modifique la fase continua por la adición de emulsificantes y estabilizantes con los cuales se logra un incremento en la viscosidad de dicha fase, lo que restringe la movilidad de las gotas de la fase dispersa y al mismo tiempo disminuye la tensión interfacial entre el aceite y el agua dando lugar a emulsiones con una mayor estabilidad. Por tanto, la adición de emulsificantes y estabilizantes tanto en forma individual como en mezcla se vuelve de suma importancia, ya que de ellos y sus interacciones en la fase continua dependerá la formación de emulsiones con una mayor estabilidad a largo plazo (Muñoz y col., 2007). Dentro de las emulsiones alimenticias se sabe que la aplicación de albúmina de huevo

en la industria es en particular en la elaboración de espumas, ya que es una de sus principales propiedades funcionales, sin embargo, se han encontrado emulsiones en las cuales se hace uso de esta proteína que actúa como agente emulsificante, algunos ejemplos son la mayonesa y los aderezos (McClements, 2005). Además se han encontrado estudios realizados por Drakos y Kiosseoglou (2008) y revisiones por Mine (1995), en los cuales se afirma que la albúmina de huevo puede ser utilizada en la industria de los alimentos como emulsificante en presencia de lípidos y carbohidratos. Por otro lado, la goma tragacanto al ser un polisacárido bifuncional por componerse de una parte soluble en agua (40-30 %) y una parte insoluble (60-70%), suele ser utilizado en la industria como emulsificante y estabilizante de alimentos debido a que en la fase acuosa aumenta la viscosidad, y al mismo tiempo disminuye la tensión interfacial entre el aceite y el agua (Azarikia y Soleiman, 2010; Davidson, 1980), una de sus aplicaciones en productos alimenticios como polisacárido bifuncional fue realizada por Azarikia y Soleiman, 2010. El estudio de la fase continua es de suma importancia en emulsiones aceite en agua ya que si la fracción volumen de dicha fase se encuentra en mayor proporción que la fracción volumen de la fase dispersa se puede decir que cualquier alteración en las propiedades reológicas de la fase continua corresponderá a cambios en las propiedades de la emulsión final, por tal motivo, la presencia de emulsificantes y estabilizantes en ésta fase pueden o no ocasionar cambios en las propiedades reológicas y la estabilidad de la emulsión final (McClements, 1999). Por lo tanto el objetivo de este trabajo es analizar la influencia de la albúmina de huevo y la goma tragacanto a diferentes concentraciones, sobre el efecto que provocan en el comportamiento al flujo y tamaño de partícula de los sistemas acuosos así como la estabilidad de las emulsiones elaboradas a partir de estas, para así poder ampliar la aplicación industrial de ambos biopolímeros.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Emulsiones alimentarias

Una dispersión es un sistema fisicoquímico formado por dos o más sustancias. Las sustancias que forman una dispersión pueden ser de orígenes muy diversos, y según el estado de las fases (sólido, líquido o gaseoso) que forman la dispersión se encuentran diferentes tipos, los cuales se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Tipos de dispersiones (Cubero y col., 2002).

TIPO	FASE DISPERSA	FASE CONTINUA	EJEMPLO
Emulsión	Líquida	Líquida	Mayonesa, margarina
Espuma	Gaseosa	Líquida	Nata, espuma, cerveza
Suspensión	Sólida	Líquida	Paté, jugo

Dentro del campo de los alimentos una de las dispersiones que tienen mayor importancia son las emulsiones, las cuales están constituidas de dos o más líquidos inmiscibles, normalmente de naturaleza apolar (oleosa) y polar (acuosa), en la que uno de ellos se denomina fase dispersa y forma generalmente gotas de diámetro entre 0.1 y 100 micras y al líquido que rodea dichas gotas se conoce como fase continua (Figura 1) (Cubero y col., 2002).



Figura 1. Dispersión (Cubero y col., 2002).

Una emulsión es una dispersión que consiste en la unión forzada de dos fases no miscibles naturalmente, distinguiéndose una fase dispersa y una fase continua. La fase dispersa se mantiene distribuida, en forma de gotitas en la fase continua, obteniendo así una mezcla homogénea y estable entre las dos sustancias inmiscibles. Se pueden encontrar comúnmente dos tipos (Muñoz y col, 2007):

1. Emulsiones aceite en agua (O/W): son las emulsiones del tipo más común, las cuales se forman por una fase dispersa de grasa y una fase continua acuosa, algunos ejemplos son la leche, nata líquida, mayonesa, crema, helado entre otros.
2. Emulsiones agua en aceite (W/O): formadas por una fase dispersa de agua, o líquidos miscibles en ella, y una fase continua grasa, entre las que resalta la mantequilla y la margarina.

La creación de una emulsión a partir de dos fases líquidas separadas se denomina homogeneización primaria, mientras que el proceso de reducir el tamaño de las gotas en una emulsión ya existente o pre-emulsión se denomina homogeneización secundaria (Figura 2), (McClements, 1999). Para llegar a formar una emulsión se ha de aportar energía al sistema (generalmente energía mecánica), de manera que se aumente la superficie de contacto entre las dos fases (aceite y agua) y se pueda formar la zona de interfase donde se sitúan el emulsificante y el estabilizante (Cubero y col., 2002).

En las emulsiones aceite en agua es decisivo el papel de los estabilizantes y emulsificantes en la fase acuosa, ya que la adición de estos proporcionará a la emulsión determinadas características, papel que en emulsiones alimentarias lo desempeñan principalmente biopolímeros de naturaleza polisacárida o proteínica.

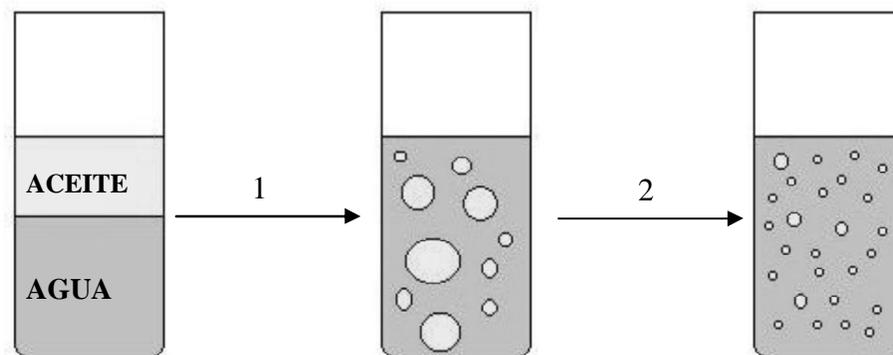


Figura 2. Homogeneización primaria (1), homogeneización secundaria (2), (McClements, 2005).

1.1.2 Emulsificantes

Los emulsificantes son moléculas anfifílicas (constan de una parte hidrófila y otra hidrófoba) a las cuales su naturaleza anfifílica les permite migrar y adsorberse rápidamente en la interfase aceite-agua, lo que conduce a una menor energía libre, es decir, a una menor tensión interfacial, favoreciendo así la formación de gotas con un menor consumo de energía, dando lugar a una emulsión (Muñoz y col., 2007).

Si los emulsificantes se adsorben lentamente o presentan baja concentración, las gotas de la emulsión comienzan a interactuar, presentándose fenómenos de inestabilidad como el fenómeno de floculación el cual predominará en emulsiones con concentración de emulsificante relativamente bajo y en emulsiones que contienen emulsificantes poliméricos con actividad superficial diferente (Dickinson, 2009).

Los emulsificantes además de facilitar la formación de las emulsiones aportan desde la interfase una cierta estabilidad física, aunque puede ser durante un tiempo corto y en ciertos casos son responsables de que la estabilidad física se prolongue durante más tiempo.

Los emulsificantes se clasifican en bajo o alto peso molecular. Como ejemplos de emulsionantes de bajo peso molecular se pueden citar los tensioactivos entre los que podemos distinguir los aniónicos, catiónicos, anfóteros (o zwitteriónicos) y los no iónicos. Pueden utilizarse sintéticos, derivados de la industria del petróleo o bien de materias primas

alternativas, como los fosfolípidos (lecitinas de soya y yema de huevo), monoglicéridos obtenidos a partir de grasas y aceites mediante interesterificación con glicerol, ésteres de sacarosa, ésteres de sorbitano, polisorbatos, entre otros. Se utilizan también ésteres de monoglicéridos con ácidos orgánicos del tipo: acético, láctico, diacetiltartárico y cítrico, con lo que se logran emulsionantes con propiedades anfifílicas diferentes a los monoglicéridos. En fase acuosa estos emulsionantes pueden formar diversas estructuras de asociación que pueden ser de naturaleza micelar e incluso líquido-cristalina. En la interfase, forman capas monomoleculares, aunque en ciertas condiciones pueden formar multicapas de naturaleza líquido-cristalina, que aumenta la viscoelasticidad de la interfase, favoreciendo el procesado y estabilidad de las emulsiones.

Entre los emulsionantes de alto peso molecular se pueden encontrar las lipoproteínas algunos polisacáridos exudados, y predominantemente las proteínas como emulsionantes macromoleculares, debido a que están presentes en cantidades significativas en materias primas naturales comestibles. Las proteínas para ejercer su función emulsionante siguen un mecanismo en tres etapas. La primera consiste en su transporte convectivo desde la fase continua a la interfase, la segunda en su adsorción en la interfase y la tercera en una reorganización de su estructura en la interfase. Además, una elevada concentración de proteínas en la interfase y en las cercanías de la misma, puede mejorar las propiedades mecánicas de la interfase y por tanto favorecer la estabilidad física de la emulsión, al mismo tiempo el exceso de concentración de proteína provocará una acumulación de la misma en la fase continua. Dichas proteínas pueden interaccionar con las adsorbidas en la interfase, provocando problemas de desestabilización o, por el contrario, haciendo posible la estabilización de la emulsión (Muñoz y col., 2007).

1.1.3 Estabilizantes

Al igual que los emulsificantes los estabilizantes son compuestos químicos de naturaleza macromolecular, la diferencia entre dichos compuestos radica en que los estabilizantes al momento de hidratarse en la fase acuosa confieren a una emulsión aceite en agua una estabilidad física durante un tiempo más prolongado. La estabilidad de la emulsión se

consigue restringiendo la movilidad de las gotas de la fase dispersa, gracias al aumento de viscosidad en la fase continua.

Los biopolímeros usados para estabilizar emulsiones alimentarias aceite en agua son mayoritariamente hidrocoloides de naturaleza polisacárida, los cuales se clasifican en naturales, semisintéticos y sintéticos, esta cualidad se atribuye a que proporcionan una alta viscosidad en la fase acuosa retardando los fenómenos de inestabilidad. Otro tipo de biopolímeros con los que se logra la estabilidad son las proteínas, las cuales poseen una fuerte tendencia a adsorberse en la interfase aceite-agua y son capaces de establecer capas estabilizadoras alrededor de los glóbulos de aceite, de tal manera que actúan como emulsificantes y estabilizantes a la vez (Muñoz y col., 2007).

1.1.4 Estabilidad de emulsiones

El término de estabilidad de emulsiones hace referencia a la habilidad que tienen las emulsiones para resistir cambios en sus propiedades con respecto al tiempo, por tanto la emulsión que presente menos cambios en sus propiedades será más estable.

Una emulsión puede ser desestabilizada debido a diferentes procesos tanto químicos como físicos. La inestabilidad física resulta de una alteración en la distribución espacial u organización estructural de las moléculas, mientras que la inestabilidad química está dada por una alteración en el tipo de moléculas presentes en la emulsión.

Existen dos formas de considerar la estabilidad en emulsiones, entre las cuales se encuentra la estabilidad termodinámica y la estabilidad cinética. La estabilidad termodinámica indica si un proceso determinado ocurrirá, mientras que la estabilidad cinética establece la velocidad en que ocurrirá dicho proceso (McClements, 2005).

Estabilidad termodinámica

La inestabilidad termodinámica que se da en una emulsión es fácilmente demostrada, si se agita un envase con aceite y agua se logran observar cambios en la apariencia del sistema con el paso del tiempo (Figura 3). La emulsión opaca que se observa inicialmente se forma por la

agitación de la mezcla, la cual se descompone o rompe con el paso del tiempo hasta que se observa una capa de aceite en la parte superior a la capa de agua.

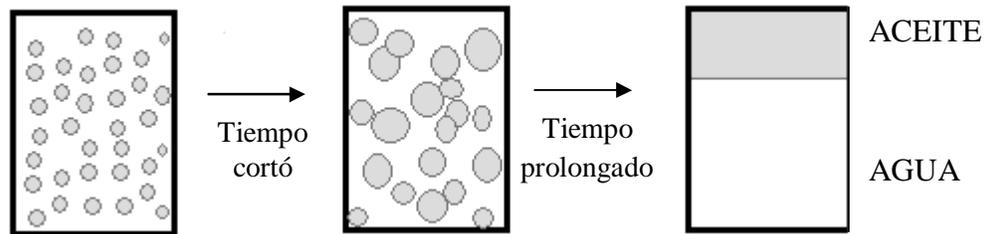


Figura 3. Inestabilidad termodinámica (McClements, 1999).

El origen de esta inestabilidad se debe a un cambio en la energía libre del sistema antes y después de la emulsión. Este cambio en la energía libre interfacial que se presenta en el sistema al inicio y al final de la emulsión ($\Delta G_{\text{formación}}$) es igual al incremento en el área de contacto entre las fases aceite y agua (ΔA) multiplicado por la tensión interfacial (γ) (Ecuación 1).

$$\Delta G_{\text{formación}} = \gamma \Delta A \quad (1)$$

$\Delta G_{\text{formación}}$ = Energía libre interfacial

γ = Tensión interfacial

ΔA = Diferencia de área entre las fases aceite y agua

Este cambio en la energía libre determina si una emulsión es o no termodinámicamente estable, pero no proporciona ninguna información sobre la velocidad con la que se producen los cambios en las propiedades de la emulsión (McClements, 1999).

Estabilidad cinética

Para la ciencia de los alimentos es importante conocer el tiempo en que una emulsión es estable, ya que se necesitan crear alimentos que mantengan propiedades deseables por un largo tiempo a pesar de los cambios en las condiciones ambientales, lo que se conoce como vida de

anaquel. Por esta razón los investigadores están más interesados en la estabilidad cinética de las emulsiones que en la estabilidad termodinámica.

La estabilidad cinética de una emulsión se puede entender haciendo referencia a su naturaleza dinámica. Las gotas en una emulsión están en continuo movimiento y con frecuencia chocan unas con otras, debido al movimiento Browniano, fuerza de gravedad, o por fuerzas aplicadas externamente. Si estas gotas después de la colisión se separan, permanecen estrechamente asociadas o se fusionan, dependerá de la naturaleza de las interacciones entre ellas.

Por tanto, la estabilidad cinética de una emulsión se determinará por la dinámica e interacciones entre las gotas que tengan contacto. Aunque las emulsiones alimentarias son termodinámicamente inestables muchas de ellas presentan estabilidad cinética. Una emulsión que tiene pequeños glóbulos de grasa generalmente tiene mayor estabilidad cinética, por tanto, una vida de anaquel mayor que aquella que tiene mayor tamaño de partícula (McClements, 2005).

1.1.5 Fenómenos de inestabilidad de emulsiones

Desde el momento en que se forma una emulsión comienza el fenómeno de inestabilidad, el cual tiende a disminuir el área interfacial y llegar al estado termodinámico más estable, las fases separadas (inestabilidad termodinámica). Existen distintos fenómenos de inestabilidad que afectan a las emulsiones, los cuales están basados en la interacción coloidal que existe entre las partículas y la diferencia de densidades entre la fase continua y la dispersa, en otras palabras, las fuerzas atractivas (fuerzas de van der Waals) tenderán a inestabilizar la emulsión, mientras que las fuerzas de repulsión darán como resultado emulsiones estables al mantener separados los glóbulos.

En el caso particular de las emulsiones alimenticias, los cambios producidos por la inestabilidad deben controlarse para que las características de la emulsión se mantengan dentro de un intervalo de valores estrechos, fuera del cual ya no sería posible su utilización o comercialización.

Los principales fenómenos de inestabilidad que afectan las emulsiones son la migración de las partículas (cremado, sedimentación) y la variación de tamaño de partícula (coalescencia, floculación) esto fenómenos de inestabilidad se presentan en la Figura 4 (Charambolous y Doxastakis, 1989).

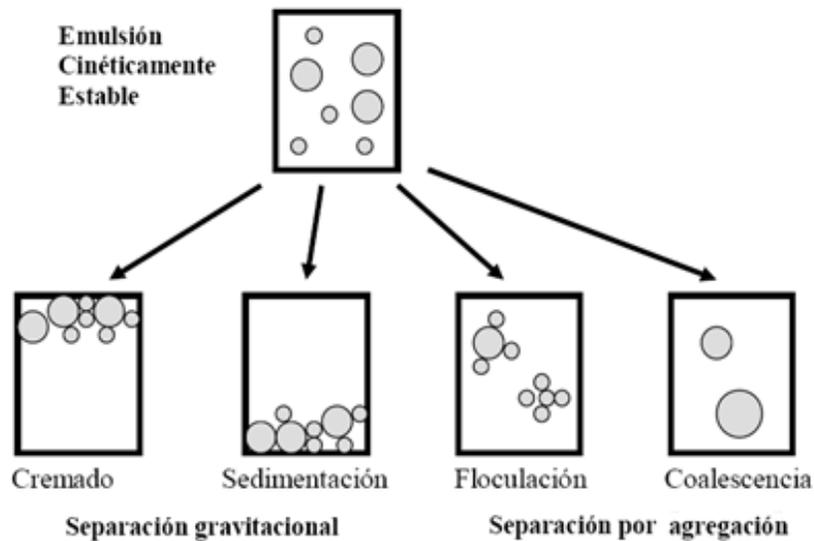


Figura 4. Fenómenos de inestabilidad (McClements, 1999).

Cremado y sedimentación

En general las gotas de una emulsión tienen diferente densidad a la del líquido que las rodea, y si estas gotas tienen una densidad menor a la del líquido, tienden a moverse hacia arriba haciendo referencia al cremado como se muestra en la Figura 5, en cambio, si la densidad es mayor que la del líquido, tenderán a moverse hacia abajo dando lugar a la sedimentación. Por tanto, las gotas en una emulsión aceite-agua tenderán al cremado y en cambio emulsiones agua-aceite tenderán a sedimentar (McClements, 1999).

Los factores que se relacionan con la migración de partículas están considerados en la ley de Stokes la cual se describe por medio de la ecuación de la velocidad de separación de fases, en donde la velocidad con la que partículas esféricas aisladas creman en un líquido ideal es determinado por un balance de fuerzas que actúan sobre ellas. Cuando una partícula tiene

menor densidad que el líquido que la rodea, una fuerza de gravedad la obliga a moverse hacia arriba (Ecuación 2):

$$F_g = -\frac{3}{4} \pi r^3 (\rho_2 - \rho_1) g \quad (2)$$

Donde:

F_g = Fuerza de gravedad.

r = Radio de la partícula.

g = Aceleración de la gravedad.

ρ_1 y ρ_2 = Densidad de fase continua y fase dispersa, respectivamente.

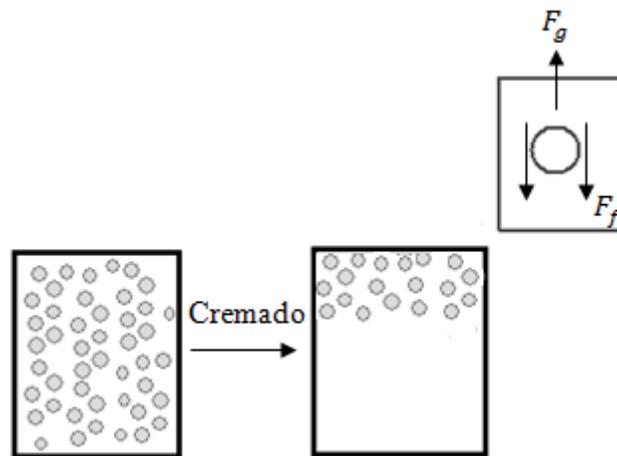


Figura 5. Cremado (McClements, 1999).

Como las partículas se mueven hacia arriba a través del líquido, estas experimentan una fuerza de fricción hidrodinámica que actúa en dirección opuesta (Ecuación 3), por lo tanto retrasa dicho movimiento.

$$F_f = 6 \pi \eta_1 r v c \quad (3)$$

Donde:

F_f = Fuerza de fricción.

v_c = Velocidad de cremado.

η = Viscosidad del fluido.

r = Radio.

La ecuación de la ley de Stokes para la velocidad de cremado para partículas esféricas en un líquido es la siguiente:

$$v_{stokes} = - \frac{2gr^2(\rho_2 - \rho_1)}{9\eta_1} \quad (4)$$

La Ecuación 4 predice el comportamiento de las partículas durante el cremado como un sistema ideal, ya que siempre considera a las esferas como homogéneas y no toma en cuenta a los agregados, que de encontrarse presentes aumentan la velocidad de cremado, asume además que la fase continua presentará una viscosidad newtoniana, lo cual es falso en algunos casos, el signo de v representado en la ecuación 4 determina si las partículas tienden a moverse hacia arriba (+) o hacia abajo (-)(Fennema, 1996).

Floculación

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

La floculación es el proceso mediante el cual dos o más gotitas se mantienen juntas, sin entrar en contacto íntimo, separándose por una capa de surfactante o polímero. El proceso de la floculación está controlado por un equilibrio global entre las fuerzas de atracción electrostáticas de van der Waals, y repulsivas de tipo estéricas y de hidratación (McClements, 1999).

A medida que avanza el proceso de floculación, va disminuyendo el número de partículas en la emulsión. La floculación acelera la velocidad de separación gravitacional en emulsiones diluidas, lo cual es indeseable ya que reduce la vida útil de las mismas, y causa a la vez, un incremento en la viscosidad de las emulsiones, con lo cual se puede conducir a la formación de un gel (McClements, 1999).

La floculación se puede prevenir elaborando emulsiones en las cuales las interacciones repulsivas entre las partículas sean más significativas que las interacciones atractivas. Las diferentes interacciones que se presenten entre las partículas dependerán de los ingredientes que conformen la emulsión, su microestructura y las condiciones ambientales a las que se encuentre. Para controlar la floculación en un sistema en particular, es necesario identificar el tipo de interacción entre los coloides presentes. Las interacciones más comunes que se pueden presentar entre coloides se describen a continuación (McClements, 1999):

1. Floculación por puenteo: Muchos biopolímeros promueven la floculación por medio de la formación de puentes entre dos o más partículas. Los biopolímeros pueden adsorberse directamente a la superficie libre de las gotas o adsorberse al emulsificante formando una membrana interfacial. Para ser capaces de unirse a la gotas, las interacciones atractivas entre el biopolímero y la superficie de la gotas deben de ser lo suficientemente fuertes.

Cuando un biopolímero contiene residuos no polares a lo largo de su estructura, uno de estos residuos tenderá a asociarse con la parte hidrofóbica de alguna gota, mientras que el resto de residuos se asociarán con la parte hidrofóbica de otra gota. Un ejemplo de este tipo de floculación ocurre cuando un biopolímero es utilizado como emulsificante y no es suficiente para cubrir por completo la interfase formada entre el aceite y el agua, en este caso, el fenómeno se puede prevenir utilizando una concentración de biopolímero lo suficientemente grande en la fase continua antes de la homogenización.

2. Floculación por agotamiento: La presencia de partículas coloidales como biopolímeros y surfactantes en la fase continua de una emulsión causa un incremento en las fuerzas atractivas entre las gotas debido a un efecto osmótico asociado con la exclusión de biopolímero de una región estrecha que rodea y separa a cada gota. Esta fuerza de

atracción incrementa conforme la concentración de las partículas coloidales aumenta, hasta que finalmente la concentración puede ser lo suficientemente grande como para superar las interacciones de repulsión entre las gotas y ocasionar que el sistema flocule. La velocidad de floculación incrementa conforme la concentración de las partículas coloidales es mayor debido a la atracción entre las gotas. Una vez que la concentración de las partículas coloidales excede una determinada concentración, la velocidad de floculación disminuye debido a que la viscosidad de la fase continua aumenta ocasionando que el movimiento de las gotas se vea restringido.

En general este proceso puede ser reversible tras el aporte de energía en menor cantidad que la que fue requerida para dispersar los glóbulos en la emulsión inicial (McClements, 1999).

Coalescencia

La coalescencia es un proceso irreversible mediante el cual dos o más gotas de líquido se unen íntimamente con el fin de formar una gota más grande (Figura 6), este proceso es el motivo por el cual las gotas de la emulsión creman o sedimentan más rápido debido al incremento en su tamaño. En emulsiones aceite en agua la coalescencia eventualmente lleva a la formación de una capa de aceite en la parte superior del material, conduciendo así a la separación de las fases del sistema.

La velocidad con la que ocurre la coalescencia depende de la estructura y la dinámica que se llevaba a cabo en la membrana interfacial que rodea las gotas. El método más apropiado para controlar la coalescencia está ligado con el tipo de emulsificante usado para estabilizar la emulsión (McClements, 1999).

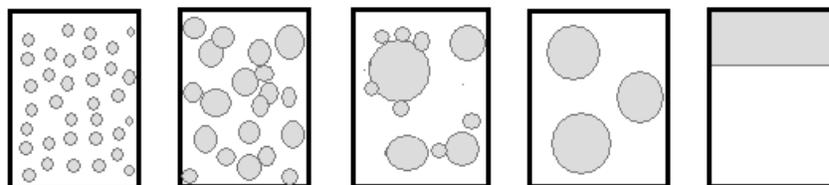


Figura 6. Coalescencia (McClements, 1999).

1.2 Biopolímeros en emulsiones

Las proteínas y polisacáridos son componentes indispensables en la gran mayoría de las emulsiones alimenticias, debido a que pueden emulsificar una fase de aceite en agua y estabilizarla al mismo tiempo. Es necesario conocer el tipo de biopolímero utilizado en las dispersiones ya que de él dependerá la formación y estabilidad de la emulsión final.

Como se sabe, las dispersiones son por naturaleza sistemas inestables debido al área interfacial tan grande que presentan, la estabilidad de estos sistemas dispersos se atribuye generalmente a una capa interfacial que rodea las gotas presentes en la emulsión para impedir su fusión con otras, las propiedades de esta capa interfacial son gobernadas por la composición y estructura del material que la absorbe y rodea, el cual determinará las propiedades de la dispersión, por tal motivo es de suma importancia conocer el tipo de biopolímero utilizado en las emulsiones (Rodríguez y Pilosof, 2011).

1.2.1 Proteína: Albúmina de huevo

Dentro de las proteínas de origen animal destaca la albúmina de huevo que es una proteína que se obtiene del huevo fresco de gallina por remoción del cascarón, yema y membranas, está conformada por proteínas y glucoproteínas, hidratos de carbono, residuos lipídicos y sales minerales.

Las proteínas son conocidas por su actividad como emulsificantes y estabilizantes a corto plazo, por tal motivo juegan un papel muy importante en la formación y estabilización de emulsiones, la aplicación de albúmina de huevo en sistemas alimenticios, ha sido fundamentalmente en la elaboración de espumas, ya que es una de sus principales propiedades funcionales, sin embargo, existen diferentes emulsiones alimenticias en las cuales se ha utilizado dicha proteína como agente emulsificante, algunos ejemplos que podemos encontrar son la mayonesa y los aderezos (McClements, 2005).

Investigaciones realizadas por Drakos y Kiosseoglou (2008) tuvieron como objetivo analizar el papel de las proteínas de clara de huevo sobre la estabilidad en emulsiones aceite en agua elaboradas a base de yema de huevo, encontrando que las proteínas de la albúmina pueden

llegar a interactuar con las lipoproteínas de la yema, y postulan que el exceso en la concentración de albúmina utilizada (2.5% o más) favoreció el fenómeno de floculación inestabilizando las emulsiones. Además, revisiones realizadas por Mine (1995) afirman que la albúmina de huevo puede ser utilizada en la industria de los alimentos como emulsificante en presencia de lípidos y carbohidratos.

La albúmina de huevo contiene alrededor de 40 proteínas diferentes, su mayoría son solubles, globulares y glicoproteínas y solo el 2% es insoluble. Del total de las proteínas de la clara, la ovoalbúmina constituye más del 50%, seguida por la ovotransferina con 12 a 15% y ovomucoide con 11%, las cuales se describen a continuación (Badui, 2006; Moreno, 1995):

- **Ovoalbúmina:** Esta es la proteína más abundante en la albúmina 54-58% con un peso molecular de 45 000 a 46 000 daltones, es una proteína globular, clasificada como una fosfoglicoproteína ya que está compuesta por carbohidratos, fósforo y proteínas, tiene solo una cadena de carbohidratos formada por D-manosa y N-acetilglucosamina unido a una asparagina.

La ovoalbúmina existe en tres formas A1, A2, A3 y cada una se diferencia por la cantidad de fosfatos. El fosfato en las moléculas de ovoalbúmina se encuentra esterificado en la serina. La desnaturalización de la ovoalbúmina es fácil de obtener por no presentar muchos enlaces cruzados, por ejemplo, por agitación o batido.

- **Ovotransferina:** Es una glucoproteína, la segunda proteína en orden de importancia se puede clasificar en un grupo de proteínas ligadoras de metales, tiene un peso molecular entre 76 000 y 80 000 daltones, y se completa con dos elementos de hierro por molécula. Es más sensible al calor que la ovoalbúmina, pero menos susceptible a la desnaturalización por agitación.
- **Ovomucoide:** Se diferencia de las demás al ser extremadamente larga, por lo cual se presenta en forma de fibras microscópicas que dan a la clara su textura de gel; esta proteína es relativamente estable a la coagulación por calor.

1.2.2 Polisacárido: Goma tragacanto

La estabilidad a largo plazo en emulsiones puede lograrse usando polisacáridos con los cuales se controla la reología y estructura de la fase continua, permitiendo que dicha fase retarde su separación inducida por la fuerza de gravedad (cremado).

La goma tragacanto es un exudado de las plantas del género *Astragalus*, familia de las leguminosas; se encuentra en la naturaleza como una mezcla compleja de polisacáridos, que al mismo tiempo contiene sales como potasio, magnesio y calcio. Se caracteriza por su alto peso molecular y por presentar una alta viscosidad a bajas concentraciones. Por esta razón se utiliza en la industria para elaborar emulsiones, suspensiones, adhesivos, y al mismo tiempo brindar aplicaciones en confitería y panadería (Davidson, 1980; Graham, 1997). Es un polisacárido que presenta doble funcionalidad ya que en la fase acuosa aumenta la viscosidad y al mismo tiempo disminuye la tensión interfacial entre el aceite y el agua. Es uno de los emulsificantes naturales más usados en la industria, una de sus aplicaciones como polisacárido bifuncional fue realizada por Azarikia y Soleiman (2010) en productos alimenticios.

Varios investigadores consideran que la goma tragacanto se conforma por lo menos de dos componentes básicos, una parte que es insoluble en agua conocida como basorina la cual constituye entre el 60 y 70% de la goma y tiene la capacidad de hincharse, y la tragacantina, un hidrosol soluble en agua dando en conjunto un peso molecular de 840 000 Daltones. La parte insoluble en agua (basorina) contiene un polímero ácido de tragacantina y cantidades pequeñas de ácido urónico, contrariamente con la parte insoluble que contiene ácido urónico como componente mayoritario. La fácil separación de tragacantina y basorina sugiere que los polisacáridos están mezclados físicamente y no químicamente (Balaghi y col., 2011; Badui, 2006; Chenlo y col., 2010; Davidson, 1980).

1.2.3 Interacción de biopolímeros

Las proteínas y los polisacáridos son biopolímeros naturales que se usan como ingredientes funcionales en la industria farmacéutica y alimenticia, cuando se mezclan proteínas y polisacáridos se pueden utilizar en la industria alimentaria para procesar dispersiones. Los sistemas que contienen simultáneamente proteínas y polisacáridos son muy complejos y las

situaciones de estabilidad-inestabilidad dependerán del tipo de interacciones que estos biopolímeros tengan entre sí.

La mezcla de biopolímeros puede ocasionar interacciones a nivel molecular, enlaces covalentes, enlaces iónicos, puentes de hidrógeno, interacciones hidrófobas, interacciones de van der Waals y algunas de estas interacciones dependerán del tipo de biopolímero utilizado. En general, al mezclar biopolímeros se pueden presentar las siguientes interacciones (Dickinson, 1990):

1. Interacciones fuertes: La proteína y el polisacárido sufren una gran atracción.
 - a) Ambos biopolímeros están dispersos en todo el sistema al ser solubles (Figura 7a).
 - b) Ambos biopolímeros precipitan al no ser solubles en el sistema (Figura 7b).
2. Interacciones débiles: La atracción entre la proteína y el polisacárido es relativamente débil y se encuentran dispersos en el sistema (Figura 7c).
3. Sin interacciones: En este caso la interacción proteína-polisacárido es nula (Figura 7d).

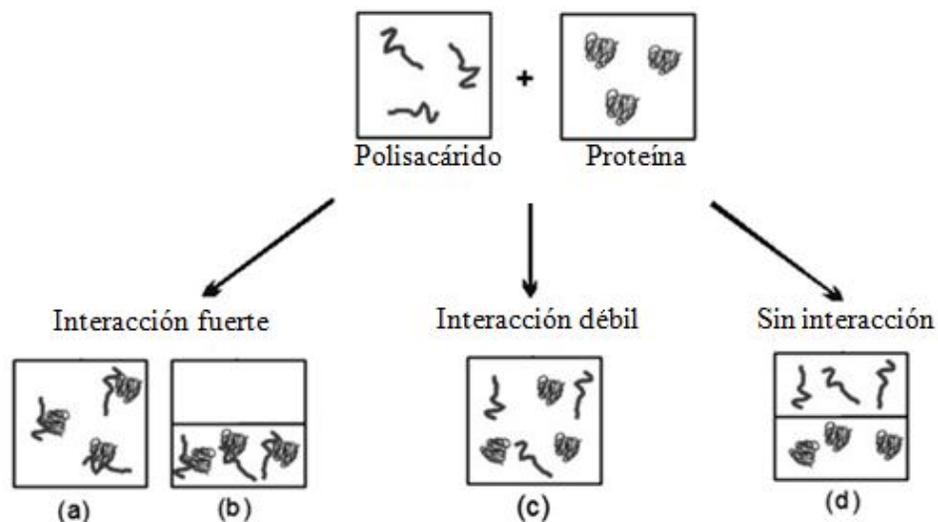


Figura 7. Comportamiento de la mezcla proteína-polisacárido (Dickinson, 1990).

La diferencia entre los sistemas acuosos que contiene la mezcla de biopolímeros (Figura 7b y Figura 7d) reside en que en los distintos sistemas, los biopolímeros están concentrados juntos en una fase inferior (b) o en diferentes fases (d), entonces las soluciones acuosas de mezclas

de biopolímeros son susceptibles a la separación de fases por dos de los siguientes mecanismos: coacervación compleja o incompatibilidad termodinámica, los cuales se describen a continuación (Rodríguez y Pilosof, 2011).

- 1) **Coacervación compleja:** La coacervación compleja es una separación espontánea de un sistema en dos fases líquidas. La fase más concentrada en biopolímeros es el coacervado y la otra fase es la solución en equilibrio. La separación de fase asociativa de dos polímeros en agua ocurre si existe una fuerte atracción electrostática. La coacervación compleja es causada por la interacción de dos biopolímeros con cargas opuestas y se origina a pH por debajo del punto isoeléctrico de la proteína y especialmente a bajas fuerzas iónicas.
- 2) **Incompatibilidad termodinámica:** En el fenómeno de incompatibilidad termodinámica existe una separación espontánea en dos fases también pero en este caso, una es predominantemente rica en proteína y la otra rica en polisacárido. La incompatibilidad de los biopolímeros depende de la intensidad de las interacciones entre ellos, entre las moléculas de cada uno consigo mismas y con el solvente y se origina bajo ciertas condiciones, las cuales inhiben la formación de complejos entre biopolímeros. A una concentración total de biopolímero moderada, la separación del sistema en dos fases depende de la carga del biopolímero, del pH y la fuerza iónica. La incompatibilidad se favorece a alta fuerza iónica y/o a valores de pH mayores que el punto isoeléctrico de la proteína.

1.3 Reología de fluidos

La vida de anaquel de muchas emulsiones alimentarias depende de las características reológicas de las fases que la componen (McClements, 1999), por esto es importante estudiar el comportamiento al flujo de los alimentos ya que es una propiedad no sólo esencial en la ingeniería de proceso para el cálculo y diseño de las correspondientes operaciones, sino que también es de interés en otras aplicaciones como son el control de calidad, la evaluación sensorial y la determinación de la estructura microscópica de los alimentos (Aguado, 2003).

La reología se define como la ciencia que estudia el comportamiento y la deformación de la materia en general, cuando la materia se encuentra sometida a la acción de fuerzas externas se pueden presentar diferentes comportamientos:

- Comportamiento elástico: La aplicación de fuerzas externas provoca una deformación y un cambio de volumen de la materia, estas transformaciones son reversibles, puesto que cuando las fuerzas externas dejan de actuar, el sistema recupera su forma y la energía acumulada se retorna en trabajo.
- Comportamiento viscoso: La materia se deforma bajo la acción de fuerzas externas, pero el trabajo realizado se disipa en forma de calor, por ello cuando dichas fuerzas cesan, el estado de deformación permanece.

Estos diferentes comportamientos pueden ser definidos por ecuaciones reológicas, para los sólidos la ley de Hooke y para los fluidos, la Ley de la viscosidad de Newton. En esta investigación se estudió el comportamiento reológico únicamente para fluidos, por lo que solamente dichos comportamientos se describen a continuación:

1.3.1 Fluidos newtonianos

Los fluidos newtonianos son aquellos en los que el esfuerzo aplicado y la deformación producida son proporcionales (Figura 8) y la constante de proporcionalidad se define como la viscosidad del fluido (viscosidad absoluta), por lo tanto a esta relación lineal se le conoce como Ley de la viscosidad de Newton (Ecuación 5) (Steffe, 1996).

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \dots \quad (5)$$

Donde:

η = Viscosidad del fluido (propiedad que depende de la naturaleza, estado físico y temperatura del mismo)

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de cizalla

σ = Esfuerzo de cizalla

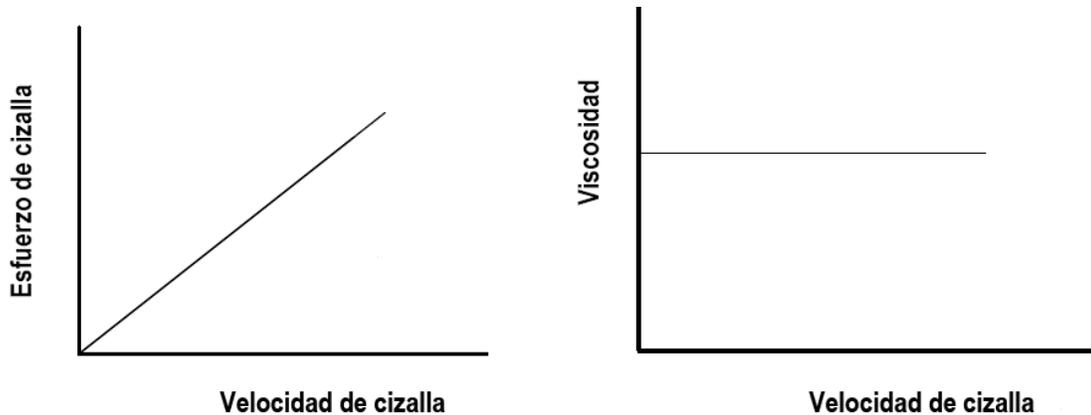


Figura 8. Representación gráfica del comportamiento reológico newtoniano (adaptado de Steffe, 1996).

1.3.2 Fluidos no newtonianos.

Los fluidos no newtonianos no se ajustan a la ley de viscosidad de Newton, ya que para ellos no se puede utilizar el término de viscosidad absoluta porque no se mantiene constante en función de la velocidad de cizalla aplicada, por tanto se utiliza el concepto de viscosidad aparente.

Estos fluidos tienen un comportamiento reológico distinto a los fluidos newtonianos debido a su complejidad a nivel microscópico, ya que suelen ser de naturaleza polimérica o están constituidos por dispersiones de partículas sólidas en el seno de un líquido.

El comportamiento al flujo de estos materiales puede depender sólo de la velocidad de cizalla (fluidos independientes del tiempo) o puede depender de la duración del cizallamiento (fluidos dependientes del tiempo) (Hermida, 2000; Steffe, 1996).

En el Cuadro 2 se muestra en forma general la clasificación de los fluidos no newtonianos, mientras que en el Cuadro 3 se presentan algunos de los modelos matemáticos que describen a los fluidos mencionados.

Cuadro 2. Clasificación de los fluidos no newtonianos (Hermida, 2000).

GRUPO	DENOMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Fluidos independientes del tiempo	Pseudoplástico	La viscosidad aparente disminuye con el aumento de la velocidad de cizalla
	Dilatante	La viscosidad aparente aumenta con la velocidad de cizalla
	Plásticos	Presenta un límite $\sigma = \sigma_0$ por debajo del cual no se presenta flujo.
Fluidos dependientes del tiempo	Tixotrópicos	La viscosidad aparente disminuye con el tiempo de aplicación de la velocidad de cizalla.
	Antitixotrópicos	La viscosidad aparente aumenta con el tiempo de aplicación de la velocidad de cizalla

Cuadro 3. Modelos matemáticos que describen a los fluidos no newtonianos (adaptado de Hermida, 2000 y Steffe, 1996)

FLUIDOS		MODELO	ECUACIÓN MATEMÁTICA
Fluidos independientes del tiempo	Sin esfuerzo inicial	Pseudoplástico	Potencia $\sigma = k\dot{\gamma}^n \quad n < 1$
		Dilatante	Potencia $\sigma = k\dot{\gamma}^n \quad n > 1$
	Con esfuerzo inicial	Plástico de Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \eta_p \dot{\gamma}$
		Herschel-Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + k\dot{\gamma}^n$
		Carreau	$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{(1 + (a\dot{\gamma})^2)^k}$
	<p>Donde:</p> <p>K = índice de consistencia ((Pa sⁿ) σ_0 = esfuerzo inicial (Pa) η_p = viscosidad plástica (Pa s) η = Viscosidad newtoniana (Pa s) η_0 = viscosidad newtoniana a valores de velocidad bajos (Pa s) a = constante de Carreau $\dot{\gamma}$ = velocidad de cizalla (1/s)</p>		

Fluidos independientes del tiempo

Muchos sistemas dispersos pueden mostrar comportamientos reológicos distintos y viscosidades aparentes diferentes al modelo newtoniano, tal como se muestra en la Figura 9.

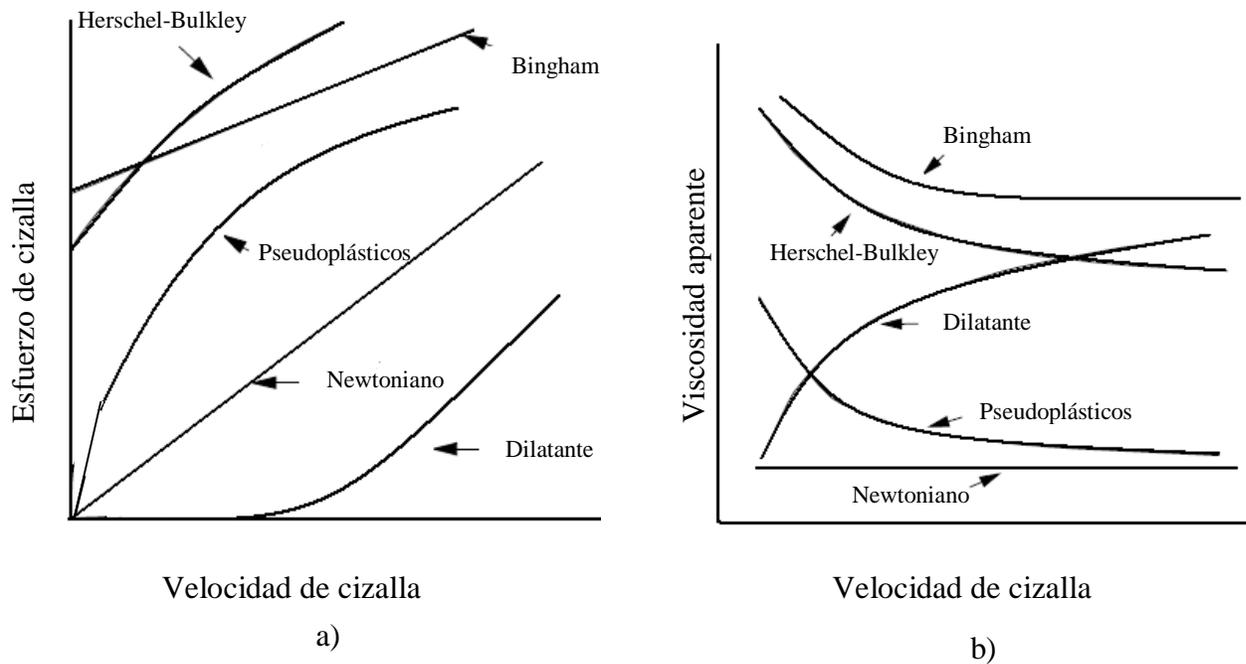


Figura 9. Curva de los distintos comportamientos reológicos, a) Esfuerzo de cizalla en función velocidad de cizalla, b) Viscosidad aparente en función velocidad de cizalla (Steffe, 1996).

Los modelos matemáticos que describen los tipos de comportamiento reológico más comunes en fluidos independientes del tiempo se tratan a continuación:

Fluidos sin esfuerzo inicial

Fluidificantes

Los fluidos fluidificantes son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de cizallamiento que cuando se les aplica un cizallamiento lento, la viscosidad aparente depende de la velocidad de cizalla, pero no del tiempo en que están sometidos a dicha velocidad, en

estos casos la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de cizalla (Figura 10). La ecuación reológica que se utiliza para describir el comportamiento es el de Ostwald de Waele, mejor conocido como ley de la potencia (Cuadro 3).

Espesantes

Los fluidos espesantes son similares a los fluidificantes, solo que la viscosidad aparente para estos materiales aumenta con respecto al incremento de la velocidad de cizalla (Figura 10). Este tipo de comportamientos es poco frecuente, presentándose en suspensiones con una elevada concentración de sólidos.

Tanto fluidos espesantes como fluidificantes pueden ser descritos por la misma ecuación reológica. Para los fluidos fluidificantes se cumple que $n < 1$ mientras que $n > 1$ ocurre para los espesantes.

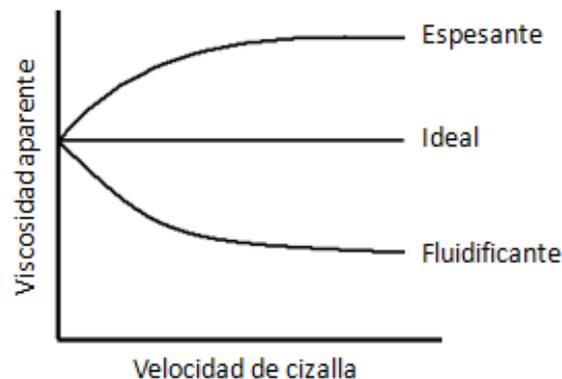


Figura 10. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla en líquidos ideales y no ideales (adaptado de McClements, 1999 y Steffe, 1996).

Fluidos con esfuerzo inicial

Plásticos

Son fluidos conocidos como plásticos de Bingham, su ecuación matemática (Cuadro 3) describe su comportamiento, donde requieren la aplicación de un esfuerzo mínimo antes de

empezar a fluir (σ_0), una vez iniciado el flujo, el comportamiento es característico de un fluido newtoniano.

Herschel-Bulkley

Son aquellos fluidos en los que no existe una relación lineal entre el esfuerzo y la velocidad de cizalla después de haber superado el esfuerzo inicial, su índice al comportamiento al flujo está comprendido entre 0 y 1 (Hermida, 2000 y Steffe, 1996).

Carreau

Los fluidos que se describen por el comportamiento de Carreau son aquellos cuya viscosidad a valores de velocidad de cizalla relativamente bajas, puede considerarse constante e independiente de la velocidad de deformación, es decir, muestra un comportamiento newtoniano. Para valores de velocidad de cizalla intermedios, presenta un comportamiento altamente fluidificante caracterizado por el modelo de ley de potencia y para valores de velocidad de cizalla relativamente altos, el comportamiento vuelve a ser newtoniano, la ecuación que describe su comportamiento se presenta en el Cuadro 3 (Méndez y col., 2010).

Fluidos dependientes del tiempo

La viscosidad aparente y el comportamiento reológico de algunos fluidos no sólo dependen de la velocidad de cizalla sino también del tiempo en el que se mantiene el esfuerzo de cizalla (Figura 11). Dichos fluidos presentan la característica común de modificación progresiva de su estructura por aplicación de un esfuerzo, entendiendo dicha modificación en el sentido de destrucción-regeneración y uno de esos sentidos puede ser predominante, dentro de ellos difieren dos grupos:

Fluidos tixotrópicos

En este comportamiento la viscosidad aparente disminuye al aumentar el tiempo de cizalla (Figura 11) hasta un punto en el cual la viscosidad aparente permanece constante. La

tixotropía es un fenómeno reversible, es decir una vez que el material permanece en reposo gradualmente reconstruye su estructura.

Fluidos antitixotrópicos

El comportamiento antitixotrópico muestra un incremento de la viscosidad aparente con respecto al tiempo (Figura 11). La estructura temporal de estos materiales se reorganiza con la deformación, presentando mayor resistencia a medida que aumenta la deformación y volviendo a desorganizarse cuando se deja en reposo (Hermida, 2000 y Steffe, 1996).

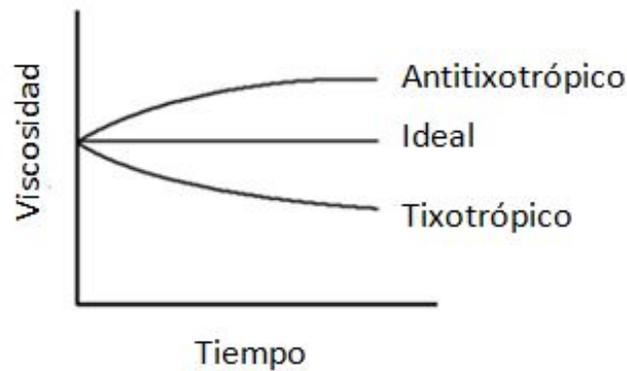


Figura 11. Viscosidad de fluidos dependientes del tiempo (McClements, 1999)

1.4 Reología de emulsiones

La medición del comportamiento reológico se usa frecuentemente por investigadores como una herramienta analítica para proporcionar información fundamental sobre la organización estructural y las interacciones que existen entre los componentes que forman una emulsión. Por ejemplo, mediciones de viscosidad en función de la velocidad de cizalla pueden proporcionar información sobre la fuerza de interacción coloidal que hay entre los glóbulos de aceite (Figura 12).

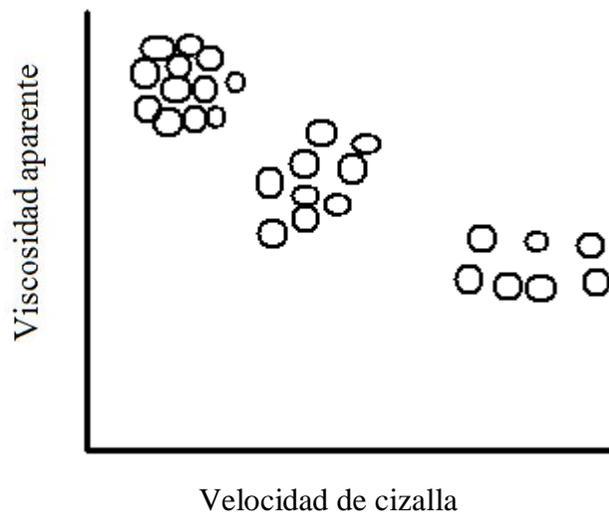


Figura 12. Comportamiento de las partículas al evaluar la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla (McClements, 1999).

Las emulsiones alimentarias están compuestas por materiales complejos que pueden exhibir gran variedad de comportamientos reológicos: desde fluidos de baja viscosidad hasta viscoelásticos con comportamiento sólido. El comportamiento reológico de un alimento en particular depende del tipo y la concentración de los ingredientes que contiene, así como del proceso y las condiciones de almacenamiento a las cuales se somete (McClements, 2005; Dickinson, 1998).

1.4.1 Fracción volumen

Uno de los principales factores que afectan la reología de las emulsiones es el arreglo entre las partículas que conforman dicho sistema, ya que la dependencia de la viscosidad con respecto a la fracción volumen, ϕ , estará determinada principalmente por las interacciones coloidales entre las gotas. Dependiendo de la fracción volumen que predomine en el sistema se pueden encontrar las siguientes clasificaciones (McClements, 2005).

1. Sistemas diluidos ($\phi < 0.05$): Las partículas se encuentran suficientemente separadas por lo que no interactúan entre ellas y su movimiento está determinado sólo por fuerzas brownianas (Figura 13a). Las emulsiones son fluidos con viscosidad relativamente baja, por lo que la viscosidad en sistemas diluidos será directamente proporcional a la viscosidad de la fase continua y por lo tanto cualquier alteración en la reología de dicha fase se verá reflejada en la reología de la emulsión final.
2. Sistemas concentrados ($0.05 < \phi < 0.49$): Las partículas interactúan apreciablemente entre ellas a través de interacciones hidrodinámicas y colisiones de partículas, lo cual impide su movimiento (Figura 13b). La emulsión es todavía fluida pero cuando aumenta su concentración de partículas su viscosidad también incrementa.
3. Sistemas parcialmente cristalinos ($0.49 < \phi < 0.54$): Las partículas están separadas en dos distintas fases, una fase cristalina que consiste en agregados muy estrechos de partículas y una fase fluida con agregados de partículas que se mueven libremente (Figura 13c).
4. Sistemas vítreos ($0.58 < \phi < 0.64$): El movimiento de las partículas está severamente restringido al estrecho acercamiento entre éstas, las cuales se consideran atrapadas en redes y pueden presentar movimiento vibratorio pero no pasar libremente entre ellas. Estas emulsiones presentan un comportamiento tanto sólido como fluido, actuando como sólido a bajos esfuerzos de cizalla y como fluido una vez que la cedencia crítica del esfuerzo ha sido superada.
5. Sistemas cristalinos ($\phi > 0.64$): Las partículas están agregadas tan estrechamente entre ellas que no pueden tener movimiento vibracional ni traslacional. Este tipo de dispersiones se comportan como un sólido elástico.

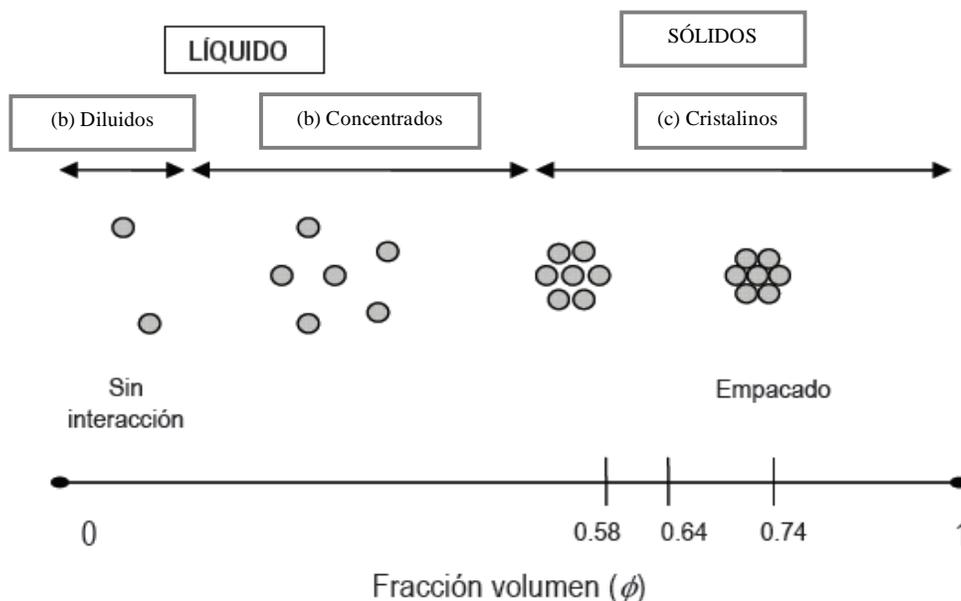


Figura 13. Arreglo de las partículas respecto a la fracción volumen (McClements, 2005).

1.4.2 Tamaño de partícula

Muchas propiedades de las emulsiones alimenticias se determinan por el tamaño de las gotas que contienen, si todas las gotas de la emulsión tienen el mismo tamaño se hace referencia a emulsiones monodispersas, en cambio, si existe una diferencia en el tamaño se conoce como una emulsión polidispersa. El tamaño del glóbulo de aceite obtenido es sumamente importante para las propiedades de la emulsión con respecto a la estabilidad (vida de anaquel) ya que puede causar la separación por floculación o coalescencia. Así mismo, la influencia del tamaño y distribución de los glóbulos sobre la reología de la emulsión depende de la fracción volumen de la fase dispersa y de la naturaleza de las interacciones coloidales. En consecuencia, las dispersiones de glóbulos grandes se agregan a menor velocidad que los glóbulos pequeños, dando lugar a un comportamiento tixotrópico más marcado en las dispersiones de glóbulos más pequeños.

En ausencia de interacciones coloidales apreciables, el tamaño de glóbulo altera la reología debido a su influencia sobre la movilidad browniana y los efectos del esfuerzo de cizalla, esto es sólo apreciable en emulsiones con una concentración relativamente alta. Mientras que en dispersiones concentradas el tamaño de glóbulo cobra importancia en función del balance de

fuerzas hidrodinámicas y fuerzas brownianas, y de cuan rígidos o deformables son los glóbulos (McClements, 2005).

1.4.3 Interacciones coloidales

La naturaleza de las interacciones coloidales entre los glóbulos presentes en una emulsión es otro de los factores que determinan la estructura de la emulsión y dicha estructura a su vez determina la reología. Las propiedades reológicas de una emulsión dependen de la magnitud relativa y el intervalo de las interacciones atractivas o repulsivas entre los glóbulos. De este modo, se pueden tener fuerzas electrostáticas debido a la presencia de glóbulos o moléculas cargadas, y fuerzas del tipo Van der Waals o hidrófobas. Pueden también encontrarse fuerzas de naturaleza estérica, presentes en dispersiones estabilizadas con especies no iónicas y polímeros.

La manipulación de las interacciones coloidales entre los glóbulos puede ser usada para controlar efectivamente las propiedades reológicas de las emulsiones. Cuando las interacciones entre los glóbulos son suficientemente atractivas la fracción volumen efectiva de la fase dispersa es incrementada debido a la floculación de los glóbulos lo que también da lugar a un aumento en la viscosidad de la emulsión. La viscosidad de una emulsión aceite en agua puede ser aumentada al promover la floculación de los glóbulos, existen diferentes formas de lograrlo dependiendo de la naturaleza del sistema por ejemplo, la floculación de los glóbulos puede ser inducida por la adición de biopolímeros lo que incrementará la atracción por agotamiento, mediante la adición de biopolímeros para causar la floculación por puenteo o por la alteración de pH para reducir las repulsiones electrostáticas. Por lo tanto, las propiedades reológicas de una emulsión dependerán de la magnitud relativa y el intervalo de atracción y repulsión entre las interacciones de los glóbulos (Dickinson, 1998; McClements, 2005).

1.5 Métodos para cuantificar la estabilidad

Para predecir teóricamente la velocidad a la que la separación gravitacional se produce en una emulsión, es necesario tener información sobre las densidades de las fases dispersa y continua,

el tamaño de la gota y las propiedades reológicas de la fase continua. En principio, es posible predecir la estabilidad a largo plazo de una emulsión alimenticia a partir del conocimiento de estas propiedades fisicoquímicas y un modelo matemático adecuado. En la práctica, este método tiene un uso limitado debido a que los modelos matemáticos no son actualmente lo suficientemente sofisticados para tener en cuenta la complejidad de las emulsiones alimenticias, por esta razón, a menudo es más apropiado medir directamente la separación gravitacional de las gotas en una emulsión.

Las técnicas comúnmente utilizadas para detectar la desestabilización física son: a simple vista o instrumentos analíticos más precisos y confiables. Un método simple de control de separación gravitatoria se basa en colocar una emulsión en un tubo de ensayo transparente, dejarlo durante un tiempo determinado, y luego medir la altura de la interfase entre la capa rica en gotas y la capa pobre. Los dos problemas principales asociados a la determinación visual son que únicamente se puede obtener información sobre la localización del límite entre la capa rica en gotas y la capa pobre en lugar de obtener el perfil completo de todas las gotas, además, en algunos sistemas, la capa pobre en gotas puede ser visiblemente opaca dificultando la localización de la interfase entre ambas capas.

La mayoría de las dispersiones son, sin embargo, bastante concentradas y opacas y, como resultado, caen fuera del intervalo de los instrumentos existentes, por lo tanto, se ha desarrollado una nueva técnica que permite el análisis de la desestabilización física de las dispersiones, la cual se basa en el monitoreo de la separación gravitacional por medio de una dispersión de luz.

En esta técnica la emulsión se deposita en un tubo de vidrio vertical y un haz monocromático de luz infrarroja es dirigido al tubo, este haz de luz sube y baja en toda la muestra (aproximadamente 65 mm) con ayuda de un motor, mientras que un detector de transmisión recibe la luz que pasa a través de la muestra (0° a partir del haz incidente) y un detector de retrodispersión recibe la luz dispersada por la muestra a 135° desde el haz incidente, el porcentaje de luz transmitida o dispersada es medida en función de la altura del tubo (Figura 14) (McClements, 1999; Mengual y col., 1999)

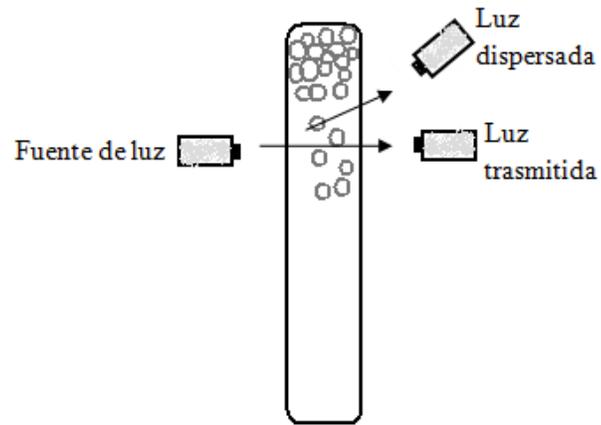


Figura 14. Dispositivo de luz dispersada en un tubo vertical (McClements, 1999).

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Objetivos

General

Evaluar el efecto de la combinación de goma tragacanto y albúmina de huevo en emulsiones aceite-agua sobre el comportamiento al flujo y estabilidad mediante curvas de flujo y cinética de desplazamiento.

Particulares

- 1) Determinar el comportamiento al flujo de sistemas acuosos elaborados a base de goma tragacanto en mezcla con albúmina de huevo y sus emulsiones correspondientes, mediante pruebas de cizalla estacionaria.

- 2) Analizar el efecto de la mezcla de goma tragacanto y albúmina de huevo en fase acuosa sobre la estabilidad de emulsiones aceite en agua mediante la determinación de tamaño y cinética de desplazamiento de glóbulos.

2.2 Desarrollo experimental

2.2.1 Materiales

Los polímeros utilizados para elaborar la fase acuosa fueron: goma tragacanto al 0.3% y 0.5% p/p (Cedrosa, lote 601.005, Control de drogas S.A. de C.V) y albúmina de huevo al 1% y 2% p/p (PROAN, código FEALB-AC-002). Agua baja en sales (epura) como disolvente en las distintas fases acuosas.

Para la elaboración de las emulsiones se utilizó aceite comercial puro de cártamo (marca Oléico, lote 1108-7251)

Preparación de las muestras

Preparación de la fase acuosa

Se elaboró la fase acuosa de goma tragacanto mediante una disolución, la cual se realizó en agua purificada bajo una agitación constante de 1050 rpm, a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$), por un tiempo de 40 minutos, en un agitador de propelas marca IKA, modelo RW20.

La fase continua de albúmina de huevo se preparó disolviendo dicha proteína en agua purificada manteniendo una agitación constante a una velocidad de 950 rpm, utilizando un agitador de propelas marca IKA, modelo RW20, procurando que la adición de albúmina fuera lenta para evitar la formación de espuma, a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$), por un tiempo de una hora y media.

Se realizaron mezclas de fases acuosas de ambos biopolímeros, para esto se elaboró cada fase individualmente utilizando el doble de la concentración requerida, para así poder mezclar partes iguales, se adicionó la disolución de albúmina de huevo a la disolución de goma tragacanto, bajo agitación constante a una velocidad de 1050 rpm.

Todas las fases acuosas de goma tragacanto fueron refrigeradas a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ después de su elaboración durante 24 h, mientras que las fases acuosas elaboradas con albúmina de huevo tuvieron que ser caracterizadas inmediatamente después de su elaboración.

Preparación de emulsiones

Una vez elaboradas las fase acuosas se procedió a la preparación de las emulsiones al 30% de aceite, ambos líquidos se mezclaron inicialmente (pre-homogeneización) con un homogeneizador marca Silverson, modelo L4R, a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$), a una velocidad media de 5400 rpm durante un minuto, seguida de una alta velocidad de 10200 rpm durante un minuto; se realizó una segunda mezcla (homogenización) inmediatamente después

de la pre-homogeneización, en un homogeneizador marca IKA-WERKE, modelo ultra turrax T25, a una velocidad de 15 000 rpm, a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$), por un minuto.

2.2.2 Métodos

Pruebas de dispersión de tamaño de partícula en fase acuosa y emulsiones

El tamaño de partícula de las fases acuosas y de las distintas emulsiones se determinó mediante una prueba de dispersión de luz. Tanto las fases continuas como las emulsiones se evaluaron en el equipo Cilas, marca COTA, modelo 930 LD.

La técnica de determinación de tamaño de partícula se basa en el fenómeno de la dispersión de un rayo laser sobre las partículas, que por medio de cálculos logarítmicos determina el tamaño promedio de partícula de la muestra (Cilas, 2004).

Condiciones de prueba: La temperatura a la que se realizó la prueba fue a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$, para las emulsiones la medición se realizó inmediatamente después de su elaboración, al igual que para las fases acuosas de albúmina de huevo, mientras que las demás muestras se refrigeraron a una temperatura de 4°C por un tiempo de 24 hr, antes de realizar las distintas pruebas las muestras fueron llevadas a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$).

Una vez terminada la prueba de dispersión de tamaño de partícula, se obtuvieron curvas de relación de diámetro (micras) en función de los valores acumulados hasta el 100%. Al mismo tiempo, el software calculó el diámetro promedio de volumen de las partículas y lo presentó en forma de tabla.

Comportamiento al flujo de fase acuosa y emulsiones

El comportamiento al flujo se realizó con la finalidad de conocer el tipo de fluido de las fases acuosas elaboradas con goma tragacanto y albúmina de huevo de manera individual y en mezcla. Una vez formada la emulsión se evaluó para conocer su comportamiento reológico final. Las pruebas se realizaron por triplicado.

Los reómetros Physica MC1, Physica LS100, Physica MCR-301 son de tipo rotacional que como principio de funcionamiento se basan en la transferencia de cantidad de movimiento en

la muestra contenida entre los dispositivos (cilindros o placas), desde el dispositivo que gira a una velocidad de rotación, hasta la parte del dispositivo que contiene la muestra. Se mide el par de torsión o torque del motor requerido, para moverla y se transforma a esfuerzo de cizalla por una constante, dependiendo de la geometría utilizada. La velocidad de rotación se transforma en velocidad de cizalla con la constante de proporcionalidad relativa, que también depende de las dimensiones de la geometría (Paar physica, 1996).

Condiciones de prueba: Las pruebas para las fases acuosas así como para las emulsiones se realizaron a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$), se utilizaron dos equipos diferentes, la velocidad de cizalla se varió dependiendo de la naturaleza de cada muestra hasta alcanzar un equilibrio. En el Cuadro 4 se muestran las condiciones de prueba para las distintas fases acuosas así como el equipo y la geometría utilizada, al mismo tiempo en el Cuadro 5 se presentan las condiciones, equipo y geometría utilizada para la evaluación de las emulsiones.

Para la caracterización del comportamiento al flujo se analizó el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla y la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla, esto se realizó mediante gráficos y regresiones lineales y no lineales para obtener la ecuación reológica que mejor describió su comportamiento.

Cuadro 4. Condiciones de prueba utilizadas para el comportamiento al flujo de fases continuas.

Muestra Fase continua	Nomenclatura	Equipo	Geometría	Condiciones
Tragacanto al 0.5%	T-0.5%	Physica MCR-301	CP75-1	Vel cizalla: 1-100 (1/s) Temperatura ambiente: (25 °C ± 1)
Albúmina al 1% con tragacanto al 0.3%	A-1% T-0.3%	Physica LS100	DG 1	Vel cizalla: 1-40 (1/s) Temperatura ambiente: (25 °C ± 1)
Albúmina al 2% con tragacanto al 0.3%	A-2% T-0.3%			
Albúmina al 1%	A-1%			
Albúmina al 2%	A-2%			Vel cizalla: 1-300 (1/s) Temperatura ambiente: (25 °C ± 1)
Tragacanto al 0.3%	T-0.3%			
Albúmina al 1% con tragacanto al 0.5%	A-1% T-0.5%	Physica MC1	Z2DIN	Vel cizalla: 1-400 (1/s) Temperatura ambiente: (25 °C ± 1)
Albúmina al 2% con tragacanto al 0.5%	A-2% T-0.5%			

Cuadro 5. Condiciones de prueba utilizadas para comportamiento al flujo de emulsiones.

Muestra Emulsión	Nomenclatura	Equipo	Geometría	Condiciones
Albúmina al 1%	(E) A-1%	Physica LS100	DG 1	Vel cizalla: 1-200 (1/s) Temperatura ambiente (25 °C ± 1)
Albúmina al 2%	(E) A-2%			
Tragacanto al 0.5%	(E) T-0.5%	Physica MC1	Z2 DIN	Vel cizalla: 1-400 (1/s) Temperatura ambiente (25 °C ± 1)
Albúmina al 1% con tragacanto al 0.5%	(E) A-1% T-0.5%			
Albúmina al 2% con tragacanto al 0.5%	(E) A-2% T-0.5			
Albúmina al 1% con tragacanto al 0.3%	(E) A-1% T-0.3%			
Albúmina al 2% con tragacanto al 0.3%	(E) A-2% T-0.3%			

Cinética de desplazamiento en emulsiones

Esta prueba se realizó con el fin de conocer la cinética de desplazamiento de las partículas en la emulsión y así poder analizar su estabilidad. Se llevó a cabo en un turbiscan marca Formulacion, modelo MA 2000.

El principio de funcionamiento del equipo turbiscan MA 2000 se basa en un analizador macroscópico de barrido vertical. Consiste en un cabezal de lectura que se mueve a lo largo de una celda de vidrio, de fondo plano, que toma lecturas de la luz transmitida o retro-dispersa cada 40 μm en una altura de muestra máxima de 80 mm. El barrido se puede repetir con una frecuencia programable para obtener una huella digital macroscópica de la muestra. El cabezal de lectura usa una fuente de luz pulsada cercana al infrarrojo (Mengual y col., 1999). Consta además de dos detectores:

1. Detector de transmisión (T): Recoge la luz transmitida a través de la disolución en el tubo a 0° .
2. Detector de retro-dispersión (BS): Recibe la luz retro-dispersa por el producto a 135° (Figura 15).

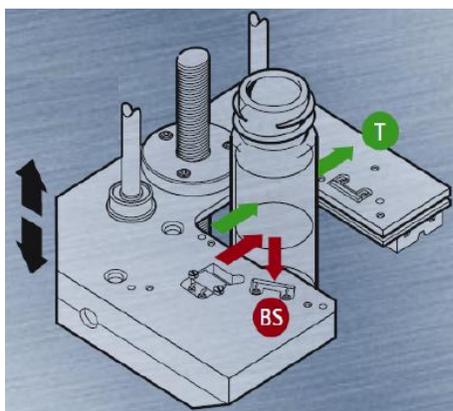


Figura 15. Detector T y BS de Turbiscan MA 2000 (Mengual y col., 1999)

Condiciones de prueba: La prueba se realizó por triplicado, los tubos donde se contuvo la muestras fueron refrigerados a 4°C y atemperados a $25^\circ\text{C} \pm 1$ (temperatura ambiente) antes de cada prueba. Se llevó a cabo una medición inmediatamente después de la elaboración de cada emulsión, y se prosiguió a tomar una medición diaria durante dos meses.

En el equipo Turbiscan se obtuvieron datos graficados de la cantidad absoluta de luz dispersada por la celda de medición en los 80 mm que recorre el cabezal, las diferentes líneas que conforman al gráfico representan los distintos días en los que se fue realizando la medición de cinética de desplazamiento. Las gráficas obtenidas se compararon con datos de referencia es decir en función a un cierto tiempo, comunmente se realiza en un tiempo cero ya que es la primer medición realizada y por lo tanto se considera el momento en el cual el sistemas es más estable.

Una vez obtenidas dichas gráficas se interpretaron como migración de partículas (cremado o sedimentado) o agregación de partículas (floculación o coalescencia) (Figura 16) según fue el caso. Una vez logrado el perfil de retro-dispersión en modo de referencia, se elaboraron las cinéticas de desplazamiento a partir de la distancia recorrida por los glóbulos y el tiempo de almacenamiento (Figura 17). Posteriormente se calculó la velocidad de desplazamiento de partícula por periodos, en base a la ecuación de la línea recta: $y = mx + b$. Donde la velocidad de desplazamiento de partícula en cada etapa corresponde a la pendiente obtenida de la relación que existe entre la distancia recorrida por los glóbulos (mm) y el tiempo de almacenamiento (días)

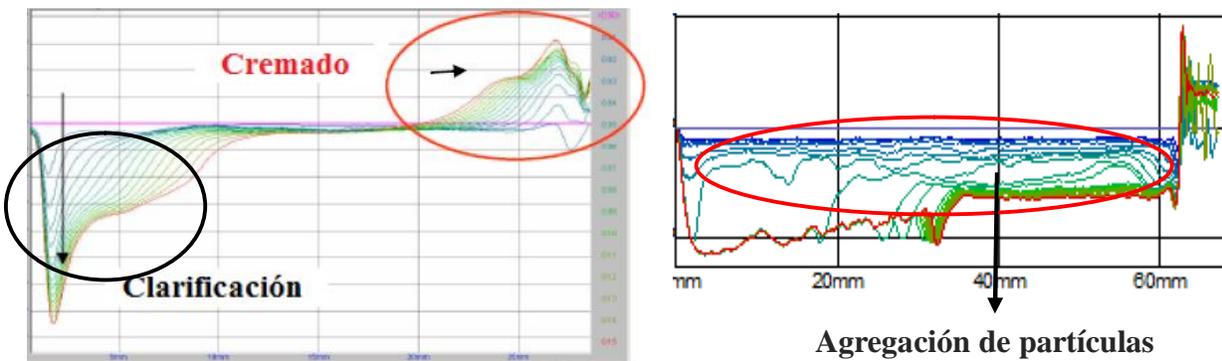


Figura 16. Fenómenos de inestabilidad presentados en emulsiones.

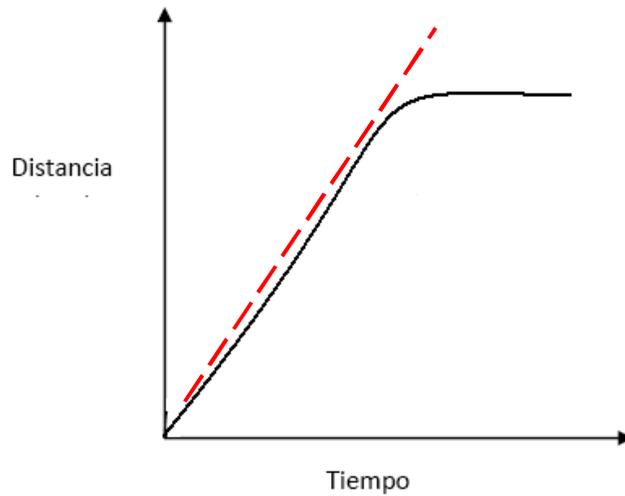


Figura 17. Cinética de desplazamiento presentada en emulsiones

2.2.3 Tratamiento estadístico

Todas las pruebas se elaboraron por triplicado y a los resultados obtenidos de las diferentes pruebas se les realizó un tratamiento estadístico para conocer la media, desviación estándar y coeficiente de variación, tal como se indica en las ecuaciones 6, 7 y 8 respectivamente (Namakforoosh, 2005).

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$C.V. = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad (8)$$

Donde:

\bar{x} = Media muestral

x_i = Datos o muestra

n = Tamaño de la muestra

S = Desviación estándar

C.V. = Coeficiente de variación (%)

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 Tamaño de partícula en sistemas acuosos

En el Cuadro 6, se presenta el diámetro promedio de partícula para los distintos sistemas acuosos evaluados, se observa que los sistemas elaborados con goma tragacanto al 0.3% y 0.5% de concentración, presentaron un tamaño de partícula de 5.765 y 5.685 μm respectivamente, con una diferencia de tamaño de 0.08 μm . Mientras que los sistemas acuosos elaborados con albúmina de huevo al 1% mostraron un tamaño de partícula de 5.136 μm y los sistemas acuosos a base de albúmina de huevo al 2% presentaron un tamaño de partícula de 5.280 μm con una diferencia entre dichos sistemas de 0.144 μm , esto indica que al incrementar la concentración de goma tragacanto y albúmina de huevo no existió presencia de agregados que provocaran un aumento importante en el tamaño de partícula es decir, no hubo una interacción o asociación entre las partículas de los mismos biopolímeros, si no que únicamente se incrementó la cantidad de partículas presentes en los distintos sistemas acuosos, la aproximación en el tamaño de partícula al utilizar goma tragacanto y albúmina de huevo se puede atribuir a que ambos son considerados biopolímeros de alto peso molecular.

En los sistemas acuosos elaboradas con mezcla de ambos biopolímeros se presentó un incremento en el tamaño de partícula para mezclas de albúmina de huevo al 1% con goma tragacanto al 0.3% y 0.5% de concentración se obtuvieron tamaños de 159.067 y 183.240 μm respectivamente, obteniéndose un diámetro mayor cuando se aumentó la concentración de goma tragacanto, esto indica que pudo presentarse la formación de agregados entre ambos biopolímeros lo que ocasionó un incremento en el tamaño de partícula, esto se puede atribuir a una atracción entre ambos biopolímeros lo cual dio como resultado la agregación de partículas.

Para los sistemas con mezcla de albúmina de huevo al 2% y goma tragacanto al 0.3% y 0.5% los tamaños de partícula promedio fueron 173.613 y 147.580 μm respectivamente, en estos sistemas acuosos se observa que el tamaño de partícula para concentraciones de goma

tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 2% presentaron un tamaño cercano a las mezclas descritas anteriormente, mientras que los sistemas de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 2% de concentración presentaron una disminución importante en el tamaño promedio de partícula, en general esto indica que el uso de las diferentes concentraciones de albúmina de huevo (1% y 2%) en mezcla con una baja concentración de goma tragacanto (0.3%) puede provocar la presencia de agregados de mayor tamaño, en cambio cuando se utilizan mezclas de altas concentraciones de goma tragacanto (0.5%) y albúmina de huevo (2%) se forman agregados de menor tamaño, tal como lo describen Hemar y col. (2001), donde muestras de leche descremada en polvo y concentrado de proteína de leche presentaban inicialmente tamaños de partícula semejantes, al momento de adicionarles goma xantana al 0.1% se observó la presencia de agregados de proteína con un determinado tamaño, los cuales disminuyeron su tamaño al incrementar la concentración de goma xantana al 0.5%.

Cuadro 6. Diámetro promedio obtenido para los distintos sistemas acuosos.

Fase Continua	\bar{X} (μm)	S	C.V. (%)
T-0.3%	5.765	0.162	2.821
T 0.5%	5.685	0.389	6.84
A-1%	5.136	0.020	0.405
A-2%	5.280	0.173	3.285
T 0.3% A-1%	159.067	1.090	0.685
T 0.3% A-2%	173.613	2.540	1.463
T 0.5% A-1%	183.240	0.953	0.520
T 0.5% A-2%	147.580	0.484	0.328

3.2 Tamaño de glóbulo en emulsión

La emulsión elaborada a base de goma tragacanto al 0.3% no fue evaluada debido a que su estabilidad fue nula, separándose inmediatamente después de su elaboración ya que la concentración no fue la suficiente para cubrir los glóbulos de aceite, por lo que se descartaron las pruebas de tamaño de partícula, comportamiento reológico y velocidad de desplazamiento de partícula.

En el Cuadro 7, se muestran los diámetros de glóbulo promedio para las distintas emulsiones, se puede observar que la emulsión formada con goma tragacanto al 0.5% es la que presentó el mayor tamaño de glóbulo (18.47 μm); en investigaciones realizadas por Rezvani y col. (2012) se postula que la presencia de los restos proteínicos que conforman a la goma tragacanto facilitan la adsorción de goma en la interface de los glóbulos aceite-agua y al mismo tiempo dichos residuos de proteína forman una película alrededor de los glóbulos, donde el espesor de esta película aumenta cuando se eleva la concentración de goma tragacanto, con esto se puede decir que a pesar de no realizar las mediciones para concentraciones de goma tragacanto al 0.3%, el incremento en el tamaño de partícula se puede atribuir a que probablemente al momento de incrementar la concentración de goma tragacanto el tamaño de glóbulo tendió a crecer tal como lo postulan dichos investigadores en su investigación realizada para emulsiones elaboradas con diferentes gomas, entre ellas, la goma tragacanto.

En las emulsiones elaboradas con albúmina de huevo al 1% se obtuvo un tamaño de glóbulo de 12.597 μm , mientras que para concentraciones de 2% el tamaño fue de 11.061 μm , la presencia de glóbulos de mayor tamaño a concentraciones del 1% de albúmina de huevo se atribuyen a que probablemente la cantidad de proteína utilizada no fue la suficiente para cubrir la superficie de los glóbulos de aceite lo que quizás provocó la presencia de interacciones entre dichos glóbulos dando lugar a tamaños de glóbulo mayores, estas interacciones pudieron provocarse por medio de una floculación, como lo describen Drakos y Kiosseoglou (2008) en investigaciones realizadas para emulsiones a diferentes concentraciones de albúmina de huevo deshidratada (0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2.5% y 4%). En cambio, a concentraciones de albúmina de huevo al 2% el tamaño de glóbulo disminuyó ya que probablemente existió un exceso de proteína lo que ocasionó que los glóbulos quedaran totalmente cubiertos por dicho biopolímero evitando así la presencia de interacciones entre los glóbulos de aceite.

Para las emulsiones elaboradas con mezclas de ambos biopolímeros se observó que el tamaño de glóbulo osciló en un intervalo de 8-9.5 μm , se puede decir que ambos biopolímeros en mezcla tuvieron una mejor adsorción en la interfase aceite-agua lo que provocó un menor tamaño de glóbulo (lo cual es deseable para lograr emulsiones estables), al mismo tiempo la disminución en el tamaño fue favorecida por la alta viscosidad que presentaron las mezclas de goma tragacanto y albúmina de huevo en los sistemas acuosos, lo que pudo ocasionar que la proteína se adsorbiera por un tiempo más prolongado en la interfase y por lo tanto estabilizara los glóbulos de aceite evitando así el incremento de tamaño (Hayati y col., 2009).

En el Cuadro 7 también se muestran los resultados obtenidos para el tratamiento estadístico de cada emulsión evaluada, obteniendo un coeficiente de variación menor a 10% con lo que se puede decir que los datos son confiables.

Cuadro 7. Diámetro promedio para las distintas emulsiones elaboradas.

Emulsión	\bar{X} (μm)	S	C.V. (%)
T 0.5%	18.470	0.308	1.667
A-1%	12.597	0.058	0.458
A-2%	11.067	1.073	9.693
T 0.3% A-1%	9.473	0.031	0.322
T 0.3% A-2%	8.147	0.006	0.071
T 0.5% A-1%	8.050	0.090	1.118
T 0.5% A-2%	8.627	0.006	0.067

3.3 Pruebas reológicas en sistemas acuosos

En la Figura 18, se presenta el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de los sistemas acuosos de goma tragacanto (0.5% y 0.3%), en la Figura 19 se observa que para los sistemas acuosos de goma tragacanto se obtuvo un modelo reológico de Carreau en donde la

viscosidad aparente del sistema acuoso al 0.5% de goma tragacanto es mayor que para sistemas acuosos al 0.3% de concentración, esto se puede atribuir a que hay un incremento en la cantidad de partículas presentes en el sistema al 0.5% de polisacárido lo que provocó que el sistema opusiera más resistencia a fluir y por lo tanto incrementara su viscosidad aparente, además, se puede observar que en ambos sistemas (T-0,3% y T.0.5%) la viscosidad aparente permanece constante a velocidades de cizalla bajas, [en un intervalo de 0.0037 a 0.02 (1/s) para concentraciones de 0.5% y en un intervalo de 4.19 a 9.42 (1/s) para concentraciones de 0.3%] y al momento de incrementar dicha velocidad la viscosidad aparente disminuye comportándose como un fluido de la potencia, con lo que se corrobora que el modelo que al que se ajustan los resultados obtenidos es el de Carreau, tal como lo describen Chenlo y col., (2010) y Morris (1990) en sus investigaciones donde afirman que la presencia de un comportamiento newtoniano a velocidades de cizalla bajos y un comportamiento como fluido de la potencia a altas velocidades es característico para sistemas acuosos elaborados con goma tragacanto y otros polisacáridos, siendo el modelo de Carreau uno de los que mejor describe dicho comportamiento.

En el Cuadro 8, se puede observar que los valores obtenidos para la constante de Carreau fueron mayores (19.896) a concentración de goma tragacanto de 0.5% que a concentración de 0.3% (0.032) con una diferencia entre los resultados de 19.864, el índice de consistencia para ambos sistemas acuosos fue de $0.335 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ para una concentración de 0.5% y $0.123 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ para 0.3%, , mientras que η_0 fue mayor (0.668 Pa s) a 0.5% de concentración que a 0.3% (0.015 Pa s), el incremento en todos los parámetros se puede atribuir a que en el sistema acuoso elaborado con goma tragacanto al 0.5% hay más presencia de partículas lo que puede dar como resultado un sistema más estructurado, estos resultados indican que el aumento de concentración tiene un efecto importante sobre el sistema provocando que a una concentración mayor de goma tragacanto la viscosidad aparente, y sus parámetros evaluados incrementaran notoriamente.

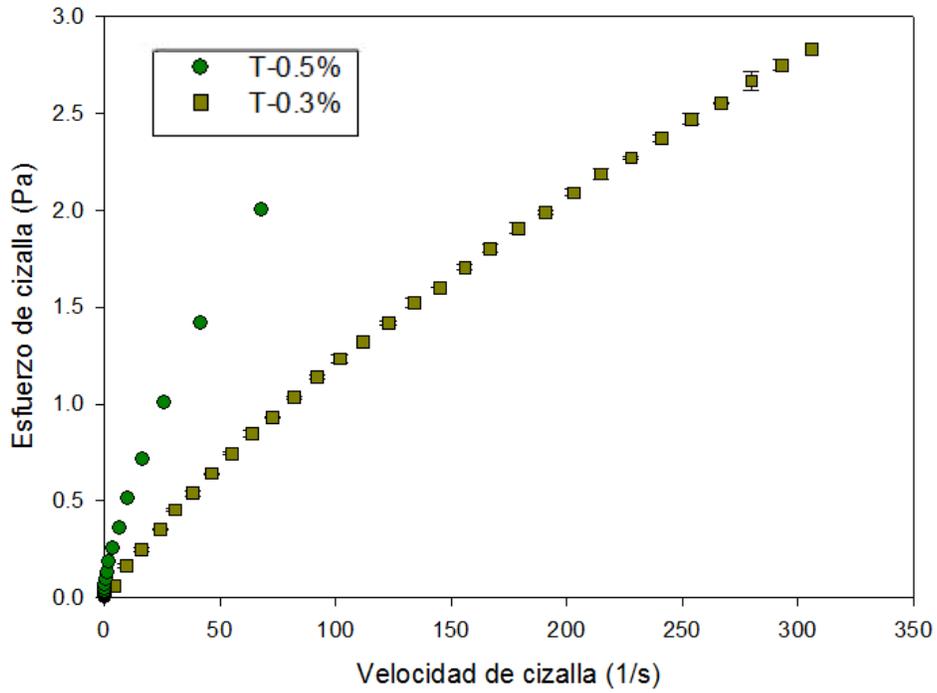


Figura 18. Comportamiento reológico de los sistemas acuoso elaborados con goma tragacanto (0.3% y 0.5%).

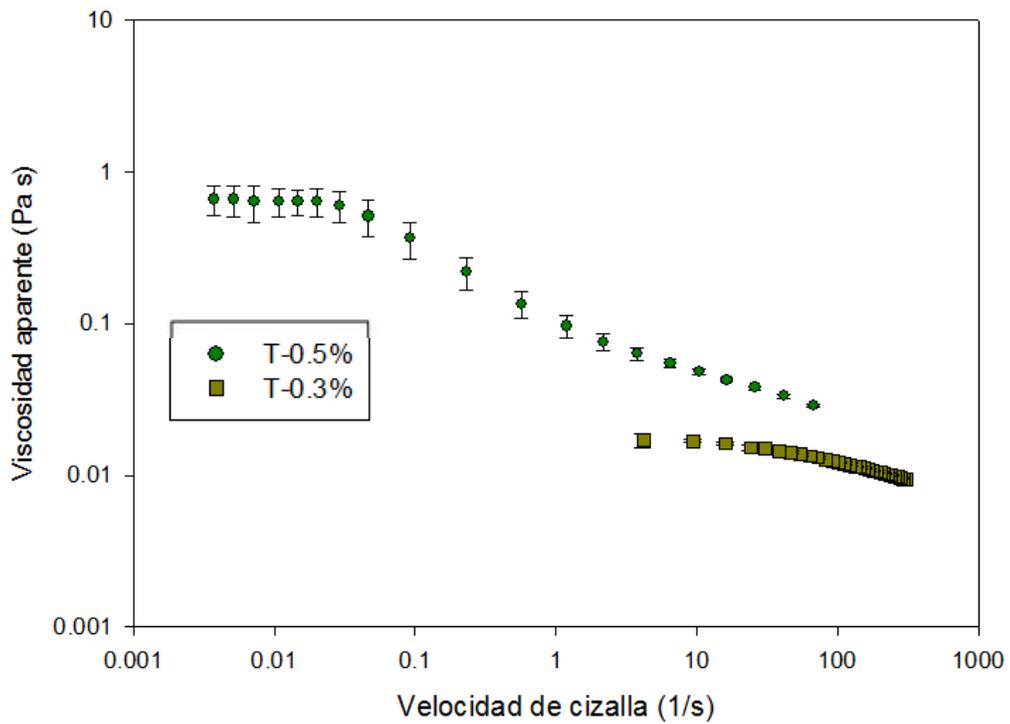


Figura 19. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla para sistemas acuosos elaborados con goma tragacanto (0.3% y 0.5%).

Para los sistemas acuosos elaborados a base de albúmina de huevo se obtuvo un comportamiento al flujo descrito por el modelo de Bingham (Figura 20), debido a que en ambos sistemas se necesitó un esfuerzo inicial para que empezaran a fluir, una vez que este esfuerzo se venció presentaron un comportamiento newtoniano. Los parámetros obtenidos para ambos sistemas acuosos (Cuadro 8) indican que el esfuerzo inicial fue similar (0.03 Pa) para las dos concentraciones utilizadas, al igual que el valor de la viscosidad plástica siendo de 1×10^{-3} Pa·s en ambos, cabe aclarar que el valor de la viscosidad plástica obtenida en los dos sistemas es muy cercano al valor de la viscosidad del agua a 25 °C (0.0008 Pa·s), con esto se puede decir que el incremento de la concentración de albúmina de huevo no tuvo un efecto sobre los sistemas elaborados, lo cual se corrobora en la Figura 21 donde no hay diferencia de viscosidades entre ambas concentraciones. La viscosidad plástica que se obtuvo para ambas concentraciones de albúmina de huevo fue baja en comparación con los sistemas acuosos elaborados con goma tragacanto, esta baja viscosidad plástica es característica de dicha proteína ya que en investigaciones realizadas por Al-Hakkak y Al-Hakkak (2010) se evaluó el comportamiento al flujo de sistemas acuosos elaborados de albúmina de huevo a concentraciones de 2.5% obteniendo como resultado una viscosidad plástica con la misma tendencia a la de la Figura 21 en el mismo intervalo de velocidad de cizalla [10-100 (1/s)].

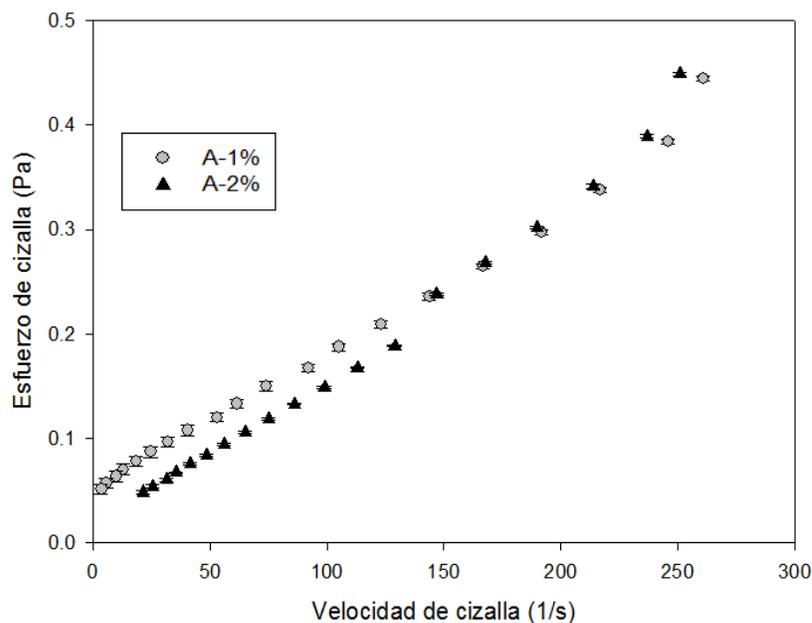


Figura 20. Comportamiento reológico de los sistemas acuoso elaborados con albúmina de huevo (1% y 2%).

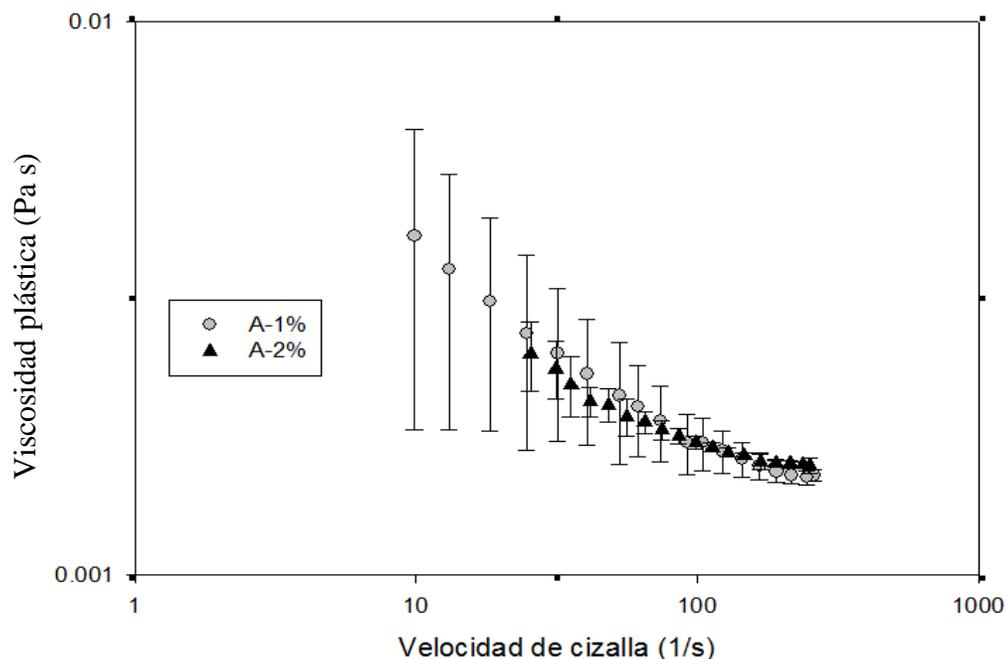


Figura 21. Viscosidad plástica en función de la velocidad de cizalla para sistemas acuosos elaborados con albúmina de huevo (1% y 2%).

En los sistemas acuosos elaborados con goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 1% y 2% respectivamente, se obtuvieron comportamientos descritos por el modelo de Hershel-Bulkley (Figura 22) donde se necesitó un esfuerzo inicial para hacer fluir estos sistemas, la aparición de dicho esfuerzo se atribuyó a la presencia de agregados que se formaron al mezclar ambos biopolímeros, se observa que al aplicar una velocidad de cizalla lo suficientemente grande para disgregar los aglomerado ambos sistemas empezaron a fluir y en consecuencia la viscosidad aparente disminuyó conforme se incrementó la velocidad de cizalla (Figura 23) al mismo tiempo, se presentó un cambio de pendiente, ajustándose por tal motivo al modelo Hershel-Bulkley. En el Cuadro 8 se observa que el valor del índice de consistencia y el índice de comportamiento al flujo fue de $0.025 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ y 0.847 para el sistema de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 2% respectivamente, mientras que para la mezcla de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 1% los valores obtenidos fueron de $0.021 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ y 0.894 , se puede decir que los valores de ambos parámetros fueron similares para ambos sistemas acuosos ya que se obtuvo una diferencia entre ellos de $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ para el comportamiento al flujo y de 0.047 para el índice de consistencia, con esto se puede decir que

la variación de la concentración de albúmina de huevo no presenta cambios notorios en los parámetros reológicos evaluados.

Al comparar la viscosidad aparente de las mezclas mencionadas anteriormente con la viscosidad plástica de los sistemas acuosos elaborados únicamente con albúmina de huevo se pudo observar que la viscosidad de dichas mezclas presentó un incremento, esto se atribuyó a que la concentración de goma tragacanto es la que domina el comportamiento al flujo en las mezclas, esto se corrobora en investigaciones realizadas por Al-Hakkak y Al-Hakkak (2010) donde se postula que la combinación de albúmina de huevo al 2.5% con pectina al 2.5% de concentración provoca un incremento en la viscosidad aparente, además, se menciona que otros investigadores han encontrado que la adición de polisacáridos en aderezos incrementa considerablemente dicha viscosidad.

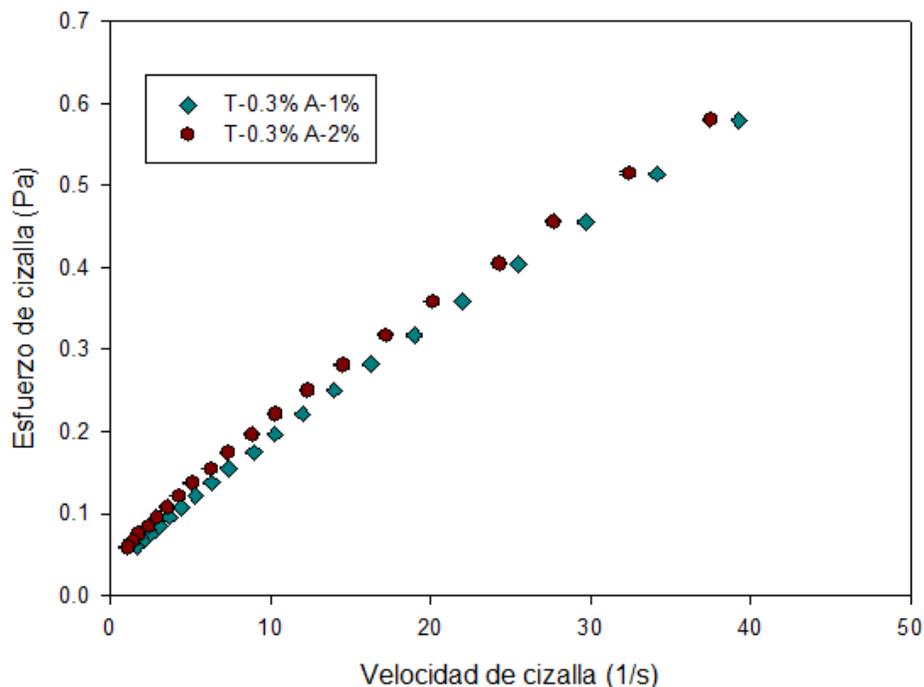


Figura 22. Comportamiento reológico de sistemas acuosos elaborado con mezclas de tragacanto (0.3%) y albúmina de huevo (1% y 2%).

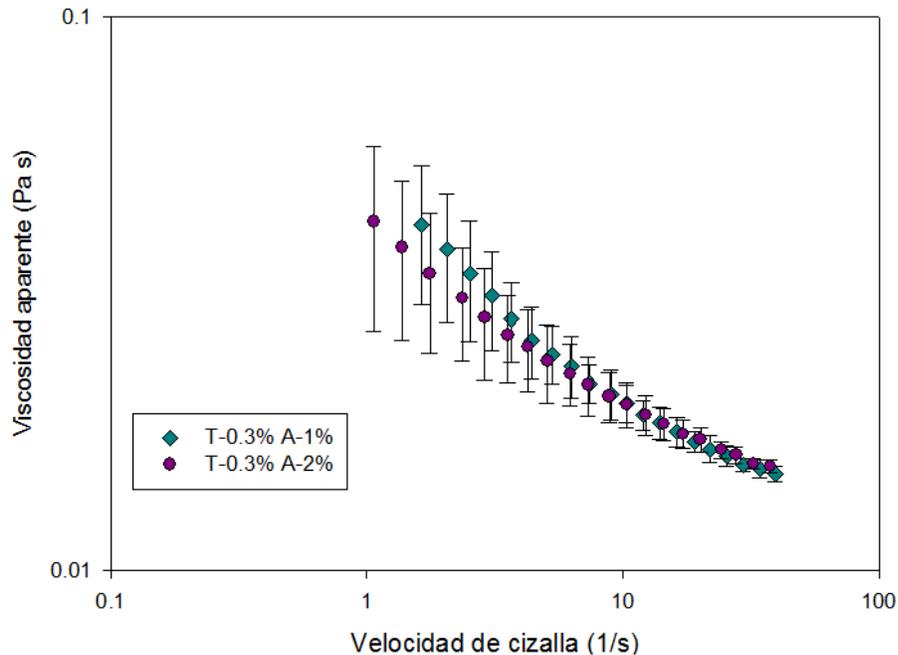


Figura 23. Viscosidad aparente de sistemas acuosos elaborado con mezclas de tragacanto (0.3%) y albúmina de huevo (1% y 2%).

Para los sistemas acuosos elaborados con mezclas de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1% y 2% respectivamente, se obtuvo un comportamiento reológico de la ley de la potencia (Figura 24), corroborándolo en la Figura 25, donde la viscosidad disminuyó al incrementar la velocidad de cizalla comportándose ambos sistemas como fluidificantes. Los valores obtenidos para el índice de consistencia así como para el índice de comportamiento al flujo fueron de $0.092 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ y 0.666 para mezclas de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 2%, mientras que para las mezclas de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1% se obtuvieron valores de $0.114 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ y 0.663 , se observa que el índice de consistencia es ligeramente mayor para las mezclas de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1%, encontrando un incremento de 0.022 para dicho parámetro, este aumento se atribuyó a que en esta mezcla predominó la presencia de agregados ocasionados probablemente a que la concentración de proteína no fue la suficiente para mantener cubiertos todos los glóbulos de aceite (se describió anteriormente en tamaño de partícula) lo que provocó el aumento en la consistencia y el incremento en la viscosidad aparente (Figura 25). Al comparar el sistema acuoso elaborado con goma tragacanto al 0.5% contra las mezclas descritas anteriormente, se observa que los tres sistemas presentaron un comportamiento en la viscosidad aparente

parecido, con lo que se vuelve a corroborar que el biopolímero que domina en mezcla es la goma tragacanto.

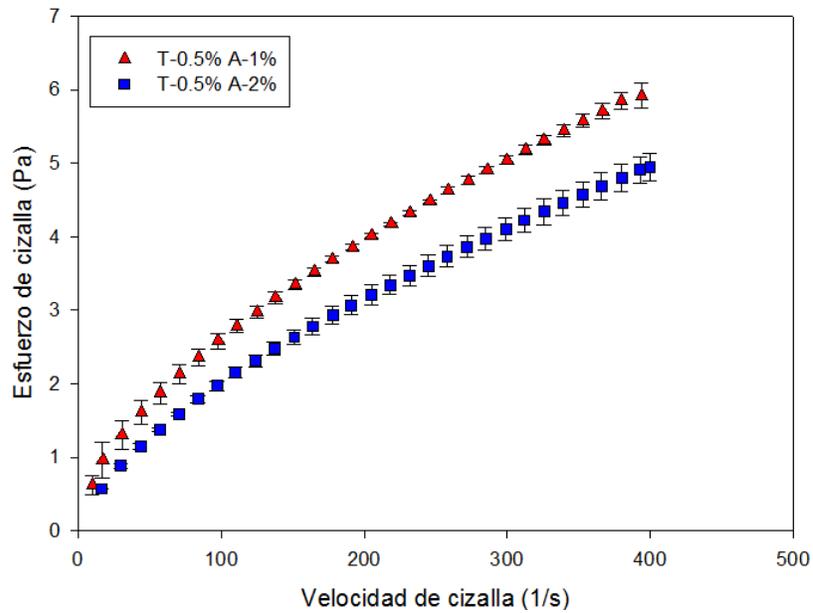


Figura 24. Comportamiento reológico de sistemas acuosos elaborado con mezclas de tragacanto (0.5%) y albúmina de huevo (1% y 2%).

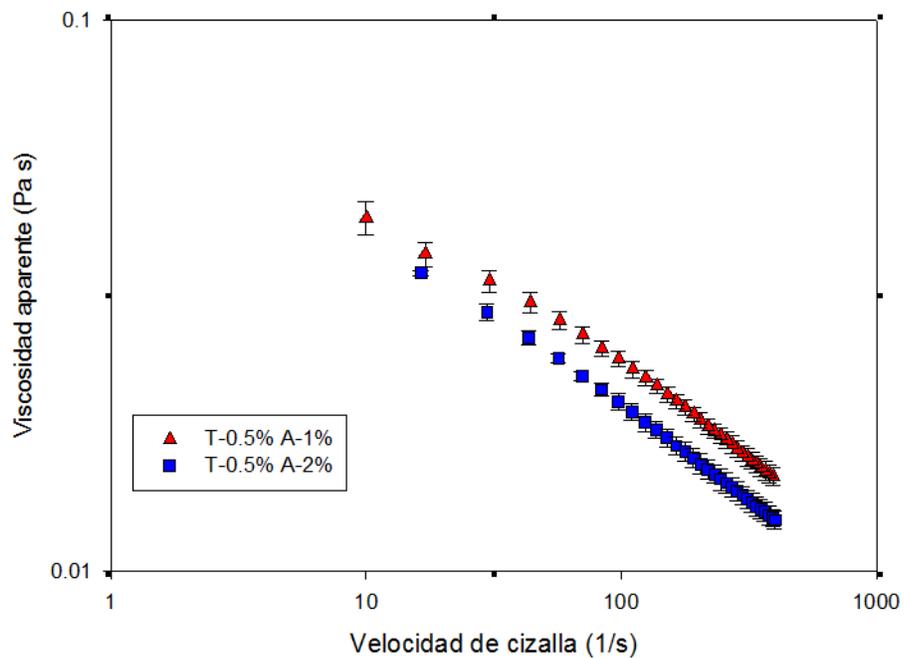


Figura 25. Viscosidad aparente de sistemas acuosos elaborado con mezclas de tragacanto (0.5%) y albúmina de huevo (1% y 2%).

A todas las pruebas se les realizó el mismo tratamiento estadístico (\bar{X} , S y C.V) encontrando diferentes valores de coeficiente de variación (Cuadro 8.), los valores que sobrepasaron el 10% fueron mezclas de goma tragacanto al 0.3% con albúmina al 1% y 2% respectivamente, esta variación se debió a que sobre estos sistemas el incremento de la concentración de albúmina tuvo mayor impacto al momento de realizar la prueba, provocando que las partículas constituidas por la espuma que tiende a formar la proteína al disolverse, influyeron en los resultados obtenidos, además en los sistemas acuosos elaborados con goma tragacanto al 0.3% se obtuvo un C.V. de 59.9% en la constante de Carreau el cual fue uno de los parámetros evaluados, este valor se atribuyó a la sensibilidad del instrumento ya que la prueba se realizó a valores de velocidad de cizalla relativamente bajos, mientras que las demás muestras entraron en un intervalo menor a 15% de C.V.

Cuadro 8. Valores de los distintos parámetros reológicos para cada uno de los sistemas acuosos evaluados.

Modelo reológico Sistema acuoso		Media	K (Pa·s ⁿ)	n	$\eta_{plastica}$ (Pa·s)	σ_0 (Pa)	Cte de Carreau	η_0 (Pa·s)	r ²
T-0.3%	Carreau	\bar{X}	0.123	-----	-----	-----	0.032	0.015	0.999
		S	0.014				0.019	0.002	
		C.V. (%)	11.070				59.991	9.478	
T-0.5%	Carreau	\bar{X}	0.335	-----	-----	-----	19.896	0.668	0.993
		S	0.032				2.237	0.135	
		C.V. (%)	9.512				11.246	20.302	
A-1%	Bingham	\bar{X}	-----	-----	0.001	0.03			0.999
		S			0	0.006			
		C.V. (%)			4.330	15.746			

Modelo reológico Sistema acuoso		Media	K (Pa·s ⁿ)	n	$\eta_{plastica}$ (Pa·s)	σ_0 (Pa)	Cte de Carreau	η_0 (Pa·s)	r ²
A-2%	Bingham	\bar{X}			0.001	0.03			0.999
		S	-----	-----	0.0001	0	-----	-----	
		C.V. (%)			3.936	0			
T-0.3% A-1%	H-B	\bar{X}	0.021	0.894		0.032			0.999
		S	0.003	0.038	-----	0.003	-----	-----	
		C.V. (%)	15.161	4.234		9.116			
T-0.3% A-2%	H-B	\bar{X}	0.025	0.847		0.023			0.999
		S	0.005	0.06	-----	0.007	-----	-----	
		C.V. (%)	20.924	7.137		32.732			
T-0.5% A-1%	Potencia	\bar{X}	0.114	0.663					0.998
		S	0.011	0.022	-----	-----	-----	-----	
		C.V. (%)	9.575	3.290					
T-0.5% A-2%	Potencia	\bar{X}	0.092	0.666					0.999
		S	0.006	0.017	-----	-----	-----	-----	
		C.V. (%)	6.899	2.699					

3.4 Pruebas reológicas en emulsión

En la Figura 26, se muestra el comportamiento reológico (Plástico de Bingham), al que se ajustaron los datos obtenidos de las emulsiones elaboradas a base de albúmina de huevo, corroborando dicho comportamiento con la Figura 27, este comportamiento no newtoniano se ha presentado en otros estudios realizados para emulsiones con albúmina de huevo, donde atribuyen dicho comportamiento a la formación de agregados de proteína (Drakos y Kiosseoglou, 2008) ya que estos agregados son los que oponen resistencia a fluir y al mismo tiempo hacen que el sistema este más estructurado provocando la presencia de un esfuerzo de cizalla inicial. Para la emulsión elaborada con albúmina de huevo a 1%, evaluadas en un

intervalo de velocidad de cizalla de 1-200 (1/s) se obtuvo un valor de viscosidad de 3×10^{-3} Pa·s y un esfuerzo inicial de 9×10^{-3} Pa, mientras que para concentraciones del 2%, evaluadas en el mismo intervalo de velocidad de cizalla 1-200 (1/s), la viscosidad fue de 5×10^{-3} Pa·s y el esfuerzo inicial fue de 3×10^{-3} Pa, el incremento en el esfuerzo inicial para la concentración de albúmina de huevo al 1% se puede decir que fue ocasionado por la presencia de agregados de tamaño superior en comparación con los agregados al 2% de concentración, por lo que se necesitó de un mayor esfuerzo para hacer fluir la emulsión al 1%, lo que se corrobora con el tamaño de glóbulo siendo de 12.597 μm para concentraciones de 1% y 11.067 μm para concentraciones de 2%. Se observó también que la viscosidad plástica fue menor para emulsiones de albúmina de huevo al 1% que a concentraciones de 2%, esta disminución en la viscosidad se puede atribuir a que a concentraciones al 1% de albúmina de huevo se presentó una menor adsorción de dicha proteína en la interfase aceite-agua lo que provocó que la disgregación de los glóbulos se diera con facilidad al incrementar la velocidad de cizalla dando lugar a una baja viscosidad plástica, en cambio a concentraciones superiores de albúmina de huevo (2%) la adsorción en interfase pudo ser mayor provocando que glóbulos de menor tamaño quedaran cubiertos con una cantidad superior de proteína, lo que evitó que al momento de incrementar la velocidad de cizalla se disgregaran provocando que dichos glóbulos proporcionaran una mayor resistencia al fluir y por lo tanto un incremento en la viscosidad plástica del sistema.

Para las emulsiones elaboradas con goma tragacanto al 0.5%, evaluadas en un intervalo de velocidad de cizalla de 1-400 (1/s), se obtuvo un comportamiento reológico de la ley de la potencia, en la Figura 26 se observa que la tendencia en dichas emulsiones no sigue un comportamiento newtoniano, y su viscosidad aparente disminuye conforme se incrementa la velocidad de cizalla (Figura 27) este comportamiento se ha presentado en emulsiones elaboradas con goma tragacanto estudiadas por Rezvani y col. (2012). Para estas emulsiones se obtuvo un valor de índice de comportamiento al flujo de 0.572 y un valor de índice de consistencia de $0.353 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$, dicho sistema disperso presentó una mayor viscosidad aparente en comparación con las emulsiones de albúmina de huevo al 1% y 2% (Figura 27) lo que se atribuyó a que la adición de goma de tragacanto dio como resultado glóbulos de tamaños superiores como se muestran en el Cuadro 7 presentado anteriormente, dando así un fluido con mayor resistencia a fluir y con una mayor viscosidad aparente.

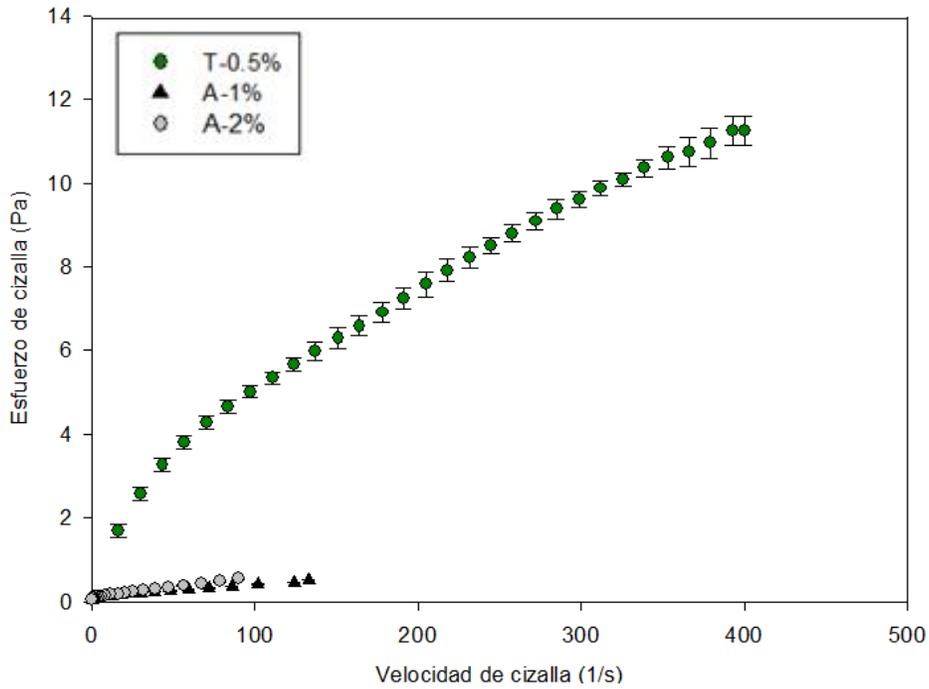


Figura 26. Comportamiento reológico de emulsiones elaboradas únicamente con goma tragacanto (0.5%) o albúmina de huevo (1% y 2%).

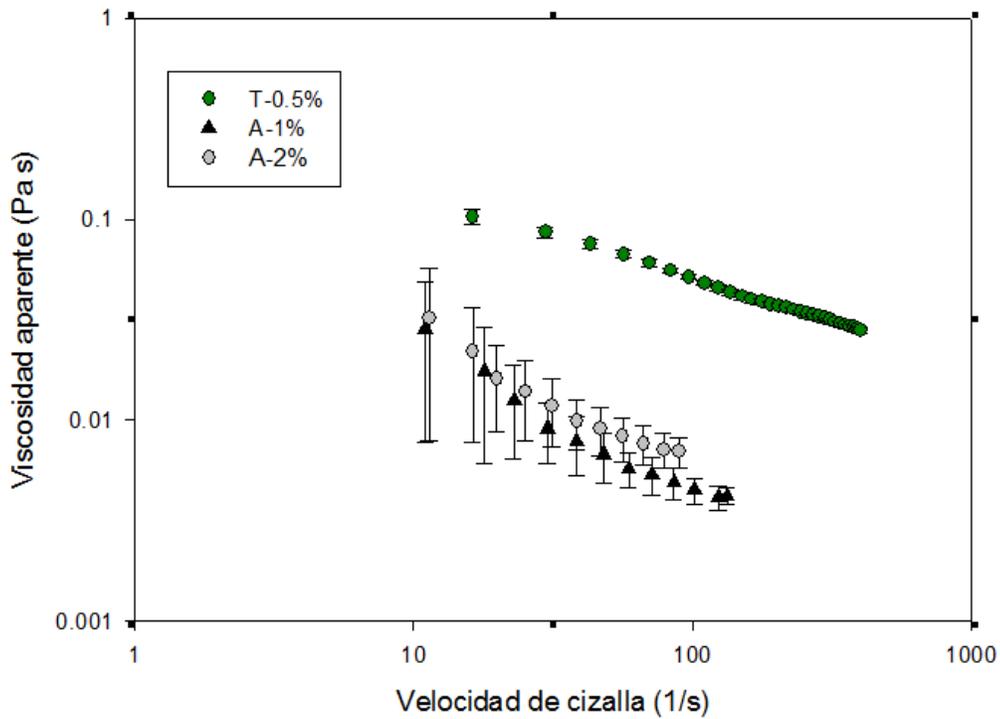


Figura 27. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla para emulsiones elaboradas únicamente con goma tragacanto (0.5%) o albúmina de huevo (1% y 2%).

En la Figura 28, se presenta el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para las emulsiones elaboradas con mezcla de goma tragacanto al 0.3 % y 5% de concentración y albúmina de huevo al 1 y 2 % de concentración, se observa que la tendencia en las emulsiones no es lineal por lo tanto se trata de un fluido no newtoniano, tipo fluidificante a la cizalla ya que la viscosidad aparente disminuyó conforme se incrementó la velocidad de cizalla (Figura 29), el modelo reológico que mejor describe dicho comportamiento es el de la ley de la potencia. Para las emulsiones elaboradas con mezcla de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 1% se obtuvo un valor de índice de comportamiento al flujo de 0.694 y un índice de consistencia de $0.165 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, mientras que para las mezclas de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 2% el índice de comportamiento al flujo fue de 0.69 y el índice de consistencia de $0.184 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$; mientras que el índice de consistencia fue mayor para concentraciones de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 2% por lo que dicha emulsión presentó mayor viscosidad aparente, esto indica que probablemente la proteína como el polisacárido adicionados en las fases acuosas de dichas emulsiones fueron adsorbidos en la interfase aceite-agua de manera distinta, por lo que a concentraciones bajas de goma tragacanto (0.3%) y albúmina de huevo (1%) el índice de consistencia y la viscosidad aparente fueron menores ya que en estos sistemas quizás los glóbulos formados fueron cubiertos con una baja cantidad de biopolímeros lo que ocasionó que se disgregaran al aplicar una velocidad de cizalla provocando así que presentaran valores de índice de consistencia y viscosidad aparente bajos (Figura 29).

Al mismo tiempo, las emulsiones elaboradas con mezcla de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 2% y 1% presentaron un comportamiento de la ley de la potencia (Figura 28), en donde la viscosidad aparente disminuyó con el aumento de velocidad de cizalla (Figura 29); se pudo observar que el valor del índice de comportamiento al flujo fue de 0.614 y el índice de consistencia de $0.534 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ para mezclas de goma tragacanto al 0.5% con albúmina de huevo al 2%, mientras que para emulsiones elaboradas con goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1% se obtuvieron valores de 0.633 para el índice de comportamiento al flujo y de $0.448 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ para el índice de consistencia, se visualiza que el valor de índice de consistencia es mayor para mezclas de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 2% ($0.534 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$), este incremento se atribuyó a que los glóbulos en dicho sistema presentaron un tamaño superior lo que provocó una mayor resistencia a fluir y por lo tanto una

mayor consistencia, mientras que los glóbulos de la emulsión elaborada con goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo 1% fueron de menor tamaño por lo que el sistema fluyó con mayor facilidad dando como resultado una menor consistencia. Para las emulsiones elaboradas con mezclas de ambos biopolímeros se pudo observar que la adición de las diferentes concentraciones de proteína presentó similitud en los parámetros obtenidos debido a que se observó poca diferencia entre los valores de comportamiento al flujo (0.019) e índice de consistencia (0.086 Pa·sⁿ) esto para mezclas de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1% y 2%, mientras que para mezclas de goma tragacanto al 0.3% con albúmina de huevo al 1% y 2% la diferencia encontrada fue de 0.004 para el comportamiento al flujo y de 0.019 Pa·sⁿ para el índice de consistencia, con estos resultados se puede decir que la variación de la concentración de albúmina de huevo no afectó en gran medida los distintos parámetros evaluados además, se observa que el incremento en la concentración de goma tragacanto es quien domina el comportamiento al flujo de dichas emulsiones tal como ocurrió en los sistemas acuosos.

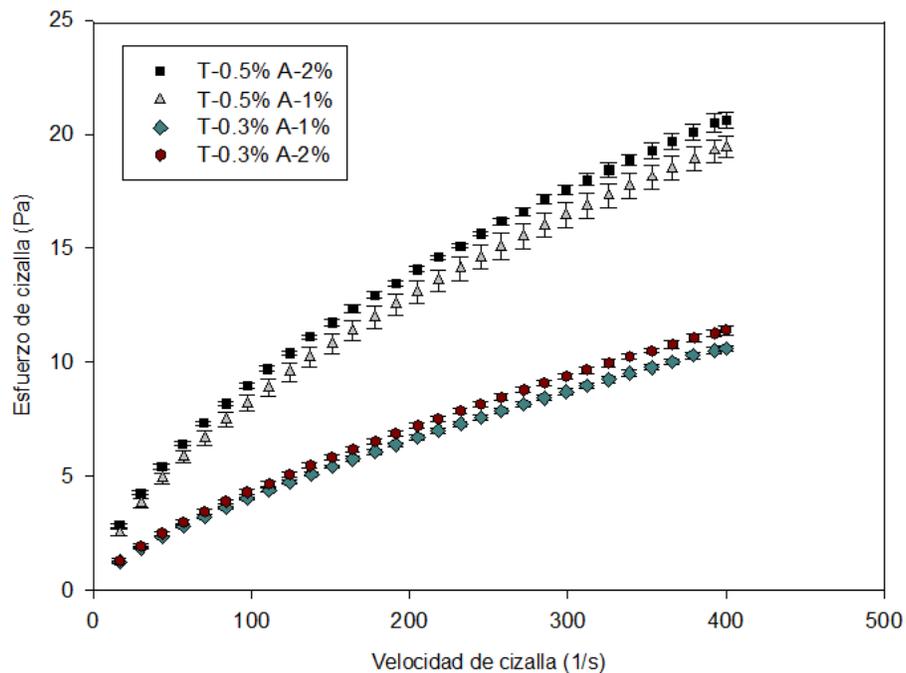


Figura 28. Comportamiento reológico de emulsiones elaboradas con mezclas de goma tragacanto (0.5% y 3%) y albúmina de huevo (1% y 2%).

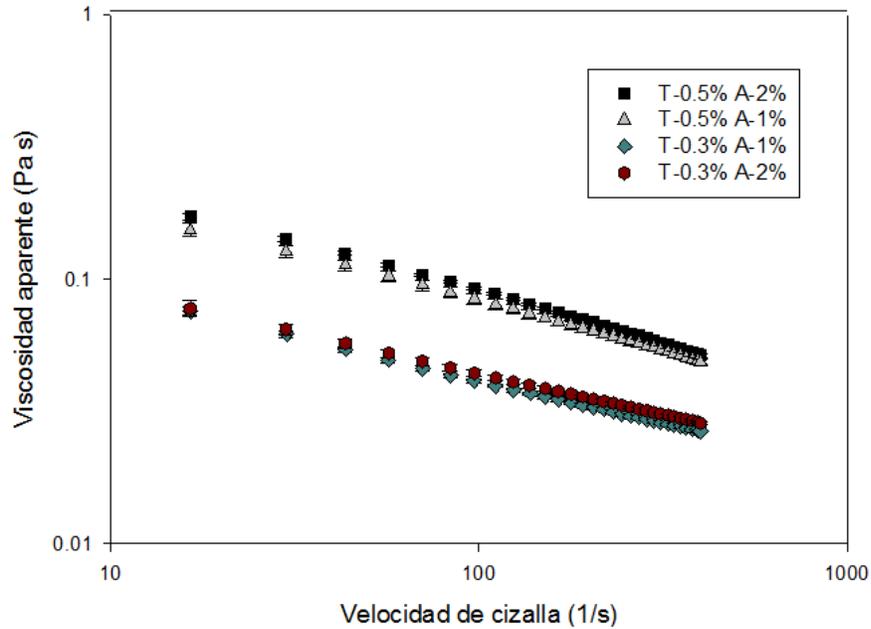


Figura 29. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla para emulsiones elaboradas con mezclas de goma tragacanto (0.5% y 3%) y albúmina de huevo (1% y 2%).

En el Cuadro 9, se presenta el tratamiento estadístico realizado a los diferentes parámetros reológicos de cada sistema disperso, se puede observar que el coeficiente de variación para los resultados no superó el 10%, a excepción de las emulsiones elaboradas únicamente con albúmina de huevo, ya que esta proteína presentó espuma al momento de su elaboración afectando las pruebas de comportamiento al flujo, dando como resultado valores de coeficiente de variación altos.

Cuadro 9. Valores de n , k y σ_0 para las distintas emulsiones

Modelo reológico Emulsión		Tratamiento estadístico	K (Pa·s)	n	$\eta_{plastica}$ (Pa·s)	σ_0 (Pa)	r^2
A-0.1%	Plástico de Bingham	\bar{X}	-----	-----	0.003	0.009	0.977
		S			4×10^{-4}	1×10^{-4}	
		C.V. (%)			14.347	7.443	
A-0.2%	Plástico de Bingham	\bar{X}	-----	-----	0.005	0.003	0.985
		S			7×10^{-4}	0	
		C.V. (%)			12.856	0	
T-0.5%	Ley de la potencia	\bar{X}	0.353	0.572	-----	-----	0.998
		S	0.028	0.013			
		C.V. (%)	7.970	2.189			

Modelo reológico Emulsión		Tratamiento estadístico	K (Pa·s)	n	$\eta_{plastica}$ (Pa·s)	σ_0 (Pa)	r^2
T-0.3% y A-1%	Ley de la potencia	\bar{X}	0.165	0.694	-----	-----	0.999
		S	0.017	0.014			
		C.V. (%)	10.405	1.994			
T-0.3% y A-2%	Ley de la potencia	\bar{X}	0.184	0.690	-----	-----	0.999
		S	0.019	0.016			
		C.V. (%)	10.170	2.292			
T-0.5% y A-1%	Ley de la potencia	\bar{X}	0.448	0.633	-----	-----	0.999
		S	0.035	0.008			
		C.V. (%)	7.877	1.307			
T-0.5% y A-2%	Ley de la potencia	\bar{X}	0.534	0.614	-----	-----	0.999
		S	0.042	0.016			
		C.V. (%)	7.795	2.554			

3.5 Cinética de desplazamiento en emulsiones

En la Figura 30 y Figura 31 se presenta la retro-dispersión obtenida para las emulsiones elaboradas con albúmina de huevo al 1% y 2% respectivamente, se observa la presencia de un clarificado turbio en la parte baja del tubo por lo que se presentó una retro-dispersión y como consecuencia se supone un cremado en la parte superior. De acuerdo a Drakos y Kiosseoglou, (2008), el clarificado turbio obtenido se puede atribuir a la presencia de glóbulos aislados o a flóculos de menor tamaño que no lograron cremar a la misma velocidad que los glóbulos que conforman el cremado en la parte superior del tubo). En el Cuadro 10, se observa que la velocidad de desplazamiento para dichas emulsiones fue de 11.55 mm/día para albúmina de huevo al 1% y de 6.4712 mm/día para albúmina de huevo al 2%, este aumento en la velocidad es inversamente proporcional a la concentración de albúmina utilizada tal como lo describen Drakos y Kiosseoglou (2008) en sus investigaciones. Se puede decir que el incremento de la velocidad a la concentración de 1% de albúmina de huevo se debió probablemente a que en esta emulsión se presentaron tamaños de partícula mayores (12.597 μm) en comparación con la emulsión elaborada al 2% de concentración (11.067 μm), lo que indica que la concentración de proteína posiblemente no fue la suficiente para cubrir la interfase aceite-agua llevando a la agregación de los glóbulos por un fenómeno de floculación por puenteo o tal vez la proteína permaneció adsorbida en la fase continua con lo que se logró un incremento local en la presión

y, por lo tanto, se pudo presentar la floculación por agotamiento (Drakos y Kiosseoglou, 2008), la presencia de ambos fenómenos no se pudo corroborar ya que no se midió el tamaño de partícula durante las pruebas de cinética. Estas emulsiones fueron menos estables en comparación con los demás sistemas lo que se verifica en el Cuadro 10 donde no se presentó un periodo de retraso, el cual se puede describir como la etapa en la que los glóbulos no presentan ningún movimiento visible (Robins, 2000). Las emulsiones mencionadas presentaron la menor viscosidad plástica en las pruebas de comportamiento al flujo lo que ayuda a corroborar que dicha viscosidad no logro retener los glóbulos de forma individual y por lo tanto no se pudo evitar la agregación, provocando así su desplazamiento a una mayor velocidad en comparación con las demás emulsiones.

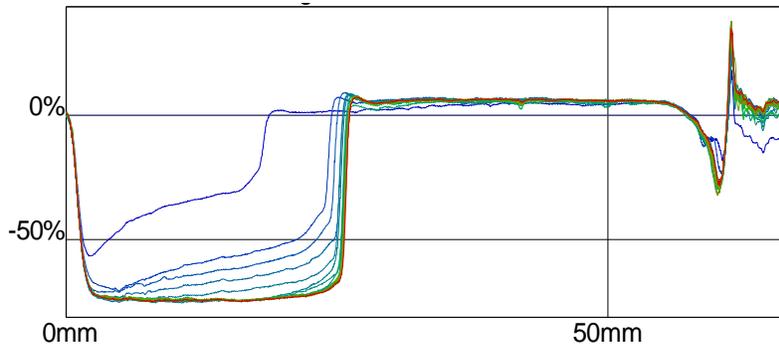


Figura 30. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con albúmina de huevo al 1%.

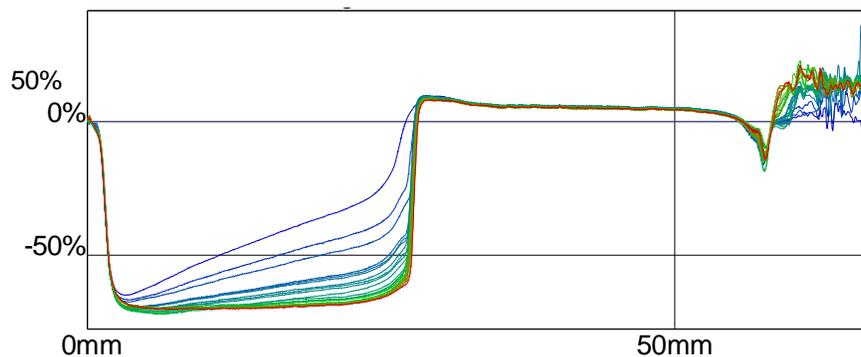


Figura 31. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con albúmina de huevo al 2%.

La velocidad de desplazamiento para las emulsiones elaboradas con tragacanto al 0.5% fue mayor (15.962 mm/día) en comparación con las demás emulsiones, además se pudo observar

la presencia de un clarificado en función del tiempo en la parte baja del tubo; se visualizó también una mayor inestabilidad ya que el perfil de la Figura 32 es característico del fenómeno de coalescencia el cual se presentó en toda la longitud del tubo, por lo que dicho clarificado pudo ser ocasionado por el incremento de tamaño de glóbulo. La velocidad de desplazamiento se presentó con un periodo de retraso de 8.975 días (Cuadro 10), lo que indica que la emulsión fue estable a pesar de presentar un tamaño de glóbulo grande ($18.470 \mu\text{m}$), dicha estabilidad pudo ser proporcionada por la viscosidad que brindó la goma tragacanto a las emulsiones lo que probablemente disminuyó la fuerza de atracción entre los glóbulos impidiendo así la agregación (Rezvani y cols, 2012). Una vez que el periodo de retraso se venció la velocidad se incremento de manera considerable (15.962 mm/día) lo que indica que a pesar de presentar una buena estabilidad durante 8.975 días esta emulsión con el paso del tiempo se vuelve muy inestable.

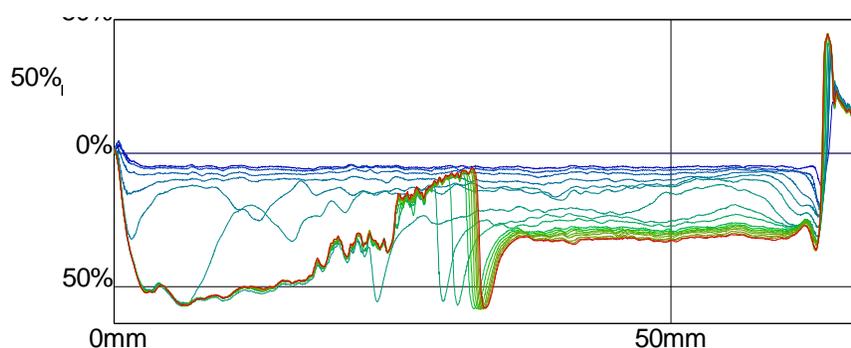


Figura 32. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con tragacanto al 0.5%.

Para las emulsiones elaboradas con mezclas de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 1% se obtuvo un periodo de retraso de 2.867 días y una velocidad de desplazamiento de 0.806 mm/día , mientras que para las mezclas de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo al 2% el periodo de retraso fue de 3.945 días y la velocidad de desplazamiento fue de 1.545 mm/día , en las Figura 33 y 34 se observa que únicamente se presentó una retro-dispersión en la parte baja del tubo lo que indica una migración de las partículas hacia la parte superior de ambos sistemas, con estos datos se puede decir que el periodo de retraso y la velocidad de desplazamiento fueron menores para la concentración de goma tragacanto al 0.3% y albúmina de huevo 1% a pesar de que ambas emulsiones presentaron una viscosidad similar en las pruebas de comportamiento al flujo al igual que en las pruebas de tamaño de glóbulo, esto

representa que quizás la adsorción de los biopolímeros en interfase pudo ser diferente adsorbiéndose de mejor manera cuando se incrementó la concentración de albúmina de huevo lo que probablemente evitó que los glóbulos entraran en contacto durante un periodo más prolongado.

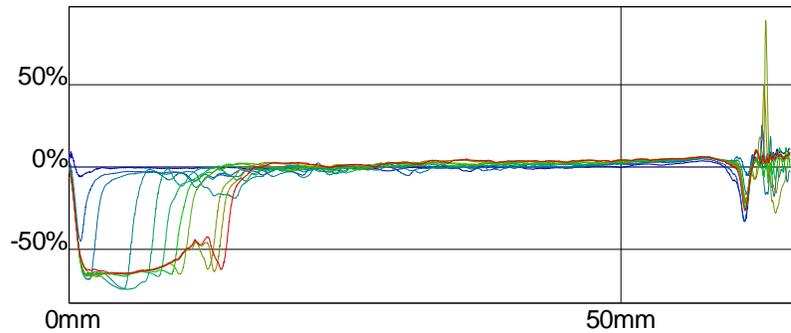


Figura 33. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con mezcla de tragacanto al 0.3% y albúmina al 1%.

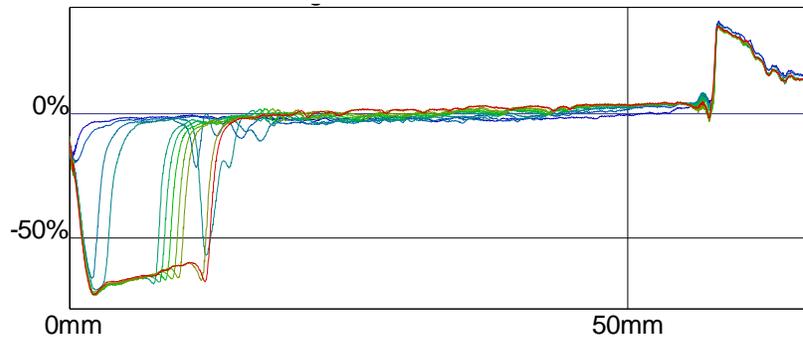


Figura 34. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con mezcla de tragacanto al 0.3% y albúmina al 2%.

La emulsión elaborada con goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1% presentó un periodo de retraso de 14.106 días y una velocidad de desplazamiento de 2.042 mm/día, mientras que los valores para concentraciones de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 2% fueron de 1.8393 días para el periodo de retraso y de 1.842mm/día para la velocidad de desplazamiento. Se puede observa en las Figura 35 y 36 que se presentó una retro-dispersión únicamente en la parte baja del tubo con un periodo de retraso más prolongado cuando la concentración de albúmina huevo es menor, esto se atribuyó a que quizás la concentración de ambos biopolímeros favoreció la adsorción en interfase provocando

que actuaran de mejor manera como emulsificantes y estabilizantes dando lugar a una emulsión más estable, mientras que la mezcla de altas concentraciones de proteína y polisacárido pudo ocasionar que se presentara con mayor rapidez la agregación de los glóbulos lo que llevo a la separación de fases, provocando al mismo tiempo un bajo periodo de retraso.

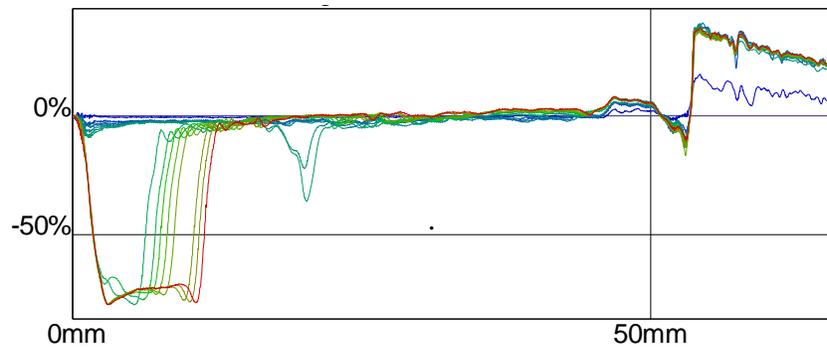


Figura 35. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con mezcla de tragacanto al 0.5% y albúmina al 1%.

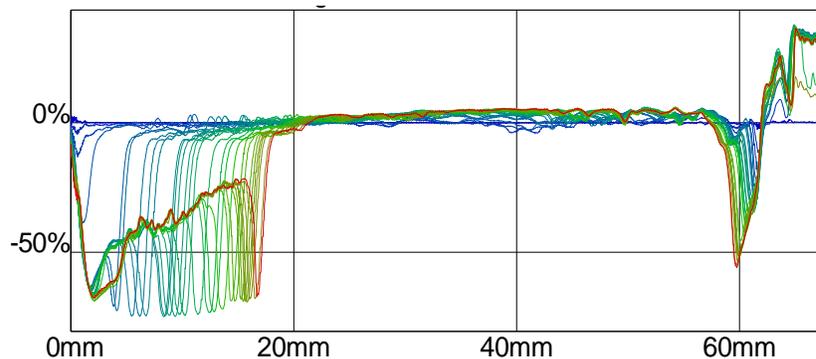


Figura 36. Retro-dispersión de luz obtenida para emulsiones elaboradas con mezcla de tragacanto al 0.5% y albúmina al 2%.

En la Figura 37, se observa claramente que las emulsiones elaboradas con mezcla de goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1% presentaron un periodo de retraso más prolongado en comparación con las demás muestras las cuales se explicaron anteriormente, seguida de las emulsiones elaboradas únicamente con goma tragacanto al 0.5%, por lo tanto, se puede decir que ambas emulsiones son las más estables al presentar inicialmente un periodo de retraso más prolongado que las demás emulsiones, en otras palabras se obtuvo una mayor vida de anaquel, a pesar de que ambas emulsiones mostraron periodos de retraso superiores al

resto de las muestras, se puede observar que después de vencer el periodo de retraso los sistemas dispersos elaborados con goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1% presentaron una menor velocidad de desplazamiento que las emulsiones elaboradas únicamente con goma tragacanto al 0.5% de concentración, con lo cual se puede decir que las emulsiones que tuvieron una mayor vida de anaquel fueron las elaboradas con goma tragacanto al 0.5% y albúmina de huevo al 1%.

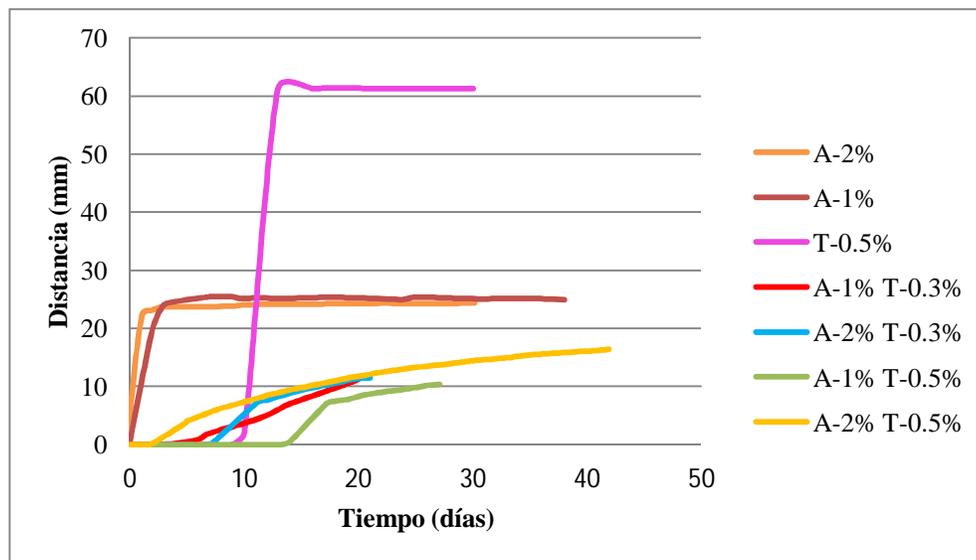


Figura 37. Distancia recorrida en función del tiempo de las distintas emulsiones.

En el Cuadro 10 se presenta la velocidad de desplazamiento y el periodo de retraso obtenido para los distintos sistemas dispersos así como su tratamiento estadístico donde ningún resultado sobrepasó el 10% de coeficiente de variación, además se muestra el número de repeticiones realizadas para cada emulsión. El análisis de los resultados se realizó en retro-dispersión en toda la longitud del tubo.

Cuadro 10. Periodo de retraso y velocidades de desplazamiento para las distintas emulsiones.

Emulsión	# de repetición y longitud de medida de cada tubo (mm)	# pendientes	Periodo de retraso (días)	velocidad (mm/días)	\bar{X} (mm/días)	S	C.V. (%)																																																																								
A-1%	(1) 1.36 a 25.9	1	0	11.7168	11.55	0.0098	2.0423																																																																								
	(2) 1.26 a 24.3	1	0	11.3832				A-2%	(1) 0.944 a 26.5	1	0	6.384	6.4712	0.0032	1.1707	(2) 0.949 a 26.7	1	0	6.5208	(3) 1.47 a 27.6	1	0	6.5088	T-0.5%	(1) 0.4206 a 62.4	1	8.9770	16.368	15.962	0.0239	3.5935	(2) 0.421 a 63.7	2	8.9757	15.5568	T-0.3% A-1%	(1) 0.726 a 14.3	1	2.8730	0.6984	0.8062	0.0012	4.0136	(2) 0.941 a 12.8	1	2.8676	0.7392	T-0.3% A-2%	(2) 1.04 a 12.5	2	3.9775	1.4592	1.5456	0.0037	5.7945	(3) 0.843 a 13.7	2	3.9454	1.632	T-0.5% A-1%	(1) 1.76 a 11.4	2	14.1066	2.0016	2.0424	0.0024	2.8251	(2) 0.95 a 11.4	2	12.9802	2.0832	T-0.5% A-2%	(1) 0.737 a 17.4	3	1.8393	1.8672	1.842	0.0046	6.1969
A-2%	(1) 0.944 a 26.5	1	0	6.384	6.4712	0.0032	1.1707																																																																								
	(2) 0.949 a 26.7	1	0	6.5208																																																																											
	(3) 1.47 a 27.6	1	0	6.5088																																																																											
T-0.5%	(1) 0.4206 a 62.4	1	8.9770	16.368	15.962	0.0239	3.5935																																																																								
	(2) 0.421 a 63.7	2	8.9757	15.5568																																																																											
T-0.3% A-1%	(1) 0.726 a 14.3	1	2.8730	0.6984	0.8062	0.0012	4.0136																																																																								
	(2) 0.941 a 12.8	1	2.8676	0.7392																																																																											
T-0.3% A-2%	(2) 1.04 a 12.5	2	3.9775	1.4592	1.5456	0.0037	5.7945																																																																								
	(3) 0.843 a 13.7	2	3.9454	1.632																																																																											
T-0.5% A-1%	(1) 1.76 a 11.4	2	14.1066	2.0016	2.0424	0.0024	2.8251																																																																								
	(2) 0.95 a 11.4	2	12.9802	2.0832																																																																											
T-0.5% A-2%	(1) 0.737 a 17.4	3	1.8393	1.8672	1.842	0.0046	6.1969																																																																								
	(2) 0.63 a 15	3	1.8372	1.8168																																																																											

CONCLUSIONES

Se puede concluir que en los sistemas acuosos en los que se utilizó la mezcla de goma tragacanto con albúmina de huevo se presentó un tamaño de partícula mayor en comparación con los sistemas donde se utilizó individualmente cada biopolímero. Por lo que se puede decir que la interacción de ambos biopolímeros incrementa el tamaño de partícula ya que al contener una concentración más elevada de proteína y polisacárido se tienden a formar agregados que dan lugar a tamaños de partícula grandes.

En los mismos sistemas acuosos, el comportamiento al flujo indicó que los sistemas acuosos elaborados únicamente con albúmina de huevo a diferentes concentraciones (1% y 2%), no presento diferencia entre los parámetros evaluados ya que se obtuvieron valores idénticos en el índice de comportamiento al flujo e índice de consistencia, mientras que cuando se mezcló albúmina de huevo al 1% y 2% de concentración con goma tragacanto al 0.3% hubo poca diferencia entre los parámetros, en cambio, al incrementar la concentración de goma tragacanto (5%) se observó un aumento en la viscosidad aparente de los sistemas acuosos así como en los distintos parámetro reológicos evaluados, con esto se puede concluir que el biopolímero que domina el comportamiento al flujo como la viscosidad del sistema es la goma tragacanto. Dicho dominio del polisacárido ocurrió también en las pruebas realizadas para las distintas emulsiones elaboras, donde la variación de la concentración de proteína únicamente mostró ligeros cambios en los parámetros reológicos obtenidos, mientras que las diferentes concentraciones de goma tragacanto provocaron cambios evidentes.

A pesar de que las diferentes concentraciones de albúmina de huevo presentaron resultados semejantes en los parámetros evaluados durante las pruebas de comportamiento al flujo, fue distinto en las pruebas de cinética de desplazamiento donde los resultados de velocidad de desplazamiento de partícula y el periodo de retraso mostraron que dicha variación de concentración de proteína si provoca efectos notorios en la estabilidad de los sistemas dispersos, ya que una baja concentración de albúmina de huevo (1%) en mezcla con una alta

concentración de goma tragacanto (0.5%) proporcionan al sistema un periodo de retraso prolongado y por ende una mejor estabilidad a diferencia de las demás emulsiones elaboradas.

REFERENCIAS

- Aguado J. A. (2003). *Ingeniería De La Industria Alimentaria: Conceptos basicos*. Zaragoza, España.
- Al-Hakkak Jafar y Al-Hakkak Fadia.(2010). Functional egg white–pectin conjugates prepared by controlled Maillard reaction. *Journal of Food Engineering*, 100, 152-159.
- Aranberri I. P. B. B., Clint J. y Fletcher P. (2006). Elaboración y caracterización de emulsiones estabilizadas por polímeros y agentes tensioactivos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 7(3), 211-231.
- Azarikia F. y Soleiman A. (2010). On the stabilization mechanism of doog (Iranian yoghurt drink) by gum tragacanth. *Food Hydrocolloids*, 24, 358-363.
- Badui S. (2006). *Química De Los Alimentos*. México: Pearson, 736 p.p.
- Balaghi S., Mohammad A., Zargaraan A., Gavligh I. H., y Mohammadi M. (2011). Compositional analysis and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of Iranian Astragalus. *Food Hydrocolloids*, 25, 1775-1784.
- Charalambous G. y Doxastakis G. (1989). *Food Emulsifiers*. U.S.A.: Elsevier science publishers, 457 p.p.
- Chenlo F., Moreira R. y Silva C. (2010). Rheological behaviour of aqueous systems of thagacanth and guar gums with storage time. *Journal of Food Engineering*, 96, 107-113.
- Cilas. (2004). *Particle size analyzer*. User manual Cilas 920. Francia.
- Cubero N., Moriferier A. y Villarta J. (2002). *Aditivos Alimentarios*. España: Mundi-Prensa, 240 p.p.

- Davidson R. L. (1980). *Handbook Of Water-Soluble Gums And Resins*. USA: Mc Graw-hill Book company, 700 p.p.
- Dickinson E. (1990). *Food Polymer, gels, and colloids*. England: The Royal Society of Chemistry.
- Dickinson E. (1998). Rheology of emulsions-the relationship to structure and stability. Bernard P. Binks. *Modern Aspects To Emulsion Science*. Royal society of chemistry. Gran Bretaña, 145-173.
- Dickinson E. (2009). *Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers*. *Food Hydrocolloids*, 23, 1473-1482.
- Drakos A., y Kiosseoglou V. (2008). Depletion flocculation effects in egg-based model salad dressing emulsions. *Food Hydrocolloids*, 22, 218-224.
- Fennema O. (1996). *Food Chemistry* (Tercera edición), New York: Marcel Dekker, 792 p.p.
- Graham H. D. (1997). *Food colloids*. USA: The Avi Publishing Company, INC.
- Hayati I. N., Man Y. B. C., Tan C. P. y Aini I. N. (2009). Droplet characterization and stability of soybean oil/palm kernel olein O/W emulsions with the presence of selected polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 23, 233-243.
- Hemar Y., Tamehana M., Munro P. A. y Singh H. (2001). Viscosity, microstructure and phase behavior of aqueous mixtures of commercial milk protein products and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 15, 565-574.
- Hermida J. H. (2000). *Fundamentos De Ingeniería De Procesos Agroalimentarios*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- McClements D. J. (1999). *Food Emulsions*. New York, CRC Press, Boca Raton.
- McClements D. J. (2005). *Food Emulsions*. New York, CRC Press, Boca Raton.
- Méndez A., Pérez, L. y Paniagua, M. (2010) Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). Distrito

- Federal, México. Centro de Asimilación Tecnológica-FESC, Universidad Nacional Autónoma de México. 4, 237-245.
- Mengual O., Meunier G., Cayré I., Puech K. y Snabre P. (1999). TURBISCAN MA 2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis. Europa, Francia: Elsevier science publishers, 50, 445–456.
- Mine Y. (1995). Recent advances in the understanding of egg white protein functionality. *Trends in food science & technology*, 6, 225-232.
- Moreno Santos A. (1995). Química y Bioquímica De Alimentos. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Morris R. (1990) Shear-Thinning of “Random Coil” Polysaccharides: Characterisation by Two Parameters from a Simple Linear Plot. *Carbohydrate Polymers*. 13, 85-96.
- Muñoz J. Alfaro, M. D. y Zapata I. (2007). Avances en la formulación de emulsiones. *Grasas y aceites*, 58 ,64-73.
- Namakforoosh, M. N. (2005). Metodología De La Investigación. México: Limusa, 525 p.p.
- Paar physica. (1996). Especificaciones tecnicas del viscosimetro MC 1 PHYSICA. Manual del US 200, México: Inventario UNAM.
- Rezvani E., Schleining G. y Taherian A. R. (2012). Assessment of physical and mechanical properties of orange oil-in-water beverage emulsions using response surface methodology. Elsevier science publishers. *Food Science and Technology*, 30, 1-7 p.p.
- Rodríguez J. M. y Pilosof M. R. (2011). Protein-polysaccharide interactions at fluid interfaces. *Food Hydrocolloids*, 25, 1925-1937.
- Robins, M. (2000). Emulsions - creaming phenomena. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 5, 265-272.
- Steffe J., (1996). *Rheological Methods In Food Process Engineering* (Segunda edición ed.). USA. Freeman press, 428 p.p.