



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

TENSIÓN SUPERFICIAL DE MEZCLAS GUAR – TWEEN  
20 Y SU APLICACIÓN COMO ESTABILIZANTE  
DE EMULSIONES ACEITE-AGUA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
QUÍMICO DE ALIMENTOS

PRESENTA

ALEXIS IVÁN BUENDÍA NÁJERA

TUTOR DE TESIS

DR. ALBERTO TECANTE CORONEL



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**            **TECANTE CORONEL ALBERTO**  
**VOCAL:**                   **DE ANDA AGUILAR LORENA**  
**SECRETARIO:**         **GÓMEZ SIERRA TANIA**  
**1er. SUPLENTE:**       **TREJO CANDELAS LUIS MIGUEL**  
**2° SUPLENTE:**         **BÁEZ FERNÁNDEZ MARCOS FRANCISCO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO 313, DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA, CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**DR. ALBERTO TECANTE CORONEL**

**SUPERVISORA TÉCNICA:**

---

**I.A MARIANA RAMÍREZ GILLY**

**SUSTENTANTE:**

---

**ALEXIS IVÁN BUENDÍA NÁJERA**

## CONTENIDO

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
HIPÓTESIS .....	5
CAPÍTULO 1 .....	6
ASPECTOS GENERALES .....	6
1.1 Polisacáridos .....	6
1.1.1 Guar.....	7
1.2 Tensioactivos.....	10
1.2.1 Tween 20 .....	13
1.3 Interacciones polisacárido-tensioactivo .....	14
1.3.1 Concentración de agregación crítica (CAC) .....	14
1.3.2 Concentración micelar crítica (CMC) .....	15
1.4 Emulsiones.....	15
1.4.1 Emulsificación.....	16
1.4.2 Mecanismos de inestabilidad.....	16
1.4.3 Métodos para cuantificar la estabilidad.....	18
CAPÍTULO 2 .....	21
ANTECEDENTES .....	21
2.1 Interacción polisacárido no iónico – tensioactivo no iónico.....	22
CAPÍTULO 3 .....	23
METODOLOGÍA.....	23
3.1 Diagrama de flujo .....	23
3.2 Materiales .....	23
3.3 Métodos.....	23
3.3.1 Caracterización de guar y Tween 20 .....	23
3.3.2 Determinación de humedad .....	23

3.3.3 Influencia de la concentración de guar y Tween 20 sobre la tensión superficial del agua.....	25
3.3.4 Preparación de emulsiones .....	25
3.3.5 Estabilidad de emulsiones .....	26
3.3.6 Tamaño de partícula por difracción láser .....	26
3.3.7 Observación por microscópica óptica .....	26
3.3.8 Influencia de la concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial a 25 °C de disoluciones de guar 0.75 g/100 g agua .....	27
CAPITULO 4 .....	28
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1 Caracterización de guar y Tween 20 .....	28
4.1.1 Pruebas de infrarrojo FT-IR de la guar .....	28
4.1.2 Pruebas de infrarrojo FT-IR de Tween 20 .....	29
4.1.3 Pruebas de análisis elemental de guar y Tween 20 .....	31
4.1.4 Pruebas de absorción atómica guar y Tween 20 .....	32
4.2 Influencia de concentración de guar sobre la tensión superficial del agua .....	32
4.3 Influencia de concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial del agua .....	34
4.4 Preparación de emulsiones .....	36
4.4.1 Estabilidad de emulsiones .....	37
4.4.2 Tamaño de partícula por difracción láser .....	38
4.4.3 Microscopia óptica .....	39
4.5 Influencia de la concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial de disoluciones con guar al 0.75 g/100 g de disolución. ....	40
CONCLUSIONES .....	42
REFERENCIAS .....	43
ANEXOS .....	49
ANEXO A .....	49

CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN MICELAR CRITICA (CMC) DEL TWEEN	
20.....	49
ANEXO B .....	51
CÁLCULO DEL EXCESO DE SUPERFICIE Y PROPORCIÓN DE TWEEN 20	
ADSORBIDA EN LA INTERFASE ACEITE-AGUA.....	51
ANEXO C .....	54
CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN MICELAR CRITICA (CMC) DE LA	
MEZCLA GUAR-TWEEN 20 (N=3) .....	54
ANEXO D.....	56
FICHA TÉCNICA DEL POLVO DE GUAR .....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Unidad repetitiva de la guar .....	7
Figura 1.2. Arreglo de un tensioactivo en agua.....	11
Figura 1.3. Formación de micelas al saturarse la superficie del líquido. .	11
Figura 1.4. Estructura química del Tween 20.....	13
Figura 1.5. Mecanismos que contribuyen a la inestabilidad de las emulsiones.....	16
Figura 1.6. Diagrama general de un analizador de partículas.....	19
Figura 3.1. Diagrama general de trabajo.....	24
Figura 3.2. Esquema de preparación de las emulsiones O/W cada una con 10 mL de aceite y 0.33 g de Tween 20 .....	25
Figura 4.1. Espectro FT-IR de guar .....	28
Figura 4.2. Unidad repetitiva de la guar (Guar Gum - DiChem, 2023)..	29
Figura 4.3. Espectro FT-IR de Tween 20.....	30
Figura 4.4. Estructura química de Tween 20.....	30
Figura 4.5. Influencia de concentración (g guar/100 g disolución) sobre la tensión superficial (mN/m) del agua a 23 °C.....	33
Figura 4.6. Influencia de concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial del agua a 23 °C. La intersección de las rectas de regresión es la concentración micelar crítica (CMC) del tensioactivo.....	34
Figura 4.7. Estabilidad de las emulsiones O/W con aceite 10 mL/100 mL, 0.33 g de Tween 20 producidas después de 48 h de su preparación.....	37
Figura 4.8. Tamaño de partícula $D(0.5) = 5.678$ mm de la emulsión C al tiempo cero.....	38
Figura 4.9. Micrografía óptica de la emulsión C observada a 100X al tiempo cero. Los números y las líneas blancas señalan las	

gotas seleccionadas para hacer la determinación del tamaño  
de las gotas ..... 39

Figura 4.10 Influencia de la concentración de Tween 20 sobre la tensión  
superficial de disoluciones con 0.75 g/100 g de guar a 25°C.  
CAC = Concentración de agregación crítica, CMC =  
Concentración micelar crítica..... 40



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Aplicaciones más comunes y generales de la guar en la industria de alimentos (Castañeda-Ovando et al., 2020).....	9
Tabla 4.1. Principales bandas de absorción de los espectros IR de la guar. ....	29
Tabla 4.2. Principales bandas de absorción de los espectros FTIR del Tween 20.....	31
Tabla 4.3 Análisis elemental (g/100 g) de guar.....	31
Tabla 4.4 Análisis elemental (g/100 g) promedio (n = 2) de Tween 20.....	31
Tabla 4.5. Contenido de elementos intrínsecos (mg/kg) de guar y Tween 20.....	32
Tabla 4.6. Concentración micelar crítica (CMC) y exceso de superficie ( $\Gamma$ ) de Tween 20.....	35

## RESUMEN

Se determinó la actividad de superficie del tensioactivo neutro Tween 20, del polisacárido guar y de sus mezclas en disolución acuosa mediante la medición de la tensión superficial a diferentes concentraciones de estos solutos. Asimismo, se examinó la estabilidad de emulsiones aceite en agua (O/W) para una concentración específica de Tween 20 y guar.

El aumento de la concentración de guar y Tween 20, por separado, mostró cambios en la tensión superficial del agua, indicando que ambos tienen actividad de superficie. La concentración micelar crítica (CMC) del Tween 20 en agua fue  $1.8 \times 10^{-4}$  mol/L y su exceso de superficie de acuerdo con la isoterma de adsorción de Gibbs fue  $5.57 \times 10^{-3}$  g/m<sup>2</sup>.

La cantidad de tensioactivo añadido a las emulsiones fue 0.33 g/100 g de agua. La emulsión preparada con guar al 0.75 g/100 g de agua resultó ser la más estable, y el diámetro mediano de las gotas, determinado por difracción láser, fue 5.678  $\mu$ m. Además, la observación en el microscopio mostró la presencia de floculación y pre-coalescencia simultánea en la emulsión inmediatamente después de preparada ( $t = 0$ ).

Finalmente, el efecto de la concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial en mezclas guar-Tween 20, no mostró claramente una concentración de agregación crítica (CAC) pero sí una concentración micelar crítica (CMC) de  $2.99 \times 10^{-4}$  mol/L.

## ABSTRACT

The surface activity of the neutral surfactant Tween 20, guar polysaccharide, and their mixtures in aqueous solutions was determined by measuring the surface tension at different concentrations of these solutes. Likewise, the stability of oil-in-water (O/W) emulsions was examined for a specific concentration of Tween 20 and guar. Increasing the concentration of guar and Tween 20, each at a time, showed changes in the surface tension of water, indicating that both have surface activity. The critical micellar concentration (CMC) of Tween 20 in water was  $1.8 \times 10^{-4}$  mol/L, and its surface excess, according to the Gibbs adsorption isotherm, was  $5.57 \times 10^{-3}$  g/m<sup>2</sup>. The amount of surfactant added to emulsions was 0.33 g/100 g of water. The emulsion prepared with 0.75 g/100 g water of guar was the most stable, and the median diameter of the oil droplets, determined by laser diffraction, was 5.678  $\mu$ m. Furthermore, observation under the microscope showed the presence of simultaneous flocculation and pre-coalescence immediately after the emulsion was prepared ( $t = 0$ ). Finally, the effect of the Tween 20 concentration on the surface tension in guar-Tween 20 mixtures did not show clearly a critical aggregation concentration (CAC) but a critical micelle concentration (CMC) of  $2.99 \times 10^{-4}$  mol/L.

## INTRODUCCIÓN

Las mezclas polisacárido-tensioactivo son usadas en una significativa cantidad de productos alimenticios, principalmente en emulsiones aceite-agua (O/W). En ellas el polisacárido actúa como agente espesante que aumenta la viscosidad de la fase acuosa, y el tensioactivo como estabilizante al adsorberse en la interfase agua-aceite. Sin embargo, persiste la necesidad de estudiar estos sistemas en el caso particular de alimentos porque la información disponible en reportes científicos está centrada en tensioactivos de uso no alimentario. Por ejemplo, existe abundante información (Bao et al., 2008; Chiappisi y Gradzielski, 2015) para los tensioactivos iónicos, uno de los más utilizados en la práctica es el dodecil sulfato de sodio en mezclas con polisacáridos, principalmente quitosano, pero estas combinaciones no tienen aplicación en alimentos.

El polisacárido no iónico guar es un galactomanano formado por un esqueleto de manosa con pequeñas ramificaciones de galactosa. Las ramificaciones pueden ser homogéneas o aleatorias. Tiene moderada capacidad espesante y se usa en muchos alimentos en los que no se requiere una viscosidad elevada para evitar problemas de flujo. En fechas recientes su consumo se ha favorecido en productos libres de gluten con funciones específicas de espesante moderado. Se obtiene del endospermo molido de la semilla de la planta guar *Cyamopsis tetragonoloba* (Thombare et al., 2016).

El monolaurato de polioxietilensorbitano conocido también como Tween 20 es un tensioactivo no iónico muy usado en alimentos para estabilizar emulsiones O/W debido a su alto balance lipofílico-hidrofílico (BHL = 16.7) (Ószi y Pethó, 1998). Se obtiene como derivado de la mezcla de óxido de etileno, sorbitol y ácido láurico.

En esta tesis se analizó la interacción guar-Tween 20. Se escogió la mezcla de ambos componentes porque son neutros y de esa manera se evitan las complicaciones inherentes a la presencia de interacciones electrostáticas que ocurrirían entre polisacáridos y surfactantes iónicos. Además, ambos son de uso alimentario y su mezcla podría ser útil en emulsiones O/W. Se prepararon disoluciones de guar y Tween 20 por separado para conocer sus propiedades interfaciales y de este modo obtener la proporción adecuada para la mezcla guar-Tween 20. Se examinó la capacidad estabilizante de esta mezcla en emulsiones O/W.

## **HIPÓTESIS**

La variación de la concentración de tensioactivo, polisacárido, y la isoterma de Gibbs permitirán determinar la proporción adecuada para la mezcla guar-Tween 20 que permita obtener emulsiones O/W estables.

## **OBJETIVO GENERAL**

Examinar las propiedades interfaciales de la guar y el Tween 20 en disolución acuosa individual para establecer la proporción adecuada de la mezcla guar-Tween 20 y obtener emulsiones O/W estables.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Examinar el efecto de la concentración de la guar sobre la tensión superficial en agua a temperatura ambiente para saber si muestra actividad de superficie.

Examinar el efecto de la concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial en agua a temperatura ambiente para obtener su concentración micelar crítica (CMC) y el exceso de superficie de la isoterma de Gibbs.

Determinar la estabilidad de emulsiones aceite en agua (O/W) con diferentes concentraciones de guar para definir la proporción de los componentes en las mezclas guar-Tween 20

Determinar el efecto de la concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial de una disolución de guar de concentración constante a temperatura ambiente para obtener la concentración de agregación crítica (CAC) y la CMC de la mezcla guar-Tween 20.

# **CAPÍTULO 1**

## **ASPECTOS GENERALES**

### **1.1 Polisacáridos**

Los polisacáridos son polímeros formados por la unión de moléculas de monosacáridos que están unidas mediante enlaces glucosídicos. Los polisacáridos de origen natural por lo regular producen dispersiones de pequeño tamaño coloidal, sin color, ni aroma, ni sabor. Están altamente polimerizados, son insolubles en alcohol y otros disolventes orgánicos, pero muy solubles en agua. Se encuentran como cadenas lineales o ramificadas, que a su vez pueden estar integradas por un solo tipo de monosacárido, homopolisacárido, como el almidón y la celulosa o por varios tipos de monosacáridos, heteropolisacárido, como sucede con la mayoría de ellos (Badui, 2006).

Los polisacáridos solubles en agua y modificados utilizados en alimentos y otras aplicaciones industriales se comercializan en forma de polvo de diversos tamaños de partícula (Fennema, 2000). Los polisacáridos son solubles en agua y por ello pueden ser extraídos de plantas, algas o producidos por cultivos microbianos o de derivados de polímeros naturales que se someten a alguna transformación física o química (Pasquel, 2001; Badui, 2006). Los polisacáridos se utilizan mayormente para espesar y gelificar disoluciones acuosas, para modificar y controlar las propiedades de flujo y la textura de los alimentos líquidos y las bebidas, así como para modificar las propiedades de deformación de productos semisólidos. En los productos alimenticios se usan por lo general en concentraciones de 0.25 a 0.50 g/100 g lo que indica su gran capacidad de producir viscosidad y formar geles (Fennema, 2000).

### 1.1.1 Guar

La guar es un polisacárido neutro soluble que se obtiene del endospermo molido de la semilla leguminosa *Cyamopsis tetragonoloba* (Thombare et al., 2016). La guar comercial de grado alimentario es en polvo que contiene alrededor del 80 % de galactomanano guar, 5–6 % de proteína cruda, 8–15 % de humedad, 2.5 % de fibra cruda, 0.5–0.8 % de ceniza y pequeñas cantidades de lípidos compuestos principalmente por ácidos grasos y vegetales esterificados; su masa molar es variada, pero el promedio se considera de 220 000 g/mol, su densidad es de 0.8-1.0 g/mL a 25 °C. Es soluble en agua a temperatura ambiente e insoluble en disolventes orgánicos como aceites, grasas, hidrocarburos, cetonas y ésteres (Fennema, 2000; Roberts, 2011; Mortensen et al., 2017, Castañeda-Ovando et al., 2020).

La guar se describe como un galactomanano formado por una cadena de unidades  $\beta$ -D manopiranosas unidas por enlaces (1-4) con ramificaciones  $\alpha$ -D galactopiranosas unidas por enlaces (1-6). La guar tiene una galactosa por cada dos manosas como se muestra en la Figura 1.1 (Fennema, 2000; Roberts, 2011; Thombare et al., 2016).

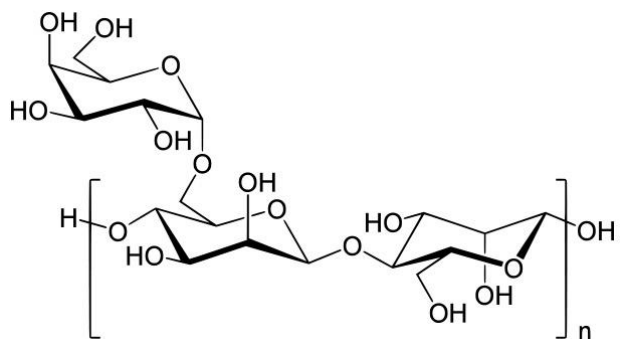


Figura 1.1. Unidad repetitiva de la guar (Guar Gum - DiChem, 2023).



La estructura molecular de la guar abundante en grupos hidroxilo, forma redes tridimensionales mediante puentes de hidrógeno cuando se agrega al agua. Las redes se establecen entre las moléculas de manosa y galactosa, entre las cuales queda inmersa el agua formando un hidrocoloide muy estable (Mudgil et al., 2014; Thombare et al., 2016). La guar se disuelve completamente en agua a temperatura ambiente, produciendo alta viscosidad; sin embargo, no gelifica (Pasquel, 2001). La falta de grupos ionizables la hace prácticamente inalterable a los cambios de pH, en el intervalo 1.0-10.5, pero su máxima capacidad de hidratación se alcanza a pH entre 7.5-9.0. La adición de altas concentraciones (> 5.0 g/100 g) de sales multivalentes provoca la gelificación, pero se ve poco afectada porque está conformada por azúcares neutros (Fennema, 2000). La viscosidad se debe a la interacción de la cadena lateral de galactosa de la molécula de guar con la molécula de agua. Por ello, el aumento en la concentración de guar mejora la interacción de la cadena intermolecular que conduce a un aumento en la viscosidad (Banerjee y Bhattacharya, 2012).

La guar se utiliza como aditivo en forma de polvo o harina en la industria alimentaria, farmacéutica, papelera, textil, de explosivos, de perforación de pozos petroleros y cosmética debido a su capacidad para formar enlaces de hidrógeno con la molécula de agua y así impartir viscosidad y espesamiento significativos a la disolución; por lo tanto, su función principal es como espesante y estabilizante (Mudgil et al., 2011).

En la industria de alimentos es uno de los hidrocoloides más baratos que benefician a la salud aportando fibra dietética y es además de origen natural. Se usa como aditivo alimentario debido a su capacidad de poder ligar una gran cantidad de agua, estabilizar emulsiones, hidratar, espesar, suspender sólidos en muchos sistemas líquido-sólido (Mudgil et al., 2011, Thombare et al., 2016), como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Aplicaciones más comunes y generales de la guar en la industria de alimentos (Castañeda-Ovando et al., 2020).

Alimento	Contenido (%)	Función
Chapati	0-75	Generar blandura
Pan	0.5	Generar blandura y volumen
Productos fríos	0.5-1.0	Reducir la absorción de aceite
Yogurt	2.0	Mejorar textura
Pasteles	0.15	Aumentar firmeza
Chorizo	0.13-0.32	Generar blandura
Pasta	1.5	Mejorar textura
Helado	0.5	Generar cristales de hielo más pequeños
Alimentos horneados	0.8-1.0	Aumentar firmeza de masas
Salsa de tomate (Ketchup)	0.5-1.0	Mejorar consistencia

En la industria láctea, la guar mejora el cuerpo, la textura, la masticabilidad, la resistencia al choque térmico y previene la formación de cristales de hielo en productos congelados como el helado. En el yogurt disminuye la sinéresis, mejora las propiedades texturales y reológicas. En la industria cárnica la guar se utiliza como aglutinante y lubricante en la fabricación de embutidos, tiene funciones específicas, por ejemplo: rápida absorción y ligante de agua libre durante el proceso de productos a base de carne molida, permite buena viscosidad dándole estabilidad y como resultado el producto tiene una apariencia uniforme y al momento en que es rebanado, retiene su humedad por más tiempo conservando una apariencia fresca. En la industria de la panificación la presencia de la guar en la masa para hacer pasteles, galletas entre otros productos mejora la maquinabilidad de la masa que se retira con facilidad del molde y se puede rebanar fácilmente sin desmoronarse; la adición de guar a la masa de pan de trigo incrementa el volumen de pan en la cocción. En la industria de salsas, aderezos y condimentos la guar se utiliza debido a su capacidad

de dispersión en agua a temperatura ambiente, actuando como un estabilizante de emulsión ya que aumenta la viscosidad de la fase acuosa y disminuye la velocidad de separación de las fases. En salmueras funciona como espesante, específicamente en salsas de tomate aumenta la consistencia del producto de forma más eficiente que otros hidrocoloides (Castañeda-Ovando et al., 2020).

## **1.2 Tensioactivos**

Los tensioactivos, también llamados agentes de superficie son moléculas anfifílicas, es decir, que la misma molécula tiene una parte no polar o hidrófoba y una polar o hidrófila. La parte hidrófoba o cola suele estar compuesta por una o varias cadenas hidrocarbonadas, mientras que la parte hidrófila o cabeza puede presentar grupos con o sin carga eléctrica.

Los tensioactivos se clasifican de acuerdo con la naturaleza química de los grupos polares de su cabeza, por ejemplo, los tensoactivos con carga negativa en su grupo de cabeza se conocen como aniónicos, mientras que los catiónicos están cargados positivamente, a los que no presentan carga se les denomina no iónicos o neutros y los que son eléctricamente neutros, pero tienen cargas formales positivas y negativas se les denomina zwitteriónicos o anfotéricos (García Carmona, 2019; Campos Fabregat, s/f).

Los tensioactivos cuando se disuelven en agua o en otro disolvente tienden a orientarse en la interfase entre el líquido y una segunda fase que puede ser sólida, líquida o gaseosa, modificando la tensión superficial y conforme aumenta la concentración del tensioactivo las moléculas se acomodan en forma de monocapa superficial (Figura 1.2) con la cabeza

polar hacia el agua y la cadena hidrocarbonada hacia la otra fase (Novelo-Torres y Gracia-Fadrique, 2005; Gil Muíño, 2014).

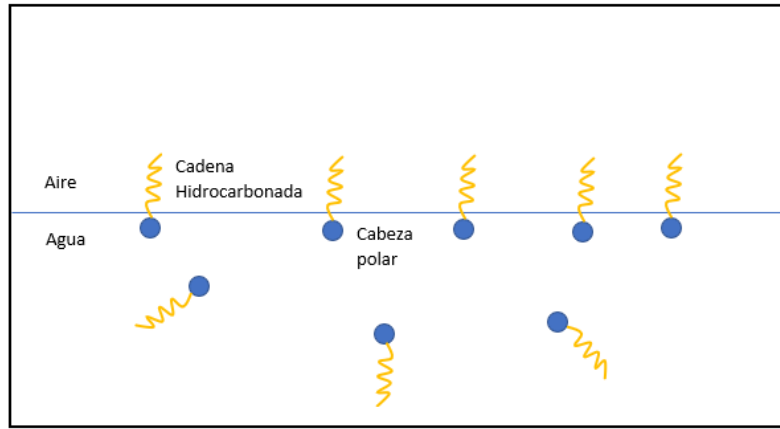


Figura 1.2. Arreglo de un tensoactivo en agua (Cabanés, 2014).

Cuando la superficie de la disolución se encuentra totalmente ocupada por el tensoactivo, las moléculas que se encuentran en el interior de la disolución recurren a una segunda alternativa energética, que consiste en la agregación espontánea o formación de micelas en disolución (Figura 1.3).

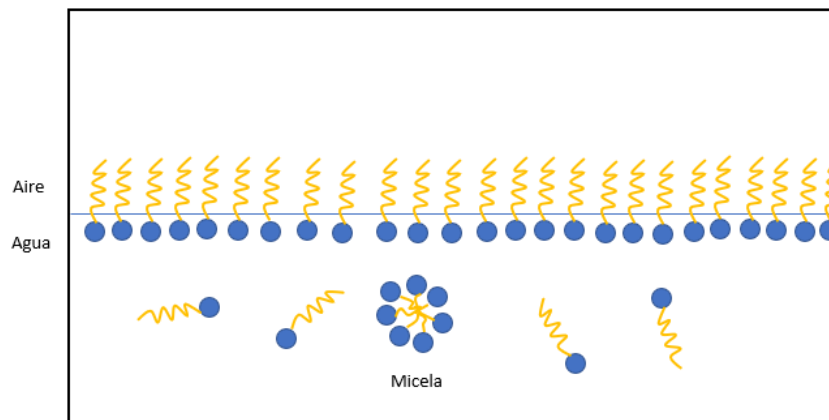


Figura 1.3. Formación de micelas al saturarse la superficie del líquido (Cabanés, 2014).

En las micelas los grupos polares se reúnen adoptando una forma esférica sobre las cadenas hidrocarbonadas, estado que tiene una energía mínima. Las micelas distribuidas en el interior del líquido mantienen un equilibrio con las moléculas libres del tensioactivo en disolución y en la superficie. Esta descripción cualitativa surge de la ecuación fundamental de la termodinámica de superficies llamada isoterma de absorción de Gibbs en fases fluidas, ecuación (1), referida a la adsorción líquido-vapor y a la observación del comportamiento de la tensión superficial de tensioactivos en disolución al variar la concentración. Esta ecuación está expresada en términos del potencial químico ideal de la disolución.

$$\Gamma = \frac{x}{RT} \left( \frac{d\pi}{dx} \right)_T \quad (1)$$

En esta ecuación  $\Gamma$  es el exceso de superficie del tensioactivo en mol/m<sup>2</sup>,  $x$  es la fracción mol de tensioactivo en la disolución,  $R$  es la constante de los gases en J/K·mol,  $T$  es la temperatura absoluta en K y  $\pi$  es la presión superficial de la disolución en mN/m dada por la diferencia de la tensión superficial del líquido puro y la correspondiente de la disolución ( $\sigma_0 - \sigma$ ). La ecuación (1) indica que  $\Gamma$  depende de la concentración de la disolución y de la variación local de la presión superficial con respecto a la composición de la disolución, bajo condiciones isotérmicas. Si la ecuación (1) se expresa en términos de  $\ln x$  la acumulación molecular superficial es aún más evidente

$$\Gamma = \frac{1}{RT} \left( \frac{d\pi}{d \ln x} \right)_{p,T} \quad (2)$$

En esta ecuación el exceso de superficie,  $\Gamma$ , depende solamente de la derivada (Novelo Torres y Gracia Fadrique, 2005).

### 1.2.1 Tween 20

El polisorbato 20 o monolaurato de sorbitan polioxietilenado, llamado comercialmente Tween 20, es un tensioactivo no iónico (Kerwin, 2008). Se obtiene como derivado de la mezcla de óxido de etileno, sorbitol y ácido láurico (Anónimo s/f). El Tween 20 está formado por un anillo de sorbitán con polímeros de óxido de etileno en tres diferentes posiciones en las que se ubican los grupos hidroxilo, mientras que el número de repetición de las subunidades de óxido de etileno varía en cada posición siendo su número total  $w + x + y + z = 20$  (Figura 1.4). También está formado por un ácido graso, ácido láurico ( $C_{12}H_{24}O_2$ ) que se une a la molécula del tensioactivo a través de un enlace éster con el oxígeno del óxido de etileno en posición  $z$  (Kerwin, 2008, Kotheke et al., 2007).

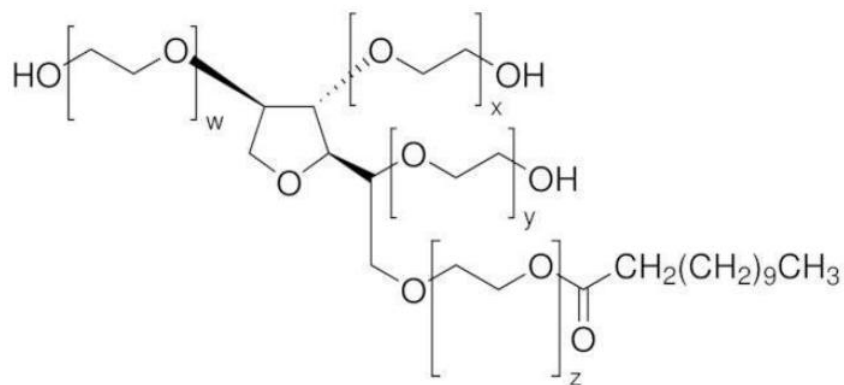


Figura 1.4. Estructura química del Tween 20.  $w + x + y + z$  se refiere al número total de subunidades de oxietileno y no puede exceder de veinte (Winarni y Maulidina, 2018).

Se utiliza en alimentos para estabilizar emulsiones debido a que posee un balance lipofílico-hidrofóbico de 16.7 (Kotheke et al., 2007; Ószi y Pethő, 1998). Las emulsiones de aceite en agua (O/W) se estabilizan con tensioactivos hidrofílicos (Kotheke et al., 2007). El BHL (balance hidrófilo lipófilo) indica la tendencia dominante, hidrófila o lipófila de un

emulsionante en una formulación; los emulsionantes con número HBL entre 8 y 18 se recomiendan para formar emulsiones aceite en agua (O/W) (Muñoz et al., 2007).

### **1.3 Interacciones polisacárido-tensioactivo**

Los polisacáridos y tensioactivos se añaden a los alimentos preparados básicamente para mejorar la estabilidad de un sistema alimentario. La función principal del polisacárido es gestionar las propiedades reológicas, principalmente la viscosidad, mientras que la del tensioactivo es gestionar las propiedades interfaciales, es decir, tensión superficial.

Cuando se combinan polisacáridos y tensioactivos pueden ocurrir efectos indeseables y la estabilidad del sistema puede verse afectada, por ejemplo, la incompatibilidad y la formación de complejos polisacárido-tensioactivo pueden eventualmente conducir a la separación de fases. Las interacciones polisacárido-tensioactivo dependen fuertemente de las propiedades del polisacárido, del tipo de tensioactivo, de sus respectivas concentraciones y proporciones en la mezcla y de las condiciones ambientales del medio acuoso como pH, fuerza iónica y temperatura. Los sistemas con interacciones polisacárido-tensioactivo se pueden representar por dos concentraciones críticas: la concentración de agregación crítica (CAC) y la concentración micelar crítica (CMC) (Bais et al., 2005; Ortiz-Tafoya, 2019).

#### **1.3.1 Concentración de agregación crítica (CAC)**

La concentración de agregación crítica (CAC), es la concentración de tensioactivo en la que las moléculas de este comienzan a unirse con las moléculas del polisacárido, por lo que representa el inicio de la formación del complejo de agregación polisacárido-tensioactivo, fenómeno o evento

durante el cual la tensión superficial no varía aun cuando se continúe adicionando tensioactivo (Bao et al.,2008; Ortiz-Tafoya, 2019; Hernández-Escalona et al., 2020).

### **1.3.2 Concentración micelar critica (CMC)**

La concentración micelar critica (CMC) es la concentración de tensioactivo en la que el tensioactivo solo o en mezcla con el polisacárido satura la interfase. Entonces, se aleja de la misma y forma agregados llamados micelas. Esta concentración se alcanza al aumentar la concentración del tensioactivo (Bao et al., 2008; Ortiz-Tafoya, 2019; Hernández-Escalona et al., 2020).

### **1.4 Emulsiones**

Las emulsiones son un tipo de sistema disperso formado por dos líquidos inmiscibles, generalmente aceite y agua, en el que uno de los líquidos se encuentra disperso como pequeñas gotas esféricas, fase dispersa, en el otro, fase continua. Un sistema que consta de gotas de aceite en una fase acuosa se denomina emulsión aceite en agua (O/W) y un sistema que consta de gotas de agua dispersas en una fase de aceite se denomina emulsión de agua en aceite (W/O) (McClements, 2005). Para formar una emulsión se necesita inmiscibilidad entre las fases, agitación para dispersar un líquido en otro y un tensioactivo que estabilice el sistema ya que en su ausencia la fase dispersa coalesce rápidamente y en su presencia la emulsión puede presentar cierta segregación por efecto de la gravedad, pero la coalescencia de las gotas es notablemente retardada aun cuando se toquen (Aranberri et al., 2010; Campos Fabregat, s/f).



### 1.4.1 Emulsificación

La formación de la emulsión se llama emulsificación y es un proceso dinámico que requiere una considerable cantidad de energía mecánica para dispersar uno de los líquidos en forma de pequeñas gotas en la fase continua (Akbari & Nour, 2018).

### 1.4.2 Mecanismos de inestabilidad

Existen varios mecanismos fisicoquímicos que pueden ser responsables de las alteraciones en las propiedades de las emulsiones por lo que es necesario establecer cuáles de esos mecanismos son importantes en el sistema particular bajo consideración antes de que se puedan desarrollar estrategias efectivas para mejorar la estabilidad (McClements, 2005). En la Figura 1.5 se identifican esquemáticamente varios de los mecanismos físicos más comunes responsables de la inestabilidad de las emulsiones.

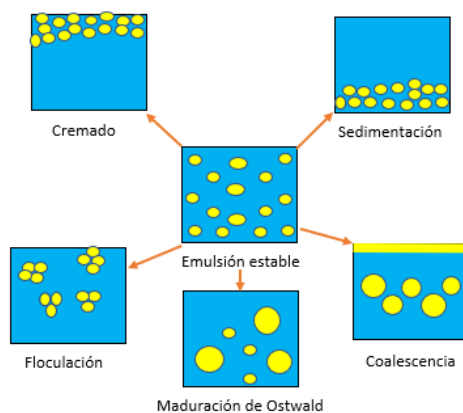


Figura 1.5. Mecanismos que contribuyen a la inestabilidad de las emulsiones (Triana, 2018).

El cremado y la sedimentación son fenómenos causados por la acción de la gravedad, las emulsiones O/W tienden al cremado debido al

movimiento ascendente de las gotas ya que tienen una densidad menor que la del líquido circundante, mientras que las emulsiones W/O tienden a la sedimentación que describe el movimiento descendente de las gotas debido a que tienen una densidad más alta que el líquido circundante.

Por otra parte, la floculación y la coalescencia son eventos de agregación de gotas. La floculación ocurre cuando dos o más gotas se unen sin fusionarse para formar un agregado en el que no existe una variación en la distribución del tamaño de las gotas, separándose por una capa de tensioactivo o polisacárido. Este evento está controlado por un equilibrio global entre las fuerzas de atracción electrostáticas y de van der Waals, y repulsivas de tipo estéricas y de hidratación.

La coalescencia es el fenómeno por el cual dos o más gotas se fusionan para formar una sola gota más grande, la coalescencia extensa de gotas puede conducir a la formación de una capa separada de aceite sobre una muestra, lo que se conoce como "cremado".

La maduración de Ostwald ocurre debido al crecimiento de las gotas más grandes a costa de las más pequeñas hasta que estas últimas prácticamente desaparecen. Este fenómeno ocurre a una tasa que es función de la solubilidad de la fase dispersa en la fase continua ya que la presión interna de las gotas es mayor en las gotas más pequeñas.

Los fenómenos anteriores pueden ocurrir de forma simultánea y no de forma consecutiva, lo que a la vez complica su análisis. También es necesario mencionar que existen varios procesos químicos, bioquímicos y microbiológicos que se producen en las emulsiones alimentarias que igual pueden afectar negativamente su vida útil y calidad, por ejemplo, oxidación de lípidos, hidrólisis enzimática y crecimiento bacteriano (McClements, 2005; Aranberri et al., 2010; García Carmona, 2019).

### **1.4.3 Métodos para cuantificar la estabilidad**

Las técnicas comúnmente utilizadas para detectar la desestabilización física de las emulsiones son: a simple vista o con instrumentos analíticos más precisos como la difracción de luz o microscopia, pero la mayor limitación para la utilización de estos métodos es que carecen de confiabilidad para el estudio de las emulsiones en tiempo real (McClements, 2005).

### **1.4.4 Tamaño de partículas por difracción laser**

La determinación del tamaño de partículas es una técnica que permite conocer el tamaño y distribución de las partículas de muestras nanométricas hasta milimétricas. El equipo permite determinar el tamaño de las partículas en un intervalo de 0.02 a 2000  $\mu\text{m}$  para polvos, sólidos en suspensión, emulsiones y suspensiones, la cual se puede realizar por vía seca o vía húmeda, dependiendo de la muestra a medir (Mastersizer, 2007). En la difracción láser (Figura 1.6) el rayo expandido atraviesa la muestra que está contenida en una celda que tiene una ventana por la cual pasa el láser. El porta muestra tiene una leve inclinación con el fin de que los rayos reflejados de laser no retornen a su fuente, la muestra junto con el medio de dispersión se agita previamente para romper aglomerados y separar partículas para analizarlas en forma individual. La luz proveniente de la muestra pasa a través de lentes transformadores que la convierten en una imagen y la proyectan sobre un arreglo discreto de diodos detectores. Por último, la señal del detector se manda a fotodiodos que se encuentran en una cámara receptora donde se realiza la medida del tamaño de la partícula. El equipo Mastersizer está acoplado a un ordenador que utiliza un programa que mediante modelos empíricos

convierte la intensidad de la luz, en una curva de distribución de partículas (González y Burgos, 2006).

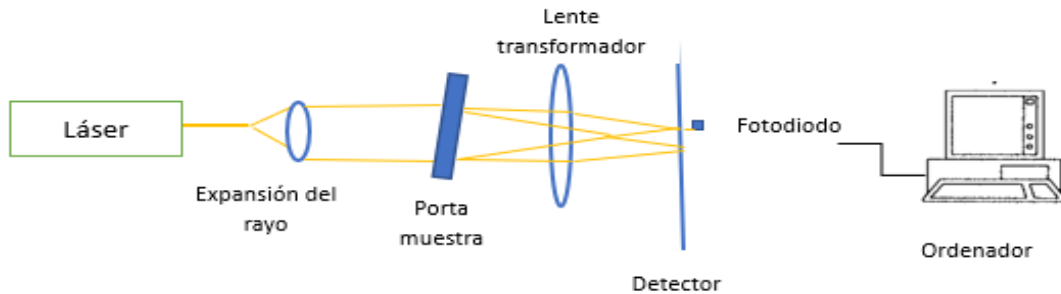


Figura 1.6. Diagrama general de un analizador de partículas (Elaboración propia).

## 1.5 Microscopia óptica

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

Un microscopio óptico tiene una serie de lentes que dirigen la luz a través de la muestra y amplían la imagen resultante. La resolución del microscopio óptico está determinada por la longitud de onda de la luz utilizada y el diseño mecánico del instrumento. Teóricamente la resolución límite de un microscopio óptico es de  $0.2 \mu\text{m}$ , pero en la práctica es difícil obtener mediciones confiables por debajo de  $1 \mu\text{m}$  debido a las dificultades técnicas asociadas con el diseño y manufactura de los componentes del microscopio y por el movimiento Browniano de las partículas pequeñas causando que las imágenes aparezcan borrosas. Su aplicación es limitada en muchas emulsiones alimenticias porque éstas

contienen estructuras con tamaños inferiores al límite de su resolución, pero puede proveer valiosa información acerca de la distribución de tamaño en las emulsiones que contienen glóbulos grandes por lo que puede ser utilizado para distinguir entre floculación y coalescencia (McClements, 2005).

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

Persiste la necesidad de estudiar los sistemas polisacárido-tensioactivo en el caso particular de alimentos porque la información disponible en reportes científicos está centrada en tensioactivos de uso no alimentario. Por ejemplo, existe abundante información para el dodecil sulfato de sodio, y tensioactivos halogenados en mezclas con polisacáridos, principalmente quitosano, pero estas combinaciones no tienen aplicación en alimentos.

Existen reportes sobre interacciones polisacárido-tensioactivo en disoluciones acuosas con metilcelulosa (MC), quitosano (CS) y  $\kappa$ -carragenina ( $\kappa$ C) como polisacáridos neutro, catiónico y aniónico, respectivamente, en mezclas con dodecil sulfato de sodio (SDS), bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) como tensioactivos aniónico y catiónico, respectivamente. Las seis combinaciones estudiadas fueron MC-SDS, MC-CTAB, CS-SDS, CS-CTAB,  $\kappa$ C-SDS y  $\kappa$ C-CTAB (Bao et al., 2008). El polisacárido no iónico guar se ha mezclado con el tensioactivo aniónico lauril éster sulfato de sodio (SLES) y se afirma que su interacción puede ser de interés para aplicaciones industriales ya que se forman estructuras con propiedades interfaciales con un polímero seguro para uso humano (de Seixas-Junior et al., 2020). Sin embargo, no se menciona su aplicación en alimentos porque el tensioactivo SLES se usa en la producción de productos de limpieza, cosméticos y de higiene personal.

En el caso del monolaurato de polioxietilensorbitano, Tween 20, se ha reportado su interacción con la  $\kappa$ -carragenina para producir emulsiones en gel. La adición de Tween 20 a la  $\kappa$ -carragenina no tuvo efectos

significativos en ninguna de las concentraciones analizadas lo cual pudo deberse a la naturaleza del tensioactivo (Ortiz Tafoya, 2019).

## **2.1 Interacción polisacárido no iónico – tensioactivo no iónico**

Kokol (2002a; 2002b) publicó dos artículos sobre las interacciones que se producen entre los componentes individuales de una pasta de impresión compuesta de guar, un colorante birreactivo bifuncional y cinco tensioactivos no iónicos con estructuras de óxido de etileno, individualmente. En el primer artículo se estudió la actividad superficial y el comportamiento reológico de diferentes disoluciones, mientras que en el segundo utilizó la cromatografía de exclusión por tamaño (SEC) para determinar las interacciones mencionadas. Se examinaron las interacciones entre la guar y los tensioactivos no iónicos y después las interacciones entre la guar, el tensioactivo y el colorante reactivo. Se determinó que se producen y son predominantes interacciones hidrófilas fuertes entre la guar y los tensioactivos no iónicos. El tensioactivo altamente hidrofóbico no interactúa fuertemente con la guar y el tensioactivo muy hidrofílico conduce a una separación de fases, por lo que la adición de un colorante reactivo en la mezcla de tensioactivo-guar disminuye las interacciones hidrofílicas entre el tensioactivo y la guar debido a la interacción entre el tensioactivo y el colorante reactivo.

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Diagrama de flujo**

La Figura 3.1 muestra las etapas en las que consistió la parte experimental de esta tesis.

#### **3.2 Materiales**

Guar en polvo (Ingredion México, S.A de C.V.), Tween 20 líquido (Hycel de México, S.A de C.V), aceite de maíz Mazola® (Unilever de México) y agua desionizada.

#### **3.3 Métodos**

##### **3.3.1 Caracterización de guar y Tween 20**

Las pruebas de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR), absorción atómica y análisis elemental de la guar y el Tween 20 se hicieron en la USAII-FQ.

##### **3.3.2 Determinación de humedad**

La humedad de la guar se determinó en una termobalanza (Ohaus, USA) de acuerdo con la metodología NMX-F-428-1982. La humedad promedio ( $n = 4$ ) fue  $9.93 \pm 0.39$  g/100 g y se tomó en cuenta para preparar las disoluciones con una concentración de 0.75 g/100 g.



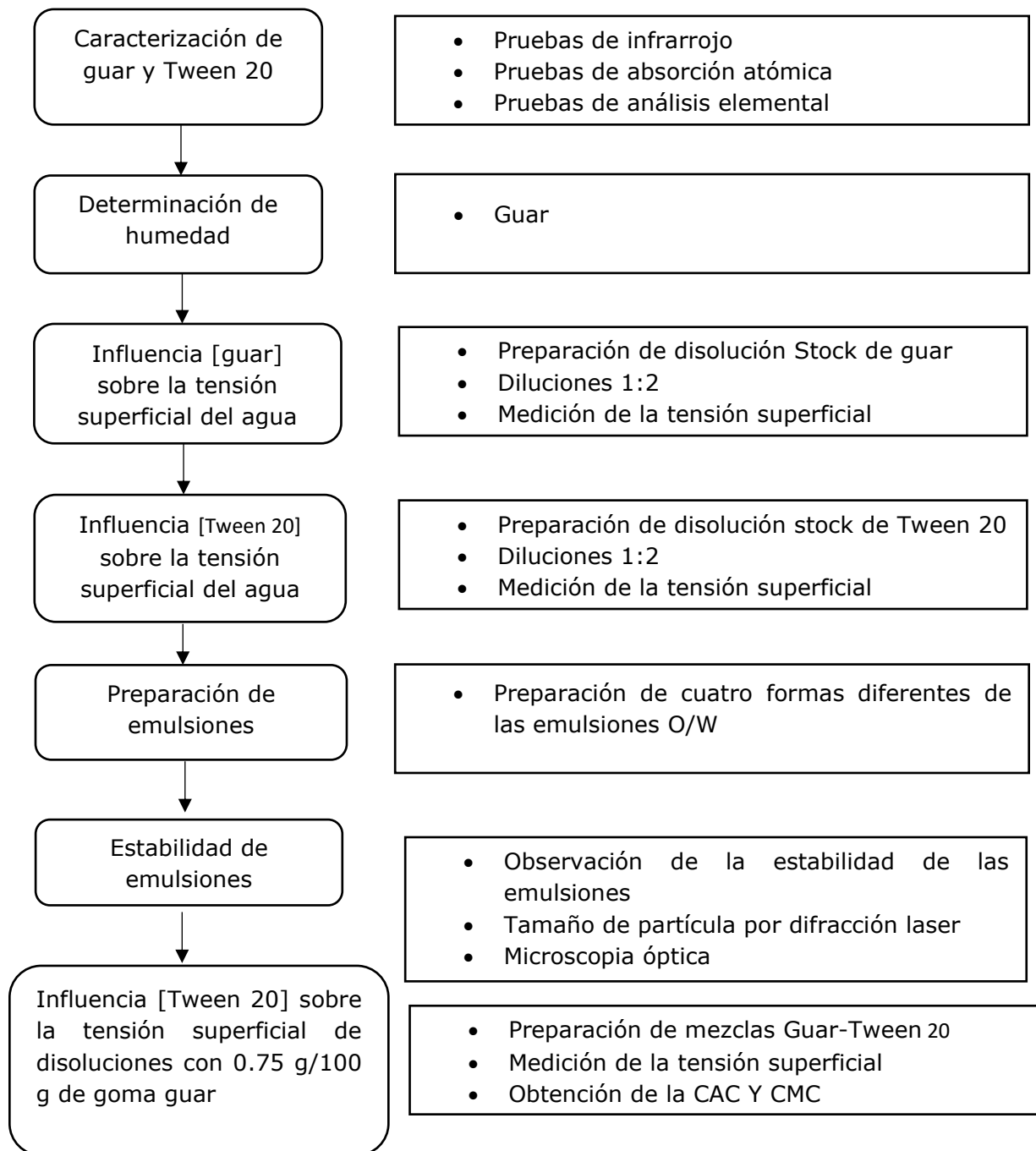


Figura 3.1. Diagrama general de trabajo.

### 3.3.3 Influencia de la concentración de guar y Tween 20 sobre la tensión superficial del agua

Se preparó una disolución stock de guar dispersando 0.56 g de polvo de guar en 49.44 g de agua desionizada. La dispersión se agitó durante 4 h a temperatura ambiente. También se preparó otra disolución stock con 0.5 g de Tween 20 líquido en 49.5 g de agua desionizada. Ambas disoluciones stock se diluyeron por separado 1:2 y después de 18 h se midió su tensión superficial (mN/m) a 25 °C en un micro-tensiómetro (Kibron EZPiplus, Finland) de acuerdo con procedimientos establecidos (Wu et al., 2009; Ortiz-Tafoya y Tecante, 2018).

### 3.3.4 Preparación de emulsiones

Las emulsiones O/W se prepararon de cuatro formas distintas como se muestra en la Figura 3.2.

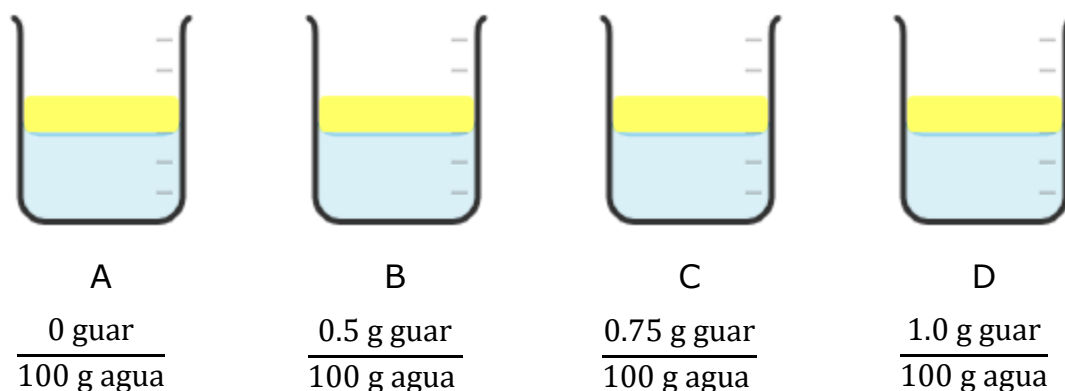


Figura 3.2. Esquema de preparación de las emulsiones O/W cada una con 10 mL de aceite y 0.33 g de Tween 20.

El volumen de la fase acuosa, la oleosa y la cantidad de Tween 20 permanecieron constantes. Las emulsiones se homogeneizaron a 12000

rpm por 30 s con un equipo de dispersión (IKA®T25 digital ULTRA-TURRAX ®).

### **3.3.5 Estabilidad de emulsiones**

Los recipientes con cada emulsión se cubrieron y se observaron para determinar el tiempo de separación de fases como índice de estabilidad. La condición C (Figura 3.2) fue la más estable y en consecuencia se preparó una disolución de guar y tween 20 con 0.75 g/100 g agua y 0.33 g/100 g agua, respectivamente, para medir su tensión superficial. Asimismo, la estabilidad de la emulsión C se determinó midiendo el tamaño de gota de aceite por difracción laser, y se observó en microscopía óptica.

### **3.3.6 Tamaño de partícula por difracción láser**

Esta prueba se llevó a cabo en la USAII-FQ 30 min después de haber preparado la emulsión. La determinación se hizo en un analizador de tamaño de partículas Mastersizer modelo 2000 (Malvern, UK) con el accesorio para líquidos Hydro2000S (A). Se usó un índice de refracción de 1.52, una absorción de 0.1, sensibilidad normal y una obscuración de 13.46 a 13.52 %.

### **3.3.7 Observación por microscópica óptica**

La estabilidad de la emulsión se observó en un microscopio óptico (Olympus, Mod. BX45, Japan) provisto de cámara fotográfica. Se midió la distribución de tamaño (DT) en las imágenes capturadas mediante el software Image-Pro Plus inmediatamente después de haber preparado la

emulsión. Se depositó una cantidad adecuada de emulsión sobre un portaobjetos, se colocó el cubreobjetos y se hizo la observación con el lente 100X.

### **3.3.8 Influencia de la concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial a 25 °C de disoluciones de guar 0.75 g/100 g agua**

Se preparó una disolución stock con 0.5 g de Tween 20 líquido en 49.5 g de agua desionizada. Una masa de 25 g de la disolución stock T20 se diluyó en 25 g agua. La disolución resultante se diluyó de igual manera y así sucesivamente para obtener concentraciones de tensioactivo en el intervalo de  $1.56 \times 10^{-5}$  a  $7.98 \times 10^{-3}$  mol/L de disolución. También se preparó una disolución de con 0.75 g guar en 100 g de agua desionizada a temperatura ambiente con agitación constante. A cada dilución de Tween 20 se le añadió 0.75 g de guar y después de 18 h se midió su tensión superficial (mN/m) a 25 °C en un micro-tensiómetro (Kibron EZPiplus, Finland) y sus tensiones superficiales fueron determinadas en función de la concentración de Tween 20.

# CAPITULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización de guar y Tween 20

#### 4.1.1 Pruebas de infrarrojo FT-IR de la guar

La Figura 4.1 muestra el espectro infrarrojo de la guar. Las señales del espectro se muestran en la Tabla 4.1 en referencia a la unidad repetitiva de la guar que se muestra en la Figura 4.2. Esta tabla muestra las bandas de absorción características de este polisacárido las cuales coinciden con varios estudios (López-Franco et al., 2013; Mingzhe et al., 2017; Yantao et al., 2020).

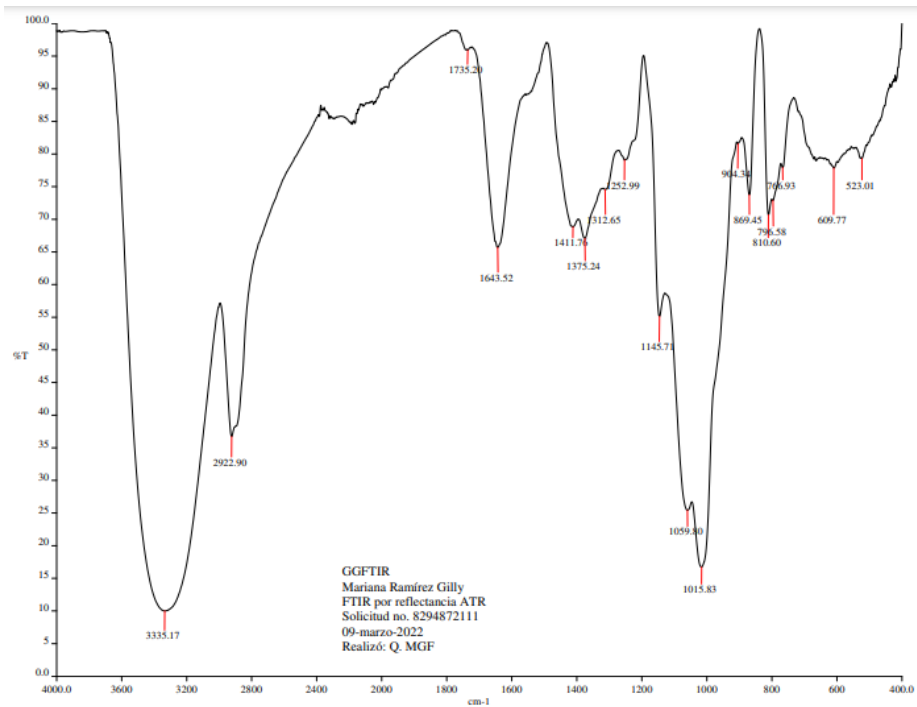


Figura 4.1. Espectro FT-IR de guar.

Tabla 4.1. Principales bandas de absorción de los espectros IR de la guar.

Absorción (cm <sup>-1</sup> )	grupo funcional
3335.17	Vibración de estiramiento -OH y NH-
2922.90	Vibración de estiramiento CH
1643.52	Vibración de estiramiento asimétrico de CO
1015.83	Vibración de estiramiento C-O-C y C-O-H
869.45- 810.60	Presencia de manosa y anómeros de α y β en guar, se infiere como azúcar α-D- galactopiranosas y β-D-manosa

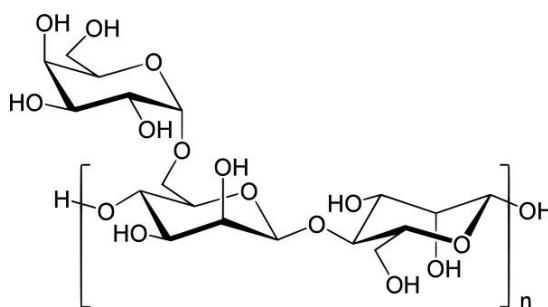


Figura 4.2. Unidad repetitiva de la guar (Guar Gum - DiChem, 2023).

#### 4.1.2 Pruebas de infrarrojo FT-IR de Tween 20

La Figura 4.3 muestra el espectro infrarrojo del tensioactivo cuya estructura se muestra en la Figura 4.4. Las señales del espectro se muestran en la Tabla 4.2.

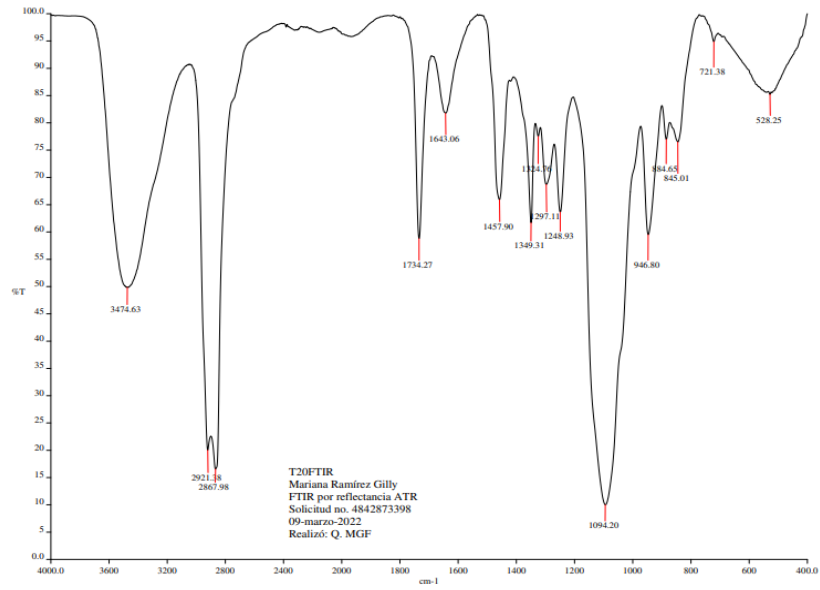


Figura 4.3. Espectro FT-IR de Tween 20.

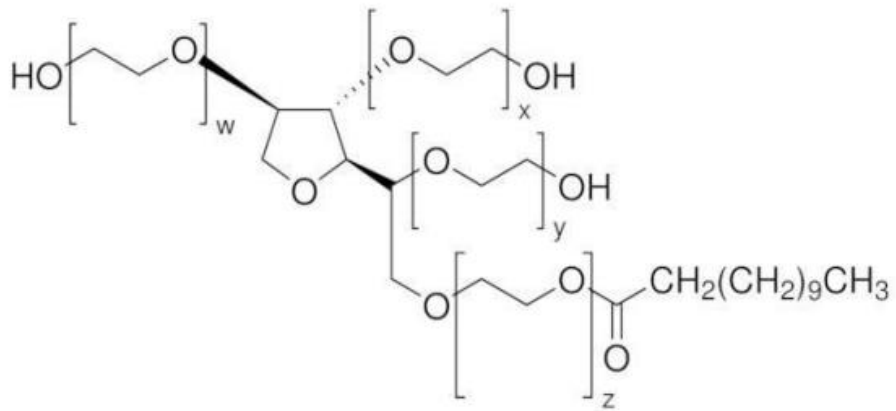


Figura 4.4. Estructura química de Tween 20 ( $x + y + z + w = 20$ ) (Winarni & Maulidina, 2018).

Tabla 4.2. Principales bandas de absorción de los espectros FTIR del Tween 20.

Absorción (cm <sup>-1</sup> )	Grupo funcional
3474.63	Estiramiento O-H unido a hidrógeno
2921.38- 2867.98	Grupo carbonilo de R-CO-O-R
1734.27	Grupo carbonilo de R-CO-O-R
1643.06	Estiramiento de carbonilo
1094.20	Vibración de estiramiento de -CH <sub>2</sub> -O-CH <sub>2</sub> -

Esta tabla muestra las bandas de absorción características del Tween 20, las cuales son muy parecidas a las reportadas por Ortiz-Tafoya (2018).

#### 4.1.3 Pruebas de análisis elemental de guar y Tween 20

Las Tablas 4.3 y 4.4 muestran el análisis elemental de la guar y el Tween 20, respectivamente.

Tabla 4.3. Análisis elemental (g/100 g) de guar.

Masa (mg)	Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre
1.960	39.82	6.64	1.31	0.01

Tabla 4.4. Análisis elemental (g/100 g) promedio (n = 2) de Tween 20.

Masa (mg)	Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre
2.787	55.370	9.020	0.450	0.285

Los contenidos de C, H y N son congruentes con las estructuras químicas de cada componente. El contenido de azufre puede considerarse despreciable para la guar y el Tween 20. En el caso de la guar la concentración de nitrógeno se atribuye a la presencia de proteína.



#### 4.1.4 Pruebas de absorción atómica guar y Tween 20

La Tabla 4.5 muestra los resultados de absorción atómica de la guar y el Tween 20.

Tabla 4.5. Contenido de elementos intrínsecos (mg/kg) de guar y Tween 20.

Elemento	Guar	Tween 20
Ca	860	ND*
Na	3830	1960
K	9090	5980
Mg	9780	8090

ND\* No detectado

#### 4.2 Influencia de concentración de guar sobre la tensión superficial del agua

La guar tiene la fórmula condensada  $C_{18}H_{30}O_{15}$  y una masa molar de su unidad repetitiva de 486.39 g/mol. Su densidad a 25 °C es 0.90 g/cm<sup>3</sup>. La Figura 4.5 muestra la disminución de la tensión superficial con el aumento de la concentración de guar obtenida en este trabajo (línea azul). Este comportamiento significa que la guar tiene actividad de superficie y por lo tanto capacidad de adsorberse en la interfase agua-aire, lo cual coincide con reportes previos (Wu et al., 2009) cuyos resultados se incluyen en la Figura 4.5 (línea naranja). Concentraciones menores de 0.1 g/100 mL podrían provocar la migración de los sacaridos de cadena corta preferentemente a la superficie, mientras que concentraciones mayores, 0.1 a 0.5 g/100 mL, podrían resultar en la actividad superficial de las macromoléculas (Wu et al., 2009).

La Figura 4.5 también muestra que la guar de este estudio tiene mayor actividad de superficie, es decir, para una misma concentración disminuye más la tensión superficial del agua que la guar reportada (Wu et al., 2009).

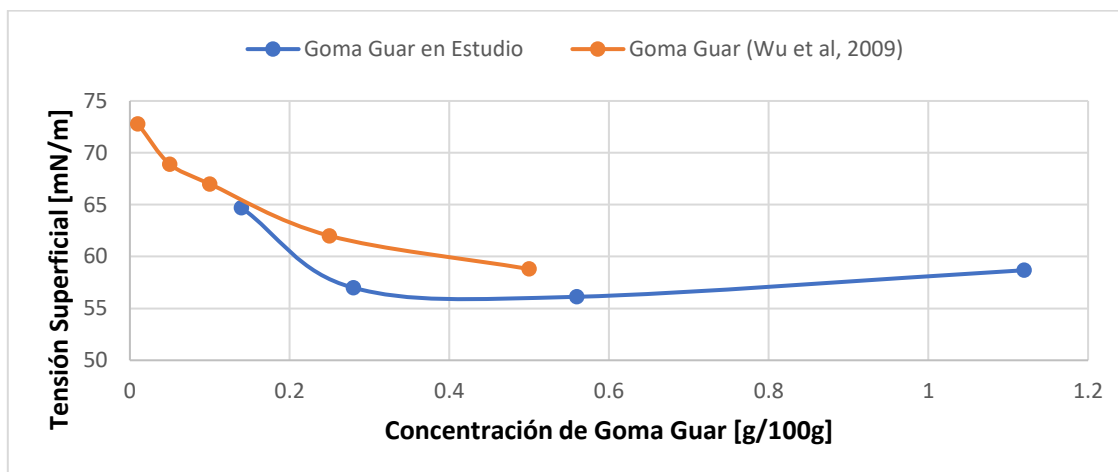


Figura 4.5. Influencia de concentración (g guar/100 g disolución) sobre la tensión superficial (mN/m) del agua a 23 °C.

Este comportamiento podría atribuirse a diferencias en el origen de la semilla de donde se extrajo el polisacárido o a diferencias en el proceso de extracción y por ende en las propiedades del polvo resultante. Las condiciones de preparación de las disoluciones de guar también podrían jugar un papel. Por ejemplo, Wu et al., (2009) prepararon las dispersiones de guar a 80 °C durante 1 h con agitación constante. Sin embargo, se ha demostrado que en la mayoría de los casos las disoluciones de guar preparadas por calentamiento tienen una viscosidad final menor que las mismas disoluciones preparadas con agua a temperatura ambiente (Casas et al., 2000; Mudgil et al., 2014). Además, cuanto más soluble es un galactomanano en agua habrá mayor disminución de su tensión superficial (Wu et al., 2009). Por ello, el efecto de la temperatura de preparación difícilmente sería un factor y quizá

algún otro, como el pH, podrían explicar las diferencias (Mudgil et al., 2014).

### 4.3 Influencia de concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial del agua

El Tween 20 tiene la fórmula condensada  $C_{58}H_{114}O_{26}$  y una masa molar de 1227.54 g/mol. Su densidad a 25 °C es 1.11 g/cm<sup>3</sup>. En la Figura 4.6 se muestra la disminución de la tensión superficial con el aumento de la concentración del tensioactivo obtenida en este estudio.

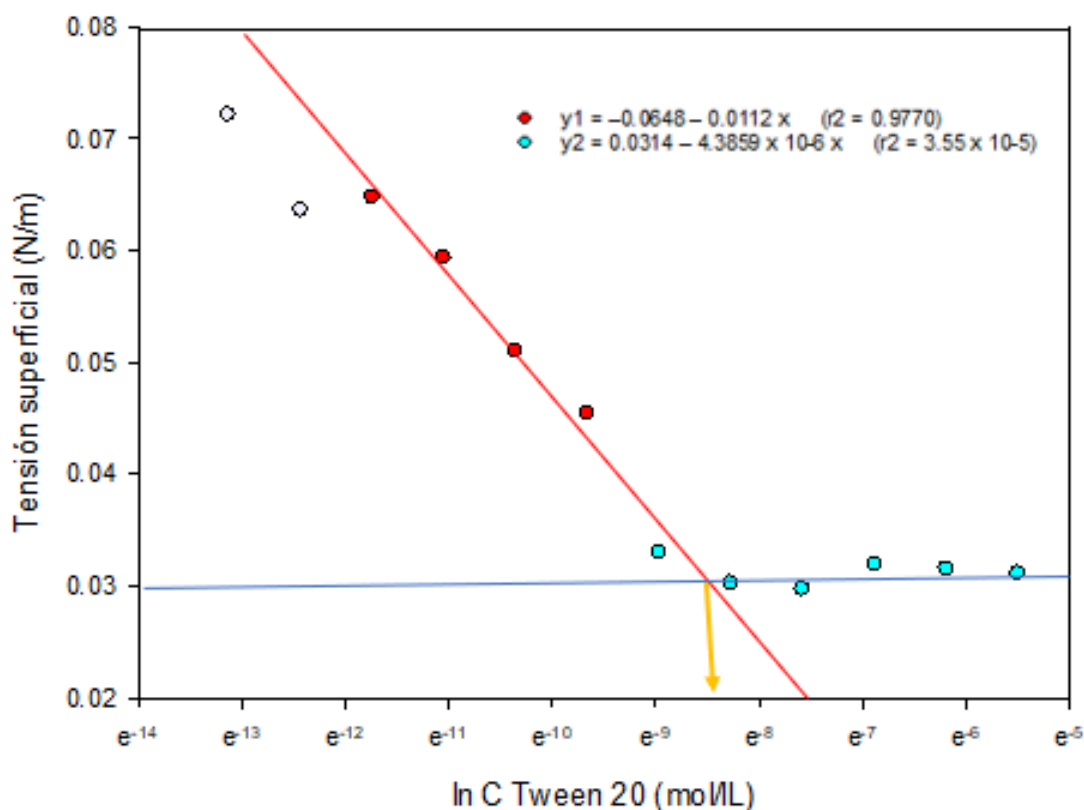


Figura 4.6. Influencia de concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial del agua a 23 °C. La intersección de las rectas de regresión es la concentración micelar crítica (CMC) del tensioactivo.

En disolución acuosa cada molécula de tensioactivo se adsorbe en la superficie aire-líquido y conforme aumenta su concentración la superficie va ocupándose de manera progresiva hasta saturarse. Por ello se llega a un punto en el que la tensión superficial deja de disminuir lo que provoca un cambio en la pendiente y la tensión superficial se va haciendo independiente de la concentración de tensioactivo (Novelo Torres y Gracia Fadrique, 2005; Bao et al., 2008; Gil Muíño, 2014). Más allá de ese punto las moléculas de tensioactivo se organizan en micelas. La concentración para la cual sucede este fenómeno es la concentración micelar crítica (CMC). La CMC para el Tween 20 se determinó por el punto de intersección de las dos rectas de regresión mostradas en la Figura 4.6. El valor obtenido para la CMC del Tween 20 fue  $1.84 \times 10^{-4}$  mol/L (ver calculo en el Anexo A), lo que significa que más allá de esta concentración se formarían agregados macromoleculares de cierta complejidad que podrían identificarse como "micelas". Sin embargo, no existe evidencia reportada sobre la naturaleza exacta de estas asociaciones moleculares en el caso de polisacáridos. La Tabla 4.6 muestra el resultado de este estudio con los de otros autores.

Tabla 4.6. Concentración micelar crítica (CMC) y exceso de superficie ( $\Gamma$ ) de Tween 20.

	CMC (mol/L)	$\Gamma$ (g/m <sup>2</sup> )
Ruiz Ch. (2009)	$3.745 \times 10^{-5}$	
Ortiz-Tafoya & Tecante (2018)	$9.82 \times 10^{-5}$	$4.27 \times 10^{-6}$
Este estudio	$1.84 \times 10^{-4}$	$5.57 \times 10^{-3}$

Estas diferencias sugieren que la CMC no se ubica en un valor exacto, sino en un intervalo de concentraciones que puede ser relativamente amplio si el tensioactivo es una mezcla de compuestos químicos

significativamente diferentes entre sí. Por ejemplo, los ésteres de los ácidos grasos que conforman la parte hidrofóbica del Tween 20 (Ruiz Ch., 2009). Con esta información se pudo calcular el exceso de superficie a presión y temperatura constantes mediante la isoterma de adsorción de Gibbs, ecuación (2). Los cálculos se encuentran en el Anexo B.

#### **4.4 Preparación de emulsiones**

La cantidad de tensioactivo para preparar las emulsiones aceite en agua (O/W) se estimó considerando la cantidad de aceite 10 mL/100 mL y gotas esféricas de aceite asumiendo un diámetro promedio de 1  $\mu\text{m}$  dispersas en la disolución acuosa de Tween 20. Los cálculos para determinar la proporción de tensioactivo adsorbido en la interfase aceite-agua se encuentran en el Anexo B.

Según este cálculo se requieren 3.342 g/L para cubrir  $6 \times 10^5 \text{ m}^2$  de área superficial que hay en las gotas esféricas de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio. La CMC del Tween 20 es  $1.84 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$  y considerando la masa molar de la unidad repetitiva, la concentración es 0.226 g/L. Entonces, la concentración requerida, 3.342 g/L, es 14.8 veces mayor que la CMC. Por lo tanto, si toda la CMC se adsorbe esto representa 6.76 % de la cantidad requerida. Por lo tanto, para asegurar la formación de una emulsión estable hay que usar al menos 3.342 g/L o 0.3342 g/100 mL de Tween 20. Estas cifras dependen de la proporción en volumen de aceite en la emulsión, 10 mL/100 mL en este caso, y del diámetro promedio de las gotas de aceite,  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ . Las emulsiones se prepararon como se muestra en la Figura 3.2.

#### 4.4.1 Estabilidad de emulsiones

La Figura 4.7 muestra las observaciones de la estabilidad de las emulsiones desde el momento en apareció el cremado hasta la separación de las dos fases O/W.

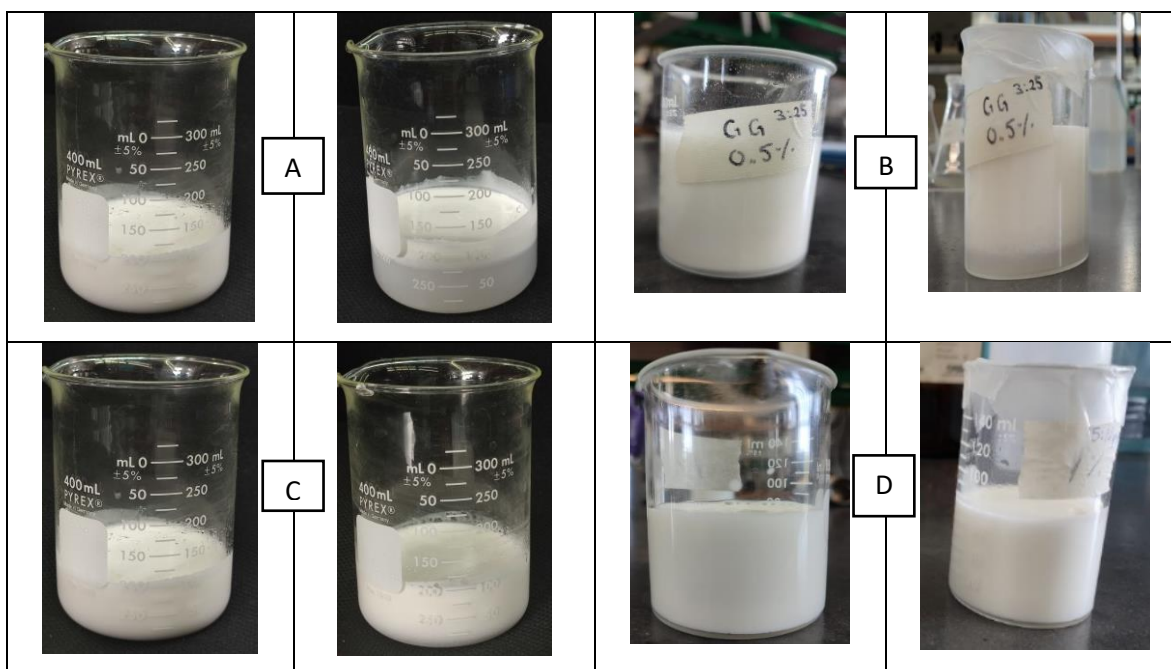


Figura 4.7. Estabilidad de las emulsiones O/W con aceite 10 mL/100 mL, 0.33 g de Tween 20 producidas después de 48 h de su preparación.

La emulsión sin guar (A) fue la menos estable ya que después de 48 h apareció el cremado con posterior separación de fases. La emulsión con 0.5 g de guar (B) mostró una significativamente menor separación de fases. Las emulsiones con 0.75 g (C) y 1 g de guar (D) no mostraron cambio alguno por lo que se consideraron estables. Por ello, se seleccionó la condición C para preparar las mezclas guar-Tween 20 ya que es menos viscosa que la condición D. Entonces, se examinó la tensión superficial de la disolución con guar al 0.75 g/100 g de agua y Tween 20 al 0.33 g/100 g de agua. La tensión resultante fue 75.61 mN/m. Sin embargo, este

resultado no fue consistente con los datos mostrados en la Figura 4.6. Las tensiones superficiales de las disoluciones de Tween con guar fueron siempre 10 a 13 % superiores a las de Tween sin guar.

#### 4.4.2 Tamaño de partícula por difracción láser

La Figura 4.8 muestra el tamaño de partícula expresado como diámetro mediano,  $D(0.5)$ , de la emulsión C. El diámetro mediano divide a la población de gotas en dos fracciones; 50 % tiene tamaños de gota menores que  $D[0.5]$  y 50 % tamaños de gota mayores que  $D[0.5]$ .

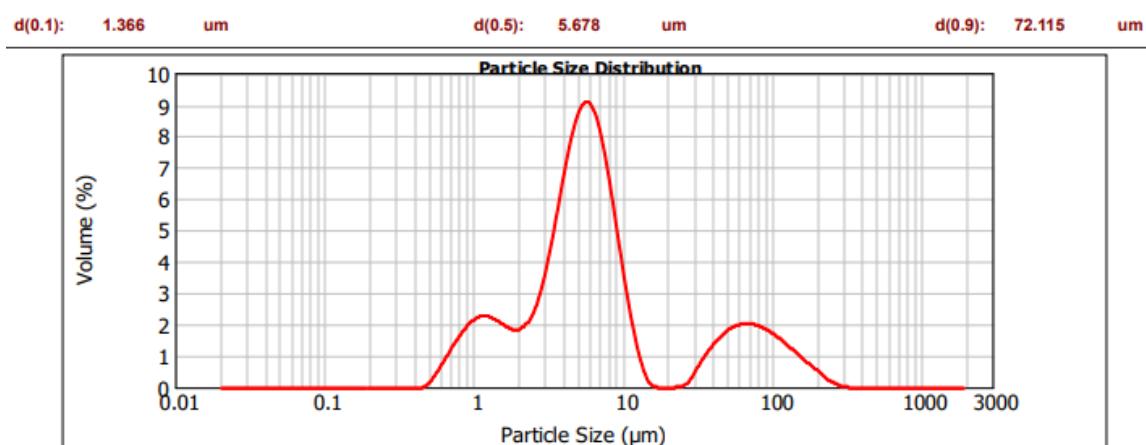


Figura 4.8. Tamaño de partícula  $D(0.5) = 5.678 \mu\text{m}$  de la emulsión C al tiempo cero.

Por otro lado, el diámetro superficial promedio  $D[3,2]$ , llamado Sauter medio, fue  $3.615 \mu\text{m}$ . Este valor es mayor que el supuesto de  $1 \mu\text{m}$  usado para calcular la concentración de Tween 20 por agregar a la emulsión. Esta diferencia podría explicar la coalescencia de las gotas de aceite que hace una emulsión inestable (McClements, 2005).

### 4.4.3 Microscopia óptica

Esta técnica fue usada para apreciar con más detalle el fenómeno de coalescencia en la emulsión. La Figura 4.9 muestra la emulsión C observada al microscopio óptico. Se observan gotas separadas y algunas unidas, sin coalescer, formando agregados de tres o más gotas sin variar su tamaño lo que indica la presencia de la floculación (McClements, 2005). También se observan agregados de gotas de mayor tamaño, es decir, con dos o más gotas de menor tamaño sugiriendo una etapa previa a la coalescencia (McClements, 2005). Entonces ya desde el tiempo cero hay presencia simultánea de floculación y pre-coalescencia en la emulsión C. De igual modo, en la micrografía se midió el diámetro de 30 gotas de aceite con el programa Image Pro-Plus para estimar el tamaño de gota  $D[0.5]$  al tiempo cero. El diámetro mediano resultante fue  $5.51 \mu\text{m}$ , similar al obtenido por el método de difracción láser.

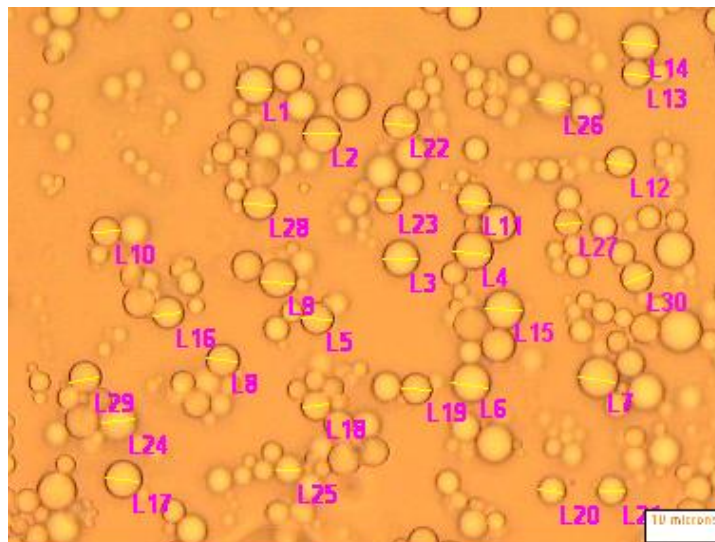


Figura 4.9. Micrografía óptica de la emulsión C observada a 100X al tiempo cero. Los números y las líneas blancas señalan las gotas seleccionadas para hacer la determinación del tamaño de las gotas.



#### 4.5 Influencia de la concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial de disoluciones con guar al 0.75 g/100 g de disolución.

En la Figura 4.10 se observa que al aumentar la concentración de Tween 20 la tensión superficial disminuyó gradualmente, pero no distingue si el cambio en la pendiente es debido a la CAC o a la CMC.

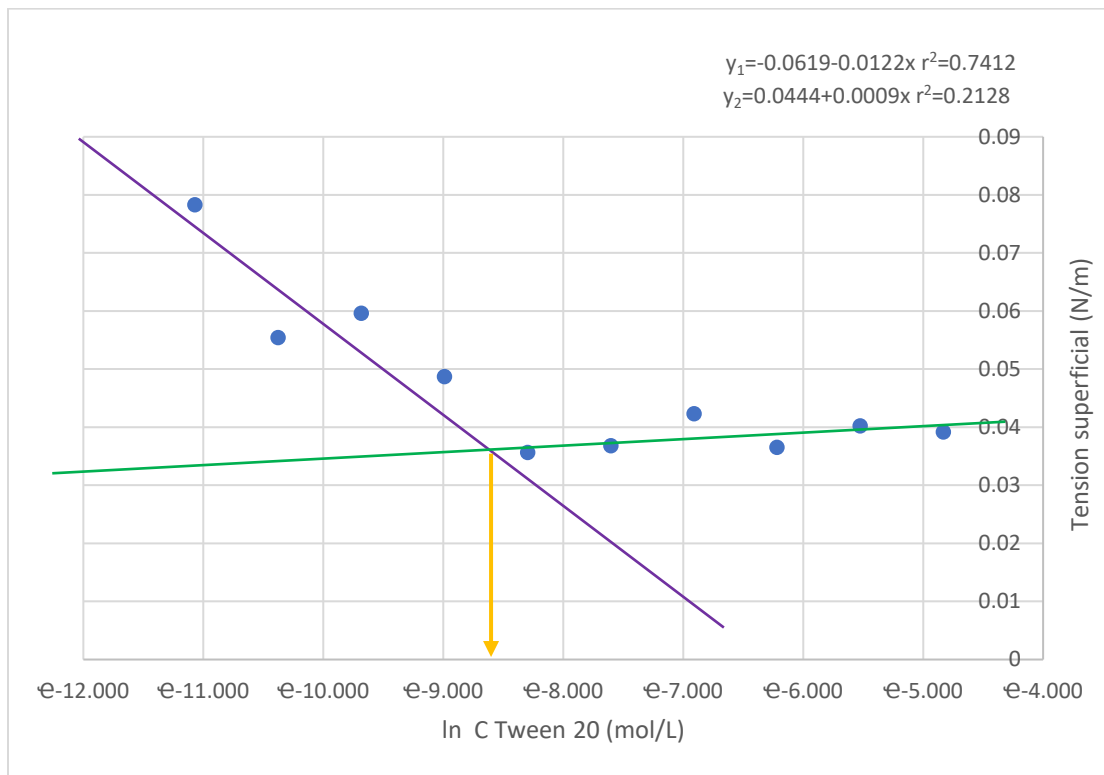


Figura 4.10 Influencia de la concentración de Tween 20 sobre la tensión superficial de disoluciones con 0.75 g/100 g de guar a 25°C. CAC = Concentración de agregación crítica, CMC = Concentración micelar crítica.

Usualmente la zona donde la tensión superficial no cambia con la concentración debido a la CAC es más corta (Ortiz-Tafoya y Tecante, 2017) de la que se ve en la Figura 4.8. Además, al aumentar la

concentración de tensioactivo la tensión superficial sigue disminuyendo hasta que nuevamente hay otro cambio en la pendiente debido a la CMC (Ortiz-Tafoya y Tecante, 2017) y este comportamiento no se observa. Por ello se determinó el punto de intersección de las dos rectas de regresión mostradas en la gráfica.

De acuerdo con los cálculos realizados el cambio en la pendiente ocurre a una concentración de  $2.99 \times 10^{-4}$  mol/L de Tween 20 con guar. Considerando que la CMC para el Tween 20 sin guar es  $1.84 \times 10^{-4}$  mol/L el cambio en la pendiente de la mezcla Tween 20 + guar es mayor que la CMC de Tween 20 sin guar. Entonces, este cambio en la pendiente es la CMC de la mezcla Tween 20 + goma guar y por lo tanto la CAC no está presente. Este comportamiento se puede explicar por las propiedades particulares de orientación y adsorción de las moléculas del Tween 20 en la disolución de guar. Al agregar el tensioactivo en una disolución de guar, las unidades de óxido de etileno y los grupos -OH finales del tensioactivo se unen con los grupos -OH de la guar a través de enlaces de hidrógeno y enlaces éter, respectivamente; teniendo fuerzas intermoleculares débiles. Las concentraciones crecientes de tensioactivo forman una película monomolecular sobre las superficies de los grupos de polisacáridos, la cual rompe los enlaces de hidrógeno y en consecuencia se produce una separación de las cadenas de polisacárido. A partir de este punto (CMC) las moléculas del tensioactivo comienzan a formar micelas las cuales se unen al polisacárido de la misma manera. Por lo tanto, las estructuras del polisacárido se separan, pero siguen conectadas entre sí a través de micelas con enlaces hidrógeno-éter (Kokol, 2002a; 2002b)). Esta situación explica la ausencia de la unión del complejo guar-Tween 20 y por ende la inestabilidad de la emulsión C.

## CONCLUSIONES

La guar abate la tensión superficial lo que implica que tiene la capacidad de adsorberse en la interfase aire-agua. Se comprobó la presencia de la concentración micelar crítica (CMC) para las disoluciones de Tween 20. Las emulsiones preparadas con concentraciones mayores que 0.75-1.0 g/100 g de guar son más estables que las preparadas con concentraciones menores de 0.5 g/100 g guar.

Se determinó la CMC para las mezclas de guar-Tween 20 con un valor de  $2.99 \times 10^{-4}$  mol/L por lo que la adición de guar desplaza la CMC del Tween 20 hacia valores mayores.

La ausencia de la concentración de agregación crítica (CAC) y el aumento del tamaño de gota por la presencia de floculación y pre-coalescencia en la emulsión son consecuencia de las interacciones débiles, puentes de hidrogeno, entre la guar y el Tween 20.

Se recomienda disminuir las interacciones hidrofílicas en este tipo de sistema para obtener el complejo polisacárido no iónico-tensioactivo no iónico el cual facilitará la estabilidad de una emulsión O/W; sustituir los grupos OH de la guar por grupos carboxilo ( $-\text{COO}^-$ ) y sustituir el Tween 20 por otro tensioactivo no iónico hidrofóbico.

## REFERENCIAS

- Akbari, S., y Nour, A.H. (2018). Emulsion types, stability mechanisms and rheology: A review. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies* 1(1), 14-21. doi.org/10.53894/ijirss.v1i1.4
- Anónimo (s/f). E432 - Monolaurato de sorbitano polioxietilenado, polisorbato 20. (s. f.-b). Aditivos Alimentarios.
- Aranberri, I., Binks, B.P., Clint, J.H., y Fletcher, P.D.I. (2010). Elaboracion y caracterización de emulsiones estabilizadas por polímeros y agentes tensioactivos. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 7(3), 211-231. <https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/08/2006-aranberri.pdf>
- Badui, S. (2006). Química de los Alimentos(4º ed.). México, Pearson Education.
- Bais, A., Trevisan, R., Lapasin. P., Partal, C., y Gallegos, C. (2005). Rheological characterization of polysaccharide–surfactant matrices for cosmetic O/W emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science* 290, 546-556. doi: 10.1016/j.jcis.2005.04.044.
- Banerjee, S., y Bhattacharya, S. (2012). Food gels: Gelling process and new applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 52, 334- 346. doi: 10.1080/10408398.2010.500234
- Bao, H., Li, L., Gan, L., y Zhang, H. (2008). Interactions between ionic surfactants and polysaccharides in aqueous solutions. *Macromolecules* 41, 9406–9412. doi: 10.1021/ma801957v
- Cabanes, A. S. (2014). Tensioactivos en la industria textil. 3c Tecnología: glosas de innovación aplicadas a la pyme, 3(3), 137-151.
- Campos Fabregat, J.C. (s/f). Teoría sobre los tensioactivos. Los tensioactivos y su influencia en la fase humedad de la fabricación del cuero vacuno. Biblioteca miscelánea.

- Casas, J.A., Mohedano, A.F. y Garcia-Ochoa, F. (2000). Viscosity of guar gum and xanthan/guar gum mixture solutions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80, 1722–1727.
- Castañeda-Ovando, A., González-Aguilar, L. A., Granados-Delgadillo, M. A., y Chávez-Gómez, U. J. (2020). Goma guar: un aliado en la industria alimentaria. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI* 7(14), 107–111. doi: 10.29057/icbi.v7i14.4988
- Chiappisi, L., & Gradzielski, M. (2015). Co-assembly in chitosan-surfactant mixtures: thermodynamics, structures, interfacial properties and applications. *Advanced Colloid and Interface Science* 220, 92-107.
- De Seixas-Junior, C. H., de Carvalho, M. M., Jacumazo, J., Piazza, R. D., Parchen, G. P., y de Freitas, R. A. (2020). Interaction of guar gum galactomannans with the anionic surfactant sodium lauryl ether sulphate. *International Journal of Biological Macromolecules* 165, 713–721. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.216; doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.04.208; doi:10.1016/j.carbpol.2017.12.003
- Fennema, O.R. (2000). *Química de los Alimentos*. 2ª ed. España: Acribia
- García Carmona, O. (2019). Estudio de la influencia de los diferentes parámetros involucrados en la microencapsulación mediante coacervación compleja. Tesis de Doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera.
- Gil Muíño, A. (2014). Análisis y caracterización de agentes tensioactivos, polímeros y química fina en un laboratorio de control. Tesis de Maestría. Universidade da Coruña.
- González, A., y Burgos, J. C. (2006). The effect of pulverised coal's devolatilisation conditions on char physical characteristics. *Revista Ingeniería e Investigación* 27(1), 32-40. doi:10.15446/ing.investig.v27n1.14776

- Guar Gum - DiChem. (2023). Dichem.net. [En línea] (Actualizado al 09 de abril de 2023).[http://www.dichem.net/Guar\\_Gum.html](http://www.dichem.net/Guar_Gum.html)
- Hernández-Escalona, M., Gómez-Hernández, Y., y Peñate-Valldeperas, P. (2020). Procesos de agregación en disoluciones acuosas de Triton X100 y CTAB con alginatos de sodio. *Revista Cubana de Química* 32(1), 88-103. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v32n1/2224-5421-ind-32-01-88.pdf>  
<http://portal.facyt.uc.edu.ve/pasantias/informes/P8117709.pdf>  
[https://indigoquimica.mx/pdf/biblioteca/miscelanea/Teoria\\_sobre\\_tensioactivos.pdf](https://indigoquimica.mx/pdf/biblioteca/miscelanea/Teoria_sobre_tensioactivos.pdf)  
[https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/13628/GilMuino\\_Anna\\_TFM\\_2014.pdf](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/13628/GilMuino_Anna_TFM_2014.pdf)  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/166964?show=full>  
<https://www.aditivos-alimentarios.com/2016/01/E432.html>
- Kerwin, B.A. (2008). Polysorbates 20 and 80 used in the formulation of protein biotherapeutics: Structure and degradation pathways. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 97(8), 2924-2935. doi: /10.1002/jps.21190
- Kokol, V. (2002a). Interactions between polysaccharide polymer thickener and bifunctional bireactive dye in the presence of nonionic surfactants. Part 1: Surface tension and rheological behavior of different polysaccharide solutions. *Carbohydrate Polymers* 50(3), 227-236. doi: 10.1016/s0144-8617(02)00035-8
- Kokol, V. (2002b). Interactions between polysaccharide polymer thickener and bifunctional bireactive dye in the presence of nonionic surfactants. Part 2. Investigation of interactions using SEC method. *Carbohydrate Polymers* 50(3), 237-247. doi: 10.1016/s0144-8617(02)00034-6
- Kothekar, S. C., Ware, A. M., Waghmare, J. T., y Momin, S. A. (2007). Comparative analysis of the properties of Tween-20, Tween-60, Tween-

- 80, Arlacel-60, and Arlacel-80. *Journal of Dispersion Science and Technology* 28(3), 477-484. doi: 10.1080/01932690601108045
- López-Franco, Y., Cervantes-Montaño, C., Martínez-Robinson, K., Lizardi-Mendoza, J., y Robles Ozuna, L. (2013). Physicochemical characterization and functional properties of galactomannans from mesquite seeds (*Prosopis* spp.). *Food Hydrocolloids* 30(2), 656–660. doi: 10.1016/j.foodhyd.2012.08.012
- Mastersizer 2000. User manual 0384 1.0 March 2007. [https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/Mastersizer-2000-user-manual-English-MAN0384-1-0\\_tcm50-11674.pdf](https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/Mastersizer-2000-user-manual-English-MAN0384-1-0_tcm50-11674.pdf)
- McClements, D.J. (2005). Food Emulsions. New York, CRC Press, Boca Raton.
- Mingzhe, S., Yumeng, L., Tianxin, W., Yanwei, S., Xiyuan, X., y Zesheng, Z. (2017). Isolation, fine structure and morphology studies of galactomannan from endosperm of *Gleditsia japonica* var. *delavayi*. *Carbohydrate Polymers* 184, 127-134.
- Mortensen, A., Aguilar, F., Crebelli, R., Di Domenico, A., Frutos, M.J., Galtier, P., Gott, D., Gundert-Remy, U., Lambré, C., Leblanc, J-C., Lindtner, O., Moldeus, P., Mosesso, P., Oskarsson, A., Parent-Massin, D., Stankovic, I., Waalkens-Berendsen, I., Woutersen, R.A., Wright, M., Younes, M., Brimer, L., Peters, P., Wiesner, J., Christodoulidou, A., Lodi, F., Tard, A., y Dusemund, B. (2017). Re-evaluation of guar gum (E 412) as a food additive. *EFSA Journal* 15(2), 4669, 62 pp. doi: 10.2903/j.efsa.2017.4669
- Mudgil, D., Barak, S., y Khatkar, B.S. (2011). Guar gum: processing, properties and food applications—A Review. *Journal of Food Science and Technology* 51(3), 409–418. doi: 10.1007/s13197-011-0522-x
- Muñoz, J., Alfaro, M.C, y Zapata, I. (2007). Revisión. Avances en la formulación de emulsiones. *Grasas y aceites* 58(1), 64-73.

<https://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/articulo/view/10/10>

- Novelo-Torres, A.M., y Gracia-Fadrique, J. (2005). Concentración micelar crítica mediante la ecuación de adsorción de Gibbs. *Educación Química* 16(1), 63-67. doi: 10.22201/fq.18708404e.2005.1.66139
- Ortiz-Tafoya, M.C, y Tecante, A. (2018). Physicochemical characterization of sodium stearyl lactylate (SSL), polyoxyethylene sorbitan monolaurate (Tween 20) and  $\kappa$ -carrageenan. *Data in Brief* 19, 642–650. doi: 10.1016/j.dib.2018.05.064
- Ortiz-Tafoya, M.C. (2019) Interacciones entre k-carragenina y distintos tensioactivos para producir emulsiones en gel. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ószi, Z., y Pethő, G. (1998). Quantitative determination of polysorbate 20 in nasal pharmaceutical preparations by high-performance liquid chromatography. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 18(4–5), 715–720. doi: 10.1016/s0731-7085(98)00265-9
- Pasquel, A. (2001). Gomas: una aproximación a la industria de alimentos. *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria* 1, 1-8.
- Roberts, K.T. (2011). The physiological and rheological effects of foods supplemented with guar gum. *Food Research International* 44, 1109–1114.
- Ruiz Ch., L. F. (2009). Actividad superficial de mezclas de soluciones de surfactantes no-iónicos Tween 20® y Tween 80® en interfaz líquido-aire. Universidad de Carabobo. Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Departamento de Química.
- Thombare N., Jha, U., Mishra, S., y Siddiquia, M.Z. (2016). Guar gum as a promising starting material for diverse applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 88, 361-372.
- Triana, B. J. C. (2018, septiembre 28). Estudio de los mecanismos de envejecimiento en emulsiones de perfluorocarbono: aplicación en



hemosustitutos.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/11495>

- Winarni, I., y Maulidina, R. (2018). Bioethanol Production from Bamboo Pulp using Enzymatic Sacharification with Several Concentration of Surfactant. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 209, 012051. doi: 10.1088/1755-1315/209/1/012051
- Wu, Y., Cui, W., Eskin, N.A.M., y Goff, H.D. (2009). An investigation of four commercial galactomannans on their emulsion and rheological properties. *Food Research International* 42(8), 1141-1146. doi: 10.1016/j.foodres.2009.05.015.
- Yantao, L., Jianxin, J., Fuhou, L., Liang, H., y Wei, X. (2020). Physicochemical characterization of galactomannans extracted from seeds of *Gleditsia sinensis* Lam and fenugreek. Comparison with commercial guar gum. *International Journal of Biological Macromolecules* 158, 1047–1054.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN MICELAR CRÍTICA (CMC) DEL TWEEN 20

La CMC se calculó determinando el punto de intersección de las dos rectas de regresión mostradas en la Figura 4.6. Los datos utilizados son los siguientes.

Tensión Superficial (N/m)	Concentración T20 (mol/L)
0.06477	$7.95 \times 10^{-6}$
0.0594	$1.59 \times 10^{-5}$
0.05104	$3.18 \times 10^{-5}$
0.04551	$6.35 \times 10^{-5}$
0.03308	$1.27 \times 10^{-4}$
0.0303	$2.55 \times 10^{-4}$
0.02976	$5.09 \times 10^{-4}$
0.03194	$1.02 \times 10^{-3}$
0.03156	$2.04 \times 10^{-3}$
0.03119	$4.07 \times 10^{-3}$
0.03192	$8.15 \times 10^{-3}$

Las ecuaciones de las rectas son:

$$y_1 = -0.0648 - 0.0112x \quad (r^2 = 0.9770) \text{ línea roja}$$

$$y_2 = -0.0314 - (4.3859 \times 10^{-6})x \quad (r^2 = 3.55 \times 10^{-5}) \text{ línea azul}$$

Igualando las dos ecuaciones

$$-0.0648 - 0.0112x = -0.0314 - (4.3859 \times 10^{-6})x$$

$$-0.0112x + (4.3859 \times 10^{-6})x = -0.0314 + 0.0648$$

$$-0.01119x = 0.0962$$

Despejando x

$$x = \frac{0.0962}{-0.01119} = -8.60$$

$$\text{CMC} = e^x = e^{-8.60} = 1.84 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$$

## ANEXO B

### CÁLCULO DEL EXCESO DE SUPERFICIE Y PROPORCIÓN DE TWEEN 20 ADSORBIDA EN LA INTERFASE ACEITE-AGUA

La proporción de Tween 20 que se adsorbió en la interfase aceite-agua se calculó de la siguiente manera. Primero, se calculó el exceso de superficie de acuerdo con la isoterma de absorción de Gibbs a partir de los datos mostrados en la Figura 4.6 antes de la CMC (línea roja).

El exceso de superficie dado por la isoterma de Gibbs es

$$\Gamma_{\text{TW20}} = -\frac{1}{RT} \left( \frac{d\gamma}{d \ln C_{\text{TW20}}} \right)$$

La pendiente de la línea roja (Figura 4.6) es  $-0.0112 \text{ N/m}$  ( $r^2 = 0.9770$ ). Entonces,

$$\Gamma_{\text{Tween 20}} = -\frac{\text{mol. K}}{(8.341 \text{ N.m})(296 \text{ K})} \left( -0.0112 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right)$$

$$\Gamma_{\text{Tween 20}} = 4.54 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$$

Al considerar la masa molar del Tween 20, el exceso de superficie es

$$\Gamma_{\text{TW20}} = 5.57 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$$

Considerando que las gotas de aceite con esféricas, la relación área-volumen de una esfera es

$$A = 4\pi R^2 \quad V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

$$\frac{A}{V} = \frac{3}{R} = \frac{6}{D}$$

Como  $D = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{10^{-6}} = 6 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{aceite}$$

Considerando que en la emulsión hay 10 mL de aceite por 100 mL de dispersión acuosa de Tween 20 la relación área/volumen es

$$\frac{A}{V} = 6 \times 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3 \text{aceite}} \left( 0.1 \frac{\text{m}^3 \text{aceite}}{\text{m}^3 \text{disolución}} \right) = 6 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{disolución}$$

Esta relación se multiplica por el exceso de superficie del Tween 20

$$\frac{\Gamma A}{V} = \left( 6 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3 \text{disolución}} \right) \left( 5.57 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right) = 3342 \text{ g}/\text{m}^3 \text{disolución}$$

$$\frac{\Gamma A}{V} = 3342 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 3.342 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Por lo tanto, para asegurar la formación de una emulsión estable hay que usar por lo menos 3.342 g/L de Tween 20 o bien 0.3342 g/100 mL. Por esta razón, esta fue la concentración de Tween 20 que se agregó a las emulsiones para examinar su estabilidad.

Sin embargo, el diámetro promedio experimental fue 3.615  $\mu\text{m}$ .

Como  $D = 3.615 \mu\text{m} = 3.615 \times 10^{-6} \text{ m}$

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{3.615 \times 10^{-6}} = 1659751 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{aceite}$$

Considerando que en la emulsión hay 10 mL de aceite por 100 mL de dispersión acuosa de Tween 20 la relación área/volumen es

$$\frac{A}{V} = 1659751 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3 \text{aceite}} \left( 0.1 \frac{\text{m}^3 \text{aceite}}{\text{m}^3 \text{disolución}} \right) = 165975 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{disolución}$$

Esta relación se multiplica por el exceso de superficie del Tween 20

$$\frac{\Gamma A}{V} = \left( 165975 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3 \text{disolución}} \right) \left( 5.57 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right) = 924.5 \text{ g}/\text{m}^3 \text{disolución}$$

$$\frac{\Gamma A}{V} = 924.5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 0.9245 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Por lo tanto, la concentración de Tween 20 resultante es 0.09245 g/100 mL. Esta concentración es menor que la agregada.

## ANEXO C

### CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN MICELAR CRÍTICA (CMC) DE LA MEZCLA GUAR-TWEEN 20 (N=3)

La CMC se calculó determinando el punto de intersección de las dos rectas de regresión mostradas en la Figura 4.8. Los datos utilizados son los siguientes

Tensión superficial (N/m)	Concentración Tween 20 (mol/L) + 0.75 g GG
0.078292	$1.56 \times 10^{-5}$
0.05541	$3.12 \times 10^{-5}$
0.05963	$6.24 \times 10^{-5}$
0.0486864	$1.25 \times 10^{-4}$
0.03567	$2.49 \times 10^{-4}$
0.036776	$4.99 \times 10^{-4}$
0.0423	$9.98 \times 10^{-4}$
0.036536	$2.00 \times 10^{-3}$
0.040214	$3.99 \times 10^{-3}$
0.03917	$7.98 \times 10^{-3}$

Las ecuaciones de las rectas son:

$$y_1 = -0.0619 - 0.0122x \quad (r^2 = 0.7412) \text{ línea morada}$$

$$y_2 = 0.0444 + 0.0009x \quad (r^2 = 0.2128) \text{ línea verde}$$

Igualando las dos ecuaciones

$$-0.0619 - 0.0122x = 0.0444 + 0.0009x$$

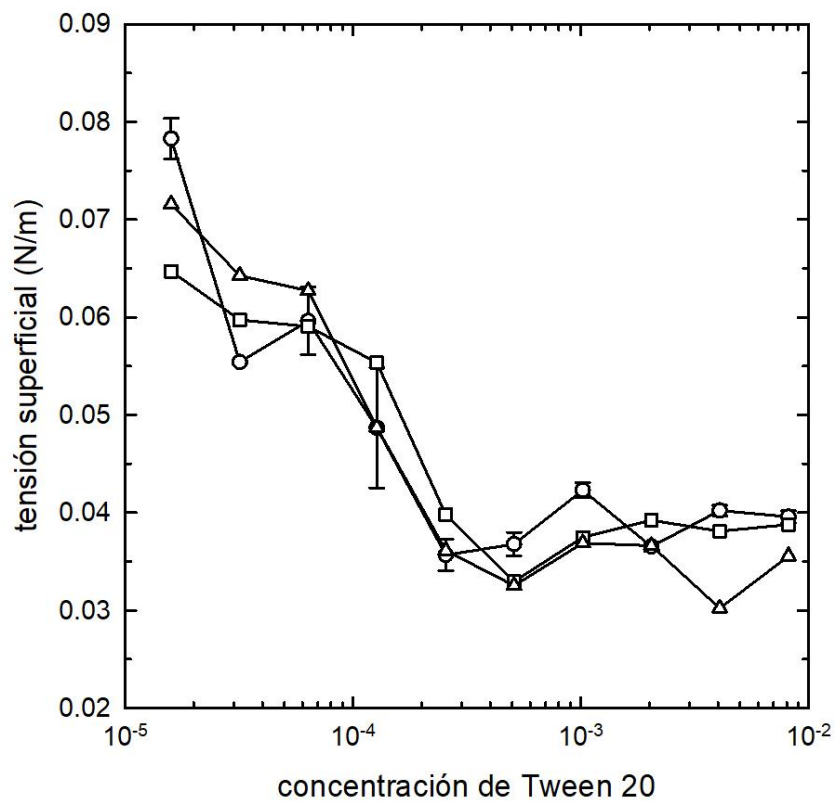
$$-0.0122x - 0.0009x = 0.0444 + 0.0619$$

$$-0.0131x = 0.1063$$

Despejando x

$$x = \frac{0.1063}{-0.0131} = -8.1145$$

$$\text{CMC} = e^x = e^{-8.1145} = 2.99 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$$



La curva representada con los círculos corresponde a la graficada en la Figura 4.10.



## ANEXO D

### FICHA TÉCNICA DEL POLVO DE GUAR

La siguiente información fue tomada de la ficha técnica de la guar de la empresa Ingredion.

Guar 8/22 en polvo es una goma guar de alta viscosidad y malla muy fina. La goma guar 8/22 se utiliza en mezclas instantáneas para sopas, salsas instantáneas y también en salsas líquidas y productos horneados, donde se requiere viscosidad o control de agua. El nivel de uso típico varía del 0.1% al 0.5%. Guar 8/22 es estable en un amplio rango de pH, pero en productos líquidos no debe utilizarse cuando el pH es inferior a 4.0. Se hidrata en agua fría, pero funciona mejor cuando se calienta y se enfría.

#### Especificaciones

Propiedades químicas y físicas	Min.	Max.
Sabor (típico)	Típico	
Humedad (%)	0	15
Olor (típico)	Típico	
pH (disolución viscosa)	5.4	7
Color del polvo (visual)	Blanco cremoso	
Textura (cualitativa)	Polvo de flujo libre	
Viscosidad (1.0%, RVA 20 rpm, 25 °C) (cP)	4000	6000

Datos nutricionales/100 g	190.3 cal
Grasa total (g)	0.70
Grasa saturada (g)	0.35
Grasas trans (g)	0.04
Grasa monoinsaturada (g)	0.30
Grasa polinsaturada (g)	0.15
Colesterol (g)	0.00
Carbohidratos totales (g)	82.0
Fibra dietética	82.0
Azúcares totales (g)	0.00
Azúcares añadidos	0.00
Proteína (g)	5.00
Agua (g)	11.30
Ceniza (g)	1.00
Vitamina A (UI)	0.00
Vitamina D (μg)	0.00
Vitamina C (μg)	0.00
Sodio (mg)	350
Calcio (mg)	55.0
Hierro (mg)	30.0
Potasio (mg)	350