



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ACTIVIDAD SUPERFICIAL DE TENSOACTIVOS
CATIÓNICOS-ANIÓNICOS Y CONTROL DE
ESPUMA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

EDUARDO TREJO SUÁREZ

ASESOR

Dr. JESÚS GRACIA FADRIQUE



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.2024



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación o Graduación con trabajo escrito)**

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la Institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ACTIVIDAD SUPERFICIAL DE TENSOACTIVOS CATIONICOS-ANIONICOS Y CONTROL DE ESPUMA_ que presenté para obtener el título/grado de INGENIERO QUÍMICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por la Facultad de Química, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación/graduación.

Atentamente

Eduardo Trejo Sáenz Eduardo T.S 316315096
(Nombre completo, firma y número de cuenta)

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE

Profesor: Dr. Jesús Gracia Fadrique

VOCAL

Profesor: Dr. Luis Miguel Trejo Candelas

SECRETARIO

Profesor: Dr. José Luis López Cervantes

1° SUPLENTE

Profesora: Ma. María Guadalupe Lemus Barajas

2° SUPLENTE

Profesor: Dr. Mario Alberto Martínez Vitela

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de superficies 331. Edificio F. Facultad de Química. UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. JESÚS GRACIA FADRIQUE

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dr. ARTURO ANTONIO GARCÍA FIGUEROA

SUSTENTANTE:

EDUARDO TREJO SUÁREZ

Agradecimientos

*Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a
Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT)
de la UNAM. Clave y número del proyecto: AG101621.
Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.*

Índice General

Resumen	8
Objetivo	9
Metas	9
Introducción	10
Termodinámica de superficie	11
Interfaces y tensión superficial	11
Ecuación de adsorción de Gibbs	12
Isoterma de Langmuir	14
Isoterma de Langmuir-BET	15
Curvatura y Espumas	18
Ecuación de Young-Laplace	18
Módulo de elasticidad de Gibbs	19
Formación y ruptura de las espumas	20
Antiespumantes	22
Materiales y Metodología	24
Reactivos	24
Tensión superficial	25
Estabilidad de espuma	26
Control de espuma	27
Columna de adsorción-espumación	28
Análisis de Resultados	30
Tensión Superficial	30
Estabilidad de espuma	32
Control de espuma	34
Columna de adsorción-espumación	35
Conclusiones	36
Anexos	38
Anexo A. Resultados de medición de tensión superficial por el método del anillo para el sistema CTAC	38
Anexo B. Resultados de medición de tensión superficial por el método del anillo para el sistema CTAC-SDS	38
Anexo C. Resultados de altura y tiempo para los sistemas CTAC-SDS y SDS	39
Referencias	40

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades de superficie para CTAC y CTAC-SDS en solución acuosa obtenidos mediante la EES de Langmuir	30
Tabla 2. Propiedades de superficie para CTAC y CTAC-SDS en solución acuosa obtenidos mediante la EES de Gibbs	31
Tabla 3. Estabilidad de la espuma para cada sistema	32
Tabla 4. Tamaño y desviación estándar de las burbujas en la espuma formada por el sistema CTAC-SDS ambos a su CMC	33
Tabla 5. Control de espuma mediante la adición de antiespumantes.	34
Tabla 6. Parámetros del control de espuma para el sistema CTAC-SDS en columna de adsorción. espumación.....	35

Índice de figuras

Figura 1. Representación de las moléculas en la interfase. Desbalance de fuerzas	11
Figura 2. Detección de la CMC en la curva de presión superficial en función del logaritmo de la composición.	17
Figura 3. Estructura química de los tensoactivos de estudio. a) cloruro de cetiltrimetilamonio, b) dodecilsulfato de sodio.	24
Figura 4 . Celda de medición de tensión superficial en tensiómetro Tantec ST-Plus	25
Figura 5. Representación del equipo empleado para la caracterización de espuma.....	26
Figura 6. Columna de espuma empleada para el control de espuma.....	27
Figura 7a. Diseño de columna de adsorción-espumación en modelado 3D.....	28
Figura 7b. Fotografía de la columna de adsorción-espumación.	29
Figura 8. Presión Superficial de interacción de CTAC y SDS.....	30
Figura 9. Presión Superficial de interacción de CTAC y SDS en función de logaritmo natural	31
Figura 10. Método Ross-miles para estabilidad de espuma de la Mezcla CTAC-SDS.....	32
Figura 11. Fotografías de la espuma del sistema CTAC-SDS ambos a su CMC durante el método Ross-Miles a 10 min. a) y b) parte inferior, c) y d) parte intermedia, e) y f) parte superior de la espuma.	33

Resumen

La pandemia global del COVID-19 ha instado a la búsqueda de estrategias efectivas para combatir el virus SARS-CoV-2. En este contexto, los tensoactivos catiónicos y aniónicos han emergido como agentes de interés, mostrando potencial en la inactivación del virus. La combinación de tensoactivos, como el cloruro de cetiltrimetilamonio (CTAC por sus siglas en inglés) y el dodecil sulfato de sodio (SDS por sus siglas en inglés), en una mezcla acuosa ha sido objeto de investigación para determinar su eficacia contra el virus. Este enfoque implica evaluar la Concentración Micelar Crítica (CMC) de la mezcla de tensoactivos para garantizar la formación de micelas necesarias para disolver la capa lipídica del virus. Asimismo, considerando la aplicación de la mezcla de tensoactivos en forma de espuma, se exploran las ventajas potenciales de esta presentación, como la eficiencia en la aplicación, reducción del consumo de agua y la posibilidad de implementación en diversos entornos.

En este análisis, se presentan los resultados de la tensión superficial de la solución CTAC-SDS mediante el método del anillo. Los datos fueron analizados utilizando las ecuaciones de estado superficial EES, como la ecuación integrada de adsorción de Gibbs y la isoterma de Langmuir. Los resultados indican que la actividad superficial del CTAC aumenta al añadir SDS. Se midió la altura y estabilidad de la espuma en función de la concentración del SDS utilizando el método de Ross-Miles. Se evaluó el comportamiento de la espuma frente al tiempo y el efecto de diferentes antiespumantes, incluyendo aceites vegetales, ácidos grasos, silicón, alcohol láurico etoxilado y aceite de ricino. El objetivo de mantener un flujo de aire constante en la solución virucida sin afectar la estabilidad de la espuma.

Objetivo

Evaluar la actividad superficial de la mezcla de tensoactivos catiónico y aniónico en solución acuosa, cloruro de cetiltrimetilamonio (CTAC) y dodecil sulfato de sodio (SDS) respectivamente, determinando la concentración micelar crítica mediante la medición de tensión superficial.

Metas

Determinar el comportamiento y control de la espuma evaluando la altura y estabilidad de la espuma formada por la mezcla CTAC-SDS en función de la concentración de los tensoactivos y el estudio del efecto de diferentes antiespumantes sobre la estabilidad de la espuma.

Introducción

El COVID-19 es una enfermedad infecciosa causada por el virus SARS-CoV-2, que se transmite principalmente por vía respiratoria. Desde su aparición a finales de 2019, el COVID-19 se ha convertido en una pandemia global que ha afectado a millones de personas y ha provocado cientos de miles de muertes [1]. Ante esta situación, se han desarrollado diversas medidas de prevención y control, como el uso de mascarillas, el distanciamiento social y la vacunación. Sin embargo, estas medidas no son suficientes para detener la propagación del virus, por lo que se requieren estrategias adicionales que puedan eliminar el virus del ambiente. Una de estas estrategias consiste en el uso de tensoactivos, que son sustancias capaces de modificar la tensión superficial de los líquidos y de interactuar con las membranas biológicas [2]. Los tensoactivos pueden clasificarse en catiónicos, aniónicos, no iónicos y anfóteros, según la naturaleza de su grupo polar [3]. Los tensoactivos catiónicos, como el cloruro de cetiltrimetilamonio (CTAC), tienen una carga positiva en su grupo polar y pueden unirse a la superficie negativa del virus, donde pueden romper su envoltura lipídica y liberar su material genético, inactivando al virus [4]. Los tensoactivos aniónicos, como el dodecil sulfato de sodio (SDS), tienen una carga negativa en su grupo polar y pueden formar complejos con el material genético del virus, impidiendo su replicación [5]. La combinación de ambos tipos de tensoactivos puede potenciar su efecto virucida, lo que puede estar determinado por la concentración micelar crítica (CMC) de los tensoactivos, que es la concentración mínima necesaria para que los tensoactivos se agrupen en estructuras esféricas llamadas micelas [6]. Sin embargo, el uso de tensoactivos catiónicos puede tener efectos adversos sobre la piel y las mucosas, como irritación, alergia o toxicidad [8]. Por ello, se propone la aplicación de la mezcla de tensoactivos en forma de espuma, que puede reducir el contacto directo con la solución y minimizar los riesgos para la salud. Además, la espuma tiene otras ventajas, como la reducción del consumo de agua, la mayor eficiencia en la aplicación y la posibilidad de implementación en diversos entornos, como hospitales, escuelas, oficinas o transporte público [9]. En este trabajo, se estudia la tensión superficial, la formación y la estabilidad de la espuma de la mezcla CTAC-SDS, así como su capacidad para inactivar el virus SARS-CoV-2, incorporando un procedimiento de sanitización del aire mediante un sistema de dos etapas en la columna de adsorción-espumación. La primera etapa consiste en la dispersión de gas en líquido, seguida por la segunda etapa donde el aire pasa a través de la espuma, permitiendo un tiempo de residencia adecuado para garantizar la eficacia del proceso de inactivación viral.

En conclusión, este trabajo propone el uso de tensoactivos y espumas como una estrategia alternativa para eliminar el virus SARS-CoV-2 del ambiente. El uso de espumas como vehículo de los tensoactivos ofrece varias ventajas frente a las soluciones líquidas convencionales. Por un lado, la espuma permite una mayor cobertura y adherencia a las superficies, lo que podría facilitar la eliminación de las partículas virales [10]. Por otro lado, la espuma reduce el consumo de agua y de tensoactivos, lo que supone un ahorro económico y ecológico [11]. Además, la espuma puede aplicarse de forma sencilla y rápida, mediante dispositivos portátiles o fijos, que pueden adaptarse a diferentes entornos y necesidades. La espuma de la mezcla CTAC-SDS ha demostrado una alta eficacia para inactivar el SARS-CoV-2 en superficies, tanto en condiciones de laboratorio como en escenarios reales, como hospitales, escuelas, oficinas o transporte público.

Termodinámica de superficie

Interfaces y tensión superficial

La **superficie** es la región de transición entre dos sistemas diferentes que se encuentran en contacto, como por ejemplo, la superficie líquido-vapor, que puede ser plana o curva [12]. La superficie es importante, ya que en ella se producen fenómenos que no ocurren en el interior de los sistemas, como la tensión superficial, la adsorción, la catálisis, etc. [12] Estos fenómenos también tienen aplicaciones prácticas en muchos campos de la ciencia, la tecnología y la vida cotidiana, e.g. elaboración de productos cosméticos, farmacéutica, control ambiental, entre otros. La superficie tiene una propiedad física llamada energía de superficie, que es la cantidad de trabajo necesario para crear una nueva superficie en un sistema, y depende de las fuerzas inter e intramoleculares de las moléculas en la superficie y las del interior del sistema, siendo mayor cuanto mayor sea la diferencia entre los tipos de energía presentes en las moléculas de la superficie y las del interior [13]. La energía de superficie también depende de la temperatura, la presión y la composición del sistema.

La **tensión superficial** es una propiedad física de los líquidos que se refiere a la fuerza que actúa en la superficie del líquido y que tiende a disminuir el área superficial al mínimo posible. Esta propiedad es el resultado de las fuerzas de cohesión entre las moléculas del fluido y está directamente relacionada con la energía de superficie. En el caso específico de la interfaz líquido-gas, la energía de superficie es igual a la tensión superficial multiplicada por el área de la interfaz [14].

La tensión superficial y la energía de superficie son propiedades intrínsecas de cada sustancia y dependen de factores como la temperatura, la presión y la composición del líquido [14]. Estos parámetros son fundamentales en procesos industriales como la emulsificación, la dispersión y la limpieza, así como en fenómenos naturales como las neblinas y las nubes. Estas fuerzas son diferentes en la superficie y en el interior del líquido, aunque en promedio se cancelan. Como las moléculas de la superficie tienen una energía distinta a la de las regiones internas (ver Figura 1), el sistema tiende a minimizar el total de energía reduciendo el número de moléculas superficiales; de este modo, el área del líquido se reduce al mínimo. Una de las propiedades de la tensión superficial indica que, cuanto mayor sea la fuerza de cohesión del líquido, mayor será su tensión superficial [15].

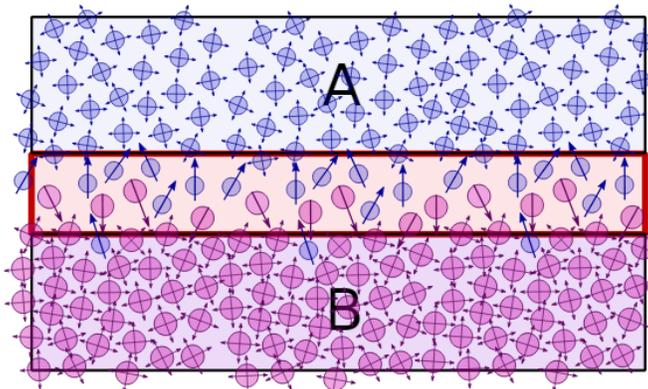


Figura 1. Representación de las moléculas en la interfase. Desbalance de fuerzas

Ecuación de adsorción de Gibbs

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, los potenciales termodinámicos en procesos reversibles al equilibrio y de varios componentes están dados como:

$$dU = TdS - PdV + \sum \mu_i dn_i \quad (1)$$

$$dH = TdS + VdP + \sum \mu_i dn_i \quad (2)$$

$$dF = -SdT - PdV + \sum \mu_i dn_i \quad (3)$$

$$dG = -SdT + VdP + \sum \mu_i dn_i \quad (4)$$

Donde U es la energía interna, H es la entalpía, F es la energía libre de Helmholtz, G es la energía libre de Gibbs, T es la temperatura, S es la entropía, P es la presión, V es el volumen, μ_i es el potencial químico del componente i , y n es la cantidad de materia del componente i . En los sistemas con superficie, se adiciona el término de la energía de superficie σdA , donde σ es la tensión superficial y A es el área [16] [17] [18]. Por tanto, la tensión superficial se puede definir como

$$\sigma = \left(\frac{dG}{dA} \right)_{P,T,n_i} \quad (5)$$

Por tanto los potenciales termodinámicos se reescriben como

$$dU^* = TdS^* - PdV^* + \sigma dA + \sum \mu_i dn_i^* \quad (6)$$

$$dH^* = TdS^* + V^*dP + \sigma dA + \sum \mu_i dn_i^* \quad (7)$$

$$dF^* = -S^*dT - PdV^* + \sigma dA + \sum \mu_i dn_i^* \quad (8)$$

$$dG^* = -S^*dT + V^*dP + \sigma dA + \sum \mu_i dn_i^* \quad (9)$$

En un proceso espontáneo donde $\Delta G < 0$ y debido a que $\sigma > 0$, siempre se tenderá a disminuir el área. Por lo que procesos donde se aumenta el área, como en la formación de espuma, no pueden ser espontáneos.

Al integrar la energía interna de un sistema con interfase se obtiene que

$$U^* = TS^* - PV^* + \sigma A + \sum \mu_i n_i^* \quad (10)$$

Por lo que al analizar la diferencial se obtiene

$$S^*dT - V^*dP + Ad\sigma + \sum n_i^*d\mu_i = 0 \quad (11)$$

De donde se obtiene, a temperatura y presión constante:

$$Ad\sigma = -\sum n_i^*d\mu_i \quad (12)$$

Donde se define la concentración de superficie como $\Gamma = n_i/A$, y la presión de superficie como $\pi = \sigma_0 - \sigma$, donde σ_0 es la tensión superficial del componente con mayor tensión superficial y por tanto $d\pi = -d\sigma$.

$$d\pi = \sum \Gamma_i d\mu_i \quad (13)$$

Al definir el potencial químico como $d\mu_i = RTd\ln(x_i)$ se obtiene la ecuación de adsorción de Gibbs

$$d\pi = \sum \Gamma_i RTd\ln(x_i) \quad (14)$$

Para un sistema con 2 componentes donde (1) corresponde al disolvente o agua, y (2) al soluto

$$d\pi = \Gamma_1 RTd\ln(x_1) + \Gamma_2 RTd\ln(x_2) \quad (15)$$

Debido a que el disolvente no contribuye al cambio de la presión superficial se considera cero en la superficie de la solución, ya que las moléculas del disolvente en la superficie no aumentan la energía superficial de la misma manera que lo harían los solutos. En una solución diluida, donde el disolvente es el componente mayoritario, su fracción molar (x_1) se aproxima a 1. Al aplicar el logaritmo natural a un número que tiende a 1, el resultado tiende a 0, por lo tanto, se obtiene:

$$d\pi = \Gamma_2 RTd\ln(x_2) \quad (16)$$

Por lo que

$$\Gamma = \frac{1}{RT} \left(\frac{d\pi}{d\ln(x)} \right)_T \quad (17)$$

$$\Gamma = \frac{x}{RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right)_T \quad (18)$$

Donde los subíndices no se escriben ya que solo depende del soluto. Al definir la fracción de espacios ocupados θ como $\theta = \Gamma/\Gamma_s$, donde Γ_s es la concentración superficial del soluto cuando la superficie esta satura de soluto. Por tanto

$$\theta = \frac{x}{\Gamma_s RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right)_T \quad (19)$$

En régimen diluido, donde la concentración del adsorbato es baja en comparación con la capacidad de adsorción del adsorbente. En este régimen, la interacción entre las moléculas adsorbidas es mínima y la adsorción ocurre en sitios aislados de la superficie. Se obtiene

$$\theta = \frac{x}{\Gamma_s RT} \left(\frac{d\pi}{dx} \right)_{x \rightarrow 0} \quad (20)$$

$$x \rightarrow 0; \frac{d\pi}{dx} = cte \quad (21)$$

$$\theta = \frac{cte}{\Gamma_s RT} x; \beta = \frac{cte}{\Gamma_s RT} \quad (22)$$

$$\theta = \beta x \quad (23)$$

Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir es un modelo matemático que describe el proceso de adsorción de moléculas sobre una superficie. La adsorción es el fenómeno por el cual las moléculas de una sustancia se concentran en la interfaz entre dos fases, como por ejemplo, entre un líquido y un gas, o entre un líquido y un sólido [20] [21]. La isoterma de Langmuir se basa en las siguientes suposiciones o postulados:

- I. Formación de una monocapa de moléculas adsorbidas
- II. Todos los sitios de la superficie tienen la misma probabilidad de ser ocupados
- III. No hay interacción entre moléculas adsorbidas

La isoterma de Langmuir se expresa de la siguiente forma:

$$\theta = \frac{\beta x}{1 + \beta x} \quad (24)$$

Donde θ es la fracción de la superficie cubierta por las moléculas adsorbidas, x es la fracción mol del componente que se adsorbe en la superficie, y β es una constante de equilibrio que depende de la temperatura y de la energía de adsorción, indica el reparto entre la superficie y la zona interna de una fase por lo que se le conoce como el parámetro hidrofóbico [22].

Al igualar la isoterma de Langmuir con la ecuación de Gibbs, que relaciona la tensión superficial con la concentración superficial de las moléculas adsorbidas [24], se obtiene:

$$\frac{1}{\Gamma_s RT} \frac{d\pi}{dx} = \frac{\beta}{1 + \beta x} \quad (25)$$

Al integrar la ecuación (21) con los límites de disolvente puro, $\pi=0$ cuando $x=0$, hasta una composición arbitraria x a la que corresponde la presión superficial π , la ecuación (21) toma la forma:

$$\int_0^x d\pi = \Gamma_s RT \int_0^x \frac{\beta}{1 + \beta x} dx \quad (26)$$

El resultado de la integral se conoce como ecuación de estado de superficie (EES) de Langmuir, que permite caracterizar materiales en disolución mediante los parámetros fundamentales $\Gamma_s RT$, concentración máxima en la interfase y coeficiente de reparto β [21].

$$\pi = \Gamma_s RT \ln(1 + \beta x) \quad (27)$$

Isoterma de Langmuir-BET

La ecuación de BET se aplica cuando la adsorción se produce en multicapas, es decir, cuando las moléculas pueden adsorberse sobre otras moléculas ya adsorbidas, formando capas sucesivas. La isoterma de adsorción de Gibbs nos permite transformar una isoterma en una ecuación de estado de superficie [28]. La isoterma de Langmuir-BET en interfaces fluido-fluido, acoplada con la ecuación de Gibbs, conduce a

$$\theta = \frac{x_2}{\Gamma_s RT} \left(\frac{d\pi}{dx_2} \right)_T = \frac{\beta x_2}{(1-x_2)(1-x_2+\beta x_2)} \quad (28).$$

De forma integral se obtiene.

$$\pi = \Gamma_s RT \ln \left(1 + \beta \frac{x_2}{(1-x_2)} \right) \quad (29).$$

La ecuación (24) es una extensión natural del modelo de Langmuir al caso multicapa; por lo tanto, llamaremos a esta ecuación, la ecuación de estado de superficie de Langmuir-BET [28]. Esta ecuación puede utilizarse al caso más común de comportamiento monocapa, así como también, para sistemas de superficie que muestren un punto de inflexión. La ventaja de esta ecuación es que puede obtenerse una solución analítica cuando el sistema alcanza la condición de saturación [28]. En este caso

$$\begin{aligned} \theta &\rightarrow 1 \\ x &\rightarrow x_{CMC} \\ \pi &\rightarrow \pi(CMC) \\ \Gamma &\rightarrow \Gamma_s \end{aligned}$$

Donde $\pi(CMC)$ es la presión superficial máxima y x_{CMC} es la fracción molar de la concentración micelar crítica. Por lo tanto la ecuación (23) toma la forma:

$$\frac{\beta x_{CMC}}{(1-x_{CMC})(1-x_{CMC}+\beta x_{CMC})} = 1 \quad (30)$$

O de forma explícita para β obtenemos:

$$\beta x_{CMC} = \left(\frac{1-x_{CMC}}{x_{CMC}} \right)^2 \quad (31)$$

Sustituyendo la ecuación (26) en la ecuación (24) conduce finalmente a una nueva ecuación de estado de superficie de Langmuir-BET que sólo contiene parámetros medibles [28].

$$\pi = \Gamma_s RT \ln \left[1 + \left(\frac{1-x_{CMC}}{x_{CMC}} \right)^2 \frac{x_2}{1-x_2} \right] \quad (32).$$

Lo cual se puede reescribir como

$$\pi = \Gamma_s RT \ln \left[1 + \frac{x_2}{x_{CMC}^2} \right] \quad (33).$$

En la saturación, se reduce a

$$\pi_{CMC} = \pi_s = -\Gamma_s RT \ln x_{CMC} \quad (34).$$

Esta última ecuación explica el comportamiento típico de los tensoactivos no iónicos etoxilados, para los cuales los miembros más hidrofóbicos muestran una menor concentración micelar crítica y una mayor presión superficial y, por otro lado, son más hidrofílicos [28]. La isoterma de Langmuir-BET permite caracterizar el comportamiento de los tensoactivos en las interfaces, y calcular parámetros importantes como la concentración micelar crítica (CMC), la energía de adsorción, la energía de micelización, la densidad superficial, el área ocupada por molécula, etc.

Ecuación de Gibbs integrada

La ecuación de adsorción de Gibbs se puede evaluar en la región saturada como [42]

$$\int_{\pi}^{\pi_s} d\pi = \Gamma_s RT \int_x^{x_{CMC}} d\ln(x)$$
$$\pi_s - \pi = \Gamma_s RT \ln x_{CMC} - \Gamma_s RT \ln x \quad (35)$$

Lo cual se puede reescribir como [42]

$$\pi = \pi_s - \Gamma_s RT \ln x_{CMC} + \Gamma_s RT \ln x \quad (36)$$

Ya que en una gráfica de presión superficial en función del logaritmo de la composición se puede hacer una regresión lineal para obtener Γ_s y x_{CMC} , ver Figura 2.

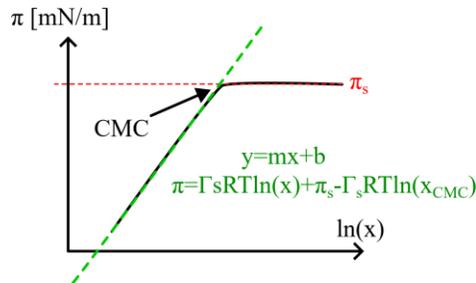


Figura 2. Detección de la CMC en la curva de presión superficial en función del logaritmo de la composición.

Tensoactivos

Los tensoactivos son sustancias que tienen la capacidad de modificar la tensión superficial de los líquidos. Poseen una estructura anfifílica, es decir, que poseen una parte hidrofílica (afín al agua) y una parte hidrofóbica (repelente al agua). Esto hace que las moléculas de tensoactivo se adsorban se orienten en la interfaz líquido-líquido o líquido-gas, y reduzcan la tensión superficial [22].

La **concentración micelar crítica CMC** es la concentración a partir de la cual los tensoactivos forman agregados esféricos llamados micelas, en los que las partes hidrofóbicas quedan orientadas hacia el interior y las partes hidrofílicas hacia el exterior [29].

Curvatura y Espumas

Ecuación de Young-Laplace

La ecuación de Young-Laplace describe la relación entre la diferencia de presión a través de la interfaz y la curvatura de esta, que depende de la tensión superficial del fluido [29]. La ecuación de Young-Laplace se puede derivar a partir de un balance de fuerzas sobre un elemento diferencial de superficie, considerando las fuerzas normales y tangenciales debidas a la presión y la tensión superficial. El resultado es la siguiente expresión matemática:

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (37).$$

donde ΔP es la diferencia de presión a través de la interfaz, σ es la tensión superficial del fluido, R_1 y R_2 son los radios de curvatura principales de la superficie. Los radios de curvatura principales son los inversos de las curvaturas principales, que son los valores máximos y mínimos de la curvatura normal en un punto dado de la superficie. La curvatura normal es la variación del ángulo que forma la normal a la superficie con la dirección perpendicular al plano tangente, al desplazarse a lo largo de una curva contenida en la superficie [29].

La ecuación de Young-Laplace se puede aplicar a cualquier forma de superficie, siempre que se conozcan los radios de curvatura principales. Sin embargo, existen algunos casos especiales donde la ecuación se simplifica considerablemente. Uno de ellos es el caso de una superficie esférica, como una burbuja o una gota, donde los dos radios de curvatura son iguales ($R_1 = R_2$) [30], y la ecuación se reduce a:

$$\Delta P = 2 \frac{\sigma}{R} \quad (38).$$

Otro caso especial es el de una superficie cilíndrica, como un tubo capilar o una hebra de líquido, donde uno de los radios de curvatura es infinito ($R_1 = \infty$) [30], y la ecuación queda como:

$$\Delta P = \frac{\sigma}{R} \quad (39).$$

Módulo de elasticidad de Gibbs

El módulo de elasticidad de Gibbs (ε) es una propiedad termodinámica que caracteriza la respuesta elástica de una solución a cambios en su composición y temperatura [31]. Se puede definir mediante la ecuación:

$$\varepsilon = 2 \frac{d\sigma}{d \ln A} \quad (40)$$

Mediante la definición de presión superficial y la fracción de espacios ocupados se puede reescribir como

$$\varepsilon = 2\theta \frac{d\pi/d \ln x}{d\theta/d \ln x} \quad (41)$$

La ecuación (41) muestra cómo la elasticidad superficial es afectada directamente por la actividad superficial y la adsorción de moléculas en la interfase.

El módulo de elasticidad, (ε), se define a través de las derivadas de la función ($\pi = \pi(\ln x)$), donde (π) representa la concentración superficial en exceso y (x) es la fracción molar en la fase volumétrica. Matemáticamente, el módulo de elasticidad se expresa como:

$$\varepsilon = 2 \frac{\left(\frac{d\pi}{d \ln x}\right)^2}{\frac{d^2\pi}{d \ln x^2}} \quad (42)$$

Aquí, ($d\pi/d \ln x$) es la primera derivada que indica cómo cambia la concentración superficial en exceso con respecto a ($\ln x$), y ($d^2\pi/d \ln x^2$) es la segunda derivada que muestra cómo varían estos cambios. Cerca de la concentración micelar crítica (CMC), el comportamiento del módulo de elasticidad de Gibbs es particularmente interesante. En esta región, la primera derivada se estabiliza y se aproxima a un valor constante debido a la formación de micelas, que actúan como un amortiguador para la concentración superficial en exceso. Como resultado, la segunda derivada tiende a cero, dado que la primera derivada se estabiliza, la tasa de cambio de la concentración superficial en exceso con respecto a ($\ln x$) disminuye. En términos físicos, esto indica que hay poca o ninguna variación en la cantidad de surfactante que se adsorbe en la interfaz a medida que se añade más surfactante cerca de la CMC.

El módulo de elasticidad de Gibbs es un indicador clave de cómo un sistema responde a las alteraciones en su composición, vinculando la energía libre con la proporción de sus componentes. Esencialmente, mide la reacción del sistema a los cambios internos. [31]. Además, mide la capacidad de una solución de formar espuma al variar su composición y temperatura. La solución contiene un anfifilo, que es una molécula con una parte soluble en agua y otra que no lo es. La espuma se produce cuando el anfifilo forma capas que rodean burbujas de gas en la solución. Sin embargo, la espuma no es un sistema estable, sino un coloide, que es una mezcla de partículas muy pequeñas de una fase dispersa en otra fase continua [32]. Por lo tanto, el módulo de elasticidad de Gibbs no puede determinar la durabilidad de la espuma, sino que se requieren otros factores que influyen en la estabilidad coloidal, como la tensión superficial.

Formación y ruptura de las espumas

Las espumas son sistemas físicos formados por burbujas de gas rodeadas por una delgada película líquida. Estas películas se mantienen estables gracias a la presencia de sustancias tensoactivas, que reducen la tensión superficial del líquido y evitan que las burbujas se rompan o se fusionen. Las espumas se encuentran comúnmente en la naturaleza, por ejemplo, en las olas del mar, en las nubes y en la espuma de la cerveza. También tienen numerosas aplicaciones en la industria, la medicina, la agricultura, la construcción y la vida cotidiana [33]. Por ejemplo, las espumas se utilizan para la extracción y el transporte de petróleo, para la limpieza y el tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de alimentos y bebidas, para la elaboración de cosméticos y productos de higiene personal, para la producción de materiales de construcción y aislantes, para la generación de energía y para la investigación de fenómenos físicos complejos.

Las espumas se pueden clasificar según la naturaleza del líquido y del gas que las componen, así como por su duración y su estructura. Por ejemplo, las espumas acuosas son aquellas en las que el líquido es agua, mientras que las espumas no acuosas son las que contienen otros líquidos, como aceites, alcoholes o disolventes. Las espumas transitorias son las que duran poco tiempo, como la del agua del mar o la del champán, mientras que las espumas permanentes son las que persisten durante horas, días o incluso años, como la del jabón o la del poliuretano. Las espumas abiertas son las que tienen una gran proporción de gas y pocas películas líquidas, como la del afeitado o la del merengue, mientras que las espumas cerradas son las que tienen una menor proporción de gas y muchas películas líquidas, como la del helado o la del corcho [33] [34].

Las espumas presentan propiedades físicas y químicas muy interesantes, que dependen de la forma, el tamaño, la distribución y la interacción de las burbujas. Algunas de estas propiedades son la densidad, la viscosidad, la elasticidad, la conductividad, la permeabilidad y la capacidad de aislamiento térmico y acústico. Estas propiedades se pueden modificar alterando las condiciones de formación y estabilización de las espumas, como la temperatura, la presión, el pH, la concentración y el tipo de tensoactivos, la agitación y la inyección de gas [35].

La ruptura de las espumas es el proceso por el cual las películas líquidas que separan y las burbujas se rompen, provocando la coalescencia o fusión de las burbujas y la disminución del área superficial total de la espuma [36]. Este proceso puede ocurrir por diferentes mecanismos, tales como: a) El drenaje gravitacional que consiste en la caída del líquido contenido en las paredes de las burbujas hacia el cuerpo principal del líquido, debido a la fuerza de la gravedad. Esto hace que las películas se adelgacen y se debiliten, facilitando su ruptura [37]. b) La succión capilar consiste en la atracción del líquido hacia las regiones donde las burbujas están más comprimidas, debido a la diferencia de presión entre las burbujas. Esto genera un flujo de líquido que puede romper las películas más delgadas o crear puentes líquidos entre las burbujas, favoreciendo su coalescencia [37]. c) La difusión gaseosa consiste en el intercambio de gas entre las burbujas, debido a la diferencia de presión o de composición entre ellas. Esto provoca que las burbujas más pequeñas pierdan gas y se encojan, mientras que las burbujas más grandes ganen gas y se expandan. Esto altera la geometría y la estabilidad de la espuma, y puede causar la ruptura de las películas más

estresadas mecánicamente [37]. d) La contaminación consiste en la presencia de sustancias extrañas que interfieren con la acción de los agentes estabilizadores de la espuma, como los tensoactivos. Estas sustancias pueden adsorberse en la interfase gas-líquido, desplazando o neutralizando a los tensoactivos, o pueden disolverse en el líquido, alterando sus propiedades fisicoquímicas. Esto puede resultar en una disminución de la elasticidad, la viscosidad o la repulsión eléctrica de las películas, y en un aumento de la tensión superficial o la fuerza de atracción de dispersión. Estos cambios pueden inducir la ruptura de las películas por la inestabilidad de estas [38].

La ruptura de las espumas puede ser un fenómeno deseado o indeseado, dependiendo de la aplicación o el propósito de la espuma. Por ejemplo, en la industria alimentaria, se busca que las espumas sean estables y duraderas, para mejorar la textura, el sabor y el aspecto de los productos. En cambio, en la industria petrolera, se busca que las espumas se rompan fácilmente, para evitar problemas de transporte, separación y tratamiento del petróleo [36]

Antiespumantes

Los antiespumantes son aditivos químicos que reducen o eliminan la formación de espuma en los líquidos de procesos industriales. La espuma puede causar problemas como defectos en los revestimientos superficiales, dificultades en el llenado de recipientes, interferencias en las operaciones de separación y pérdida de rendimiento. Los antiespumantes actúan introduciendo imperfecciones en las capas de espuma, rompiendo así las burbujas de aire y liberando el líquido atrapado [39]. Existen diferentes tipos de antiespumantes según su composición y aplicaciones, entre los que se encuentran:

Antiespumantes a base de aceite: Estos antiespumantes se componen de un transportador de aceite, tal como aceite mineral, vegetal o blanco, que no se disuelve en el medio generador de espuma. Además, incluyen ceras y/o sílices hidrofóbicas para potenciar su efectividad. Se usan en industrias como la alimentaria, la cosmética, la farmacéutica, la textil y la de tratamiento de aguas [39].

Antiespumantes a base de silicona: Estos antiespumantes se basan en polidimetilsiloxanos (aceites de silicona) dispersos en agua o aceite. Los aceites de silicona tienen una baja tensión superficial y una alta capacidad de esparcimiento, lo que les permite penetrar rápidamente en las capas de espuma y desestabilizarlas. Se usan en industrias como la de pinturas, tintas, barnices, detergentes, fermentación y pulpa y papel [40].

Antiespumantes a base de agua: Estos antiespumantes son emulsiones de aceite en agua que contienen agentes activos antiespumantes, como aceites minerales, vegetales o de silicona, y emulsionantes. Se usan en medios acuosos, como los sistemas de refrigeración, las torres de lavado, las plantas de tratamiento de efluentes y las industrias de alimentos y bebidas [40].

Antiespumantes de origen vegetal: Estos antiespumantes son sustancias naturales que se extraen de plantas o algas y que tienen propiedades antiespumantes. Algunos ejemplos son el alginato de calcio, la lecitina, el aceite de coco y el aceite de palma. Se usan en industrias como la alimentaria, la cosmética, la farmacéutica y la biotecnológica [40].

Antiespumantes de origen mineral: Estos antiespumantes son sustancias inorgánicas que se obtienen de minerales y que tienen propiedades antiespumantes. Algunos ejemplos son el dióxido de silicio amorfo, el carbonato de calcio, el talco y la bentonita. Se usan en industrias como la de pinturas, tintas, barnices, cerámica, vidrio y cemento [41].

Los antiespumantes son productos químicos complejos que requieren un diseño y una selección adecuados para cada aplicación específica. Algunos factores que influyen en la eficacia de los antiespumantes son la temperatura, el pH, la viscosidad, la concentración, la compatibilidad y la estabilidad del medio espumante. Los antiespumantes se pueden aplicar de forma continua o por lotes, dependiendo de las condiciones del proceso. Los antiespumantes se pueden medir y controlar mediante métodos analíticos, como la prueba de espuma, la prueba de agitación, la prueba de drenaje y la prueba de estabilidad [41].

Los antiespumantes son aditivos esenciales para mejorar la calidad y la productividad de muchos procesos industriales. Sin embargo, también pueden tener efectos negativos sobre el

medio ambiente y la salud humana si no se usan correctamente. Algunos antiespumantes pueden ser tóxicos, irritantes, alergénicos o biocidas. Por lo tanto, se deben seguir las normas de seguridad y las regulaciones pertinentes para el manejo, el almacenamiento, el transporte y la disposición de los antiespumantes. Además, se deben buscar alternativas más ecológicas y sostenibles, como los antiespumantes biodegradables, biológicos o de origen natural [39].

Materiales y Metodología

Se midió tensión superficial mediante el método del anillo. Se midió la altura y estabilidad de la espuma en función de la concentración de los tensoactivos por el método de Ross-Miles [43]. Se evaluó el efecto de antiespumantes en una columna de adsorción-espumación.

Reactivos

1. Cloruro de cetiltrimetilamonio (CTAC) $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{Cl})(\text{CH}_3)_3$, Sigma-Aldrich, Lot. STBJ2560, 25 wt. % in H_2O , MM: 320.00 g/mol, ver Figura 3a. Se usó sin tratamiento.
2. Dodecil sulfato de sodio (SDS) $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$, Sigma-Aldrich, Lot. STBJ5119, MM: 238.38 g/mol, ver Figura 3b. Se usó sin tratamiento.
3. Agua desionizada con resistividad eléctrica de 18.2 $\text{m}\Omega$ y conductividad de 1.088 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 298.15 K del purificador PURELAB Flex 1.
4. Ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 98.2% GT, Alquimia Mexicana, S. de R.L. Lot. 270409-G, MM: 98.08 g/mol. Se usó sin tratamiento
5. Aceite de oliva extra virgen, Bertolli. Se uso sin tratamiento.
6. Aceite de coco extra virgen, San Lucas. Se uso sin tratamiento
7. Aceite de canola, Capullo. Se uso sin tratamiento
8. Ácido oleico, GT, Droguería Cosmopolita. Se usó sin tratamiento
9. Ácido esteárico, GT, Droguería Cosmopolita. Se usó sin tratamiento
10. Silicon ciclopentasiloxano GT, Droguería Cosmopolita. Se usó sin tratamiento
11. Alcohol láurico etoxilado, GT, Droguería Cosmopolita. Se usó sin tratamiento
12. Aceite de ricino, GT, Droguería Cosmopolita. Se usó sin tratamiento

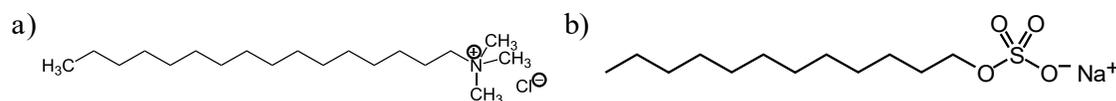


Figura 3. Estructura química de los tensoactivos de estudio. a) cloruro de cetiltrimetilamonio, b) dodecilsulfato de sodio.

Tensión superficial

Se prepararon diluciones acuosas seriadas de CTAC para medir la tensión superficial de cada una. Las diluciones se prepararon por masa en la balanza analítica Mettler Toledo PM 400 con resolución de 0.001g. La tensión superficial se midió en una celda de doble pared para mantener constante la temperatura a 298.15 K, ver Figura 4. El tensiómetro digital Tantec ST Plus se utilizó para medir la tensión superficial. El anillo se colocó en el equipo y se colocó la tara en el peso del mismo. El anillo fue sumergido en la solución y se dejó reposar por 10 minutos. La superficie de la solución se deformó descendiendo la celda. El valor máximo de masa se registró y se utilizó para el cálculo de la tensión superficial. Este paso se realizó aproximadamente 4 veces y se utilizó el promedio de los 3 últimos datos registrados. Al finalizar la medición, el anillo se retiró del equipo y se limpió con una solución de etanol-acetona para limpiarlo, finalmente, se flameó el anillo para eliminar cualquier residuo remanente en el anillo. Esto se realizó en cada una de las diluciones medidas. Mediante el análisis con ecuaciones de estado de los valores de tensión superficial en función de la concentración de tensoactivo se determinó la concentración micelar crítica (CMC).

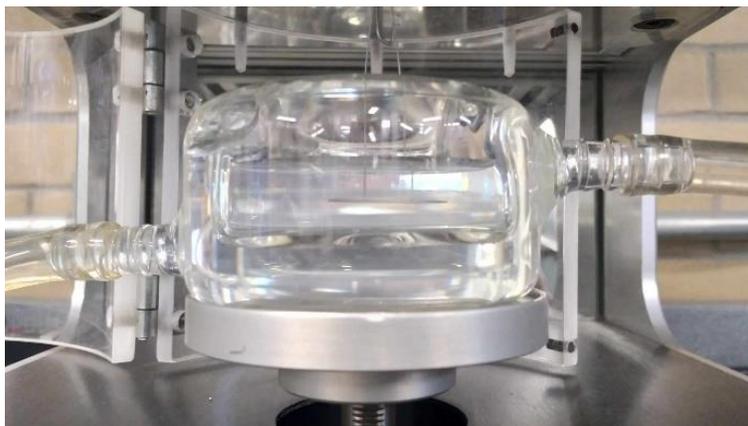


Figura 4 . Celda de medición de tensión superficial en tensiómetro Tantec ST-Plus

La tensión superficial se calculó con la ecuación (36). Donde m es la masa máxima del líquido elevado por encima de la superficie libre del líquido, g es el valor de la gravedad (977.9416cm/s² en Ciudad Universitaria), R es el radio del anillo y f es el valor del factor de corrección aplicado a este método para obtener la tensión superficial real o absoluta.

$$\sigma = \frac{mg}{4\pi R} f \quad (43)$$

Las soluciones de la mezcla CTAC-SDS se prepararon variando la concentración de CTAC y se añadió SDS a una concentración constante e igual a su CMC.

Estabilidad de espuma

La estabilidad de la espuma se evaluó mediante el método Ross-Miles [43]. Se formuló una solución espumante compuesta por CTAC y SDS, ambos a sus CMC. Donde 200 mL de la solución formadora de espuma homogeneizada se colocaron en el recipiente receptor superior y 50 mL se dejaron en la columna, ver Figura 5. La solución del recipiente receptor fluyó a través de la columna, generando espuma como resultado de la turbulencia al mezclarse con la solución en la columna. La altura de la espuma se midió una vez que el recipiente receptor superior estuvo vacío y luego a intervalos de 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Adicionalmente, se capturaron fotografías de la espuma con un microscopio digital Dino-Lite USB.

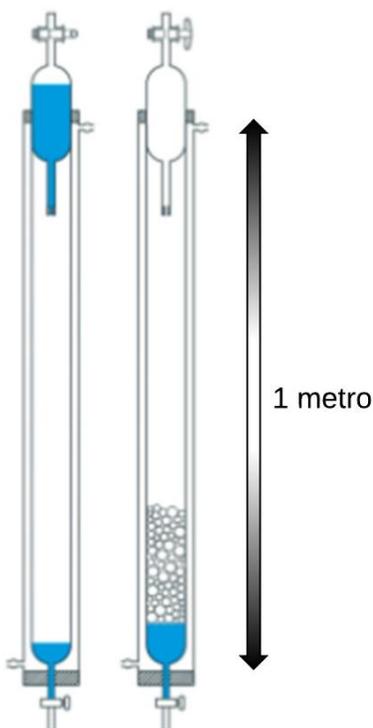


Figura 5. Representación del equipo empleado para la caracterización de espuma

Control de espuma

El control de espuma hace referencia a mantener la altura de la espuma constante durante el proceso de formación de espuma. Para controlar la altura de la espuma del sistema CTAC-SDS se evaluó el efecto de diferentes antiespumantes. Los antiespumantes evaluados fueron el aceite de oliva, canola y coco, ácido oleico, esteárico, ciclopentasiloxano, alcohol láurico etoxilado de 9 moles y aceite de ricino, así como también, se evaluaron los hidrolizados correspondientes a los aceites de oliva, canola y coco. Los aceites se hidrolizaron al adicionar 200 μL de ácido sulfúrico al 98.2%. Las soluciones por espumar del sistema CTAC-SDS, ambos a su CMC, con antiespumante se prepararon añadiendo 5 mL del antiespumante. Las soluciones se espumaron en una columna de vidrio de 30 cm de longitud y 1.5 cm de diámetro interno a 0.2 LPM, ver Figura 6. Se evaluó si la espuma generada por la disolución desbordaba de la columna. En los casos donde la espuma no desbordaba se aumentó el flujo hasta 0.8 LPM y se seleccionó el mejor antiespumante como aquel que a 0.8 LPM mantenía constante la altura de la espuma.



Figura 6. Columna de espuma empleada para el control de espuma

Columna de adsorción-espumación

La altura de la espuma del sistema CTAC-SDS con el mejor antiespumante fue evaluada en una columna de 1 m de altura y 8.5 cm de diámetro interno, para evaluar el sistema en una escala de planta piloto, ver Figuras 7a y 7b. La columna de adsorción-espumación TM-SA-003 está compuesta por dos cilindros de acrílico unidos mediante bridas, se encuentra sostenida mediante una estructura de acero. Contiene un motor para la suministración de aire, una salida de desbordamiento de espuma, y en la parte inferior cuenta con una salida de drenaje de líquido y una entrada para aire que conecta con un vidrio poroso. En este diseño se incluye el uso de pellets de acero inoxidable de 1 cm de diámetro exterior y 0.8 cm de diámetro interior, sostenidos por una malla con el fin de no dañar el vidrio poroso y aumentar el tiempo de residencia de la espuma. La altura de la espuma con tres valores de flujo, 10, 15 y 20 LPM, se midió durante la operación de la columna.

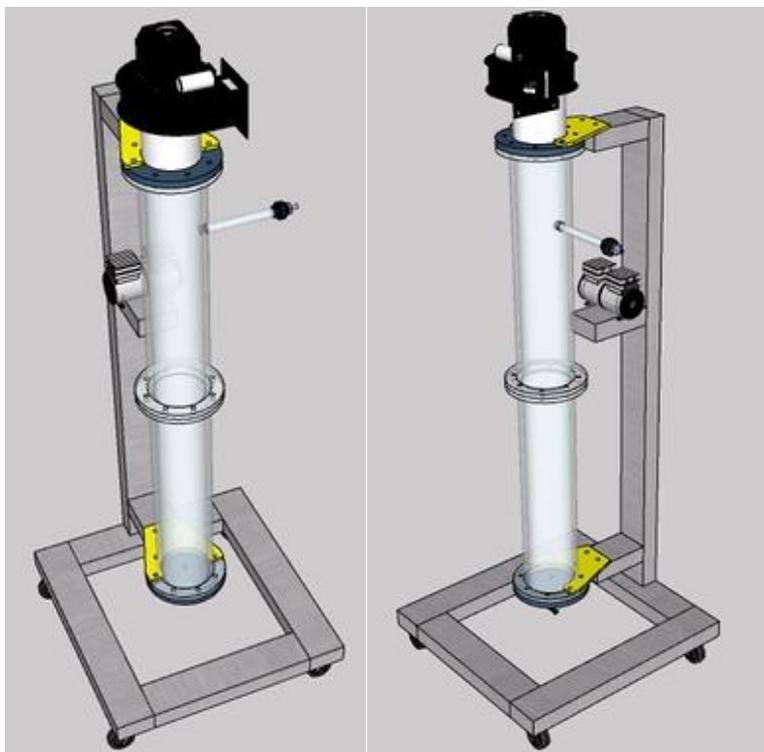


Figura 7a. Diseño de columna de adsorción-espumación en modelado 3D

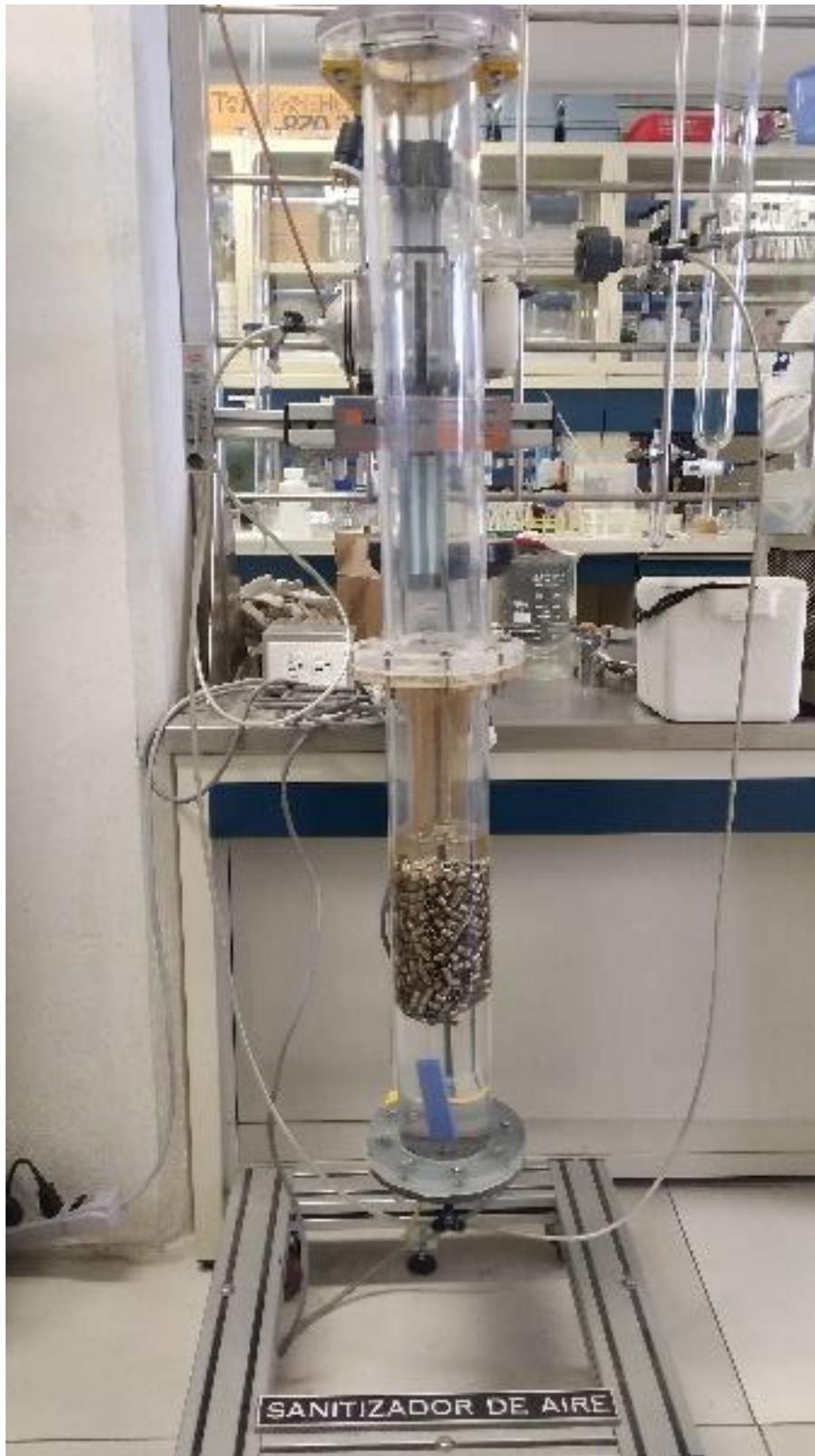


Figura 7b. Fotografía de la columna de adsorción-espumación. Dimensiones: 1 metro de altura y 8.5 cm de diámetro interno

Análisis de Resultados

Tensión Superficial

La tabla con resultados de concentración, tensión y presión superficial se muestran en el Anexo A y B. La Figura 8 muestra la presión superficial en función de la fracción mol y el ajuste de la ecuación de estado de Langmuir para los sistemas CTAC y CTAC-SDS desde la región diluida hasta la saturación. Se observa que el parámetro hidrofóbico es mayor para el caso de la mezcla CTAC-SDS que para el sistema CTAC, ver Tabla 1. Para el caso de $\Gamma_s RT$ la mezcla CTAC-SDS mostró una menor concentración a saturación. En la tabla 2 se muestra una comparación de las propiedades de superficie para ambos sistemas obtenidos mediante la EES de Langmuir

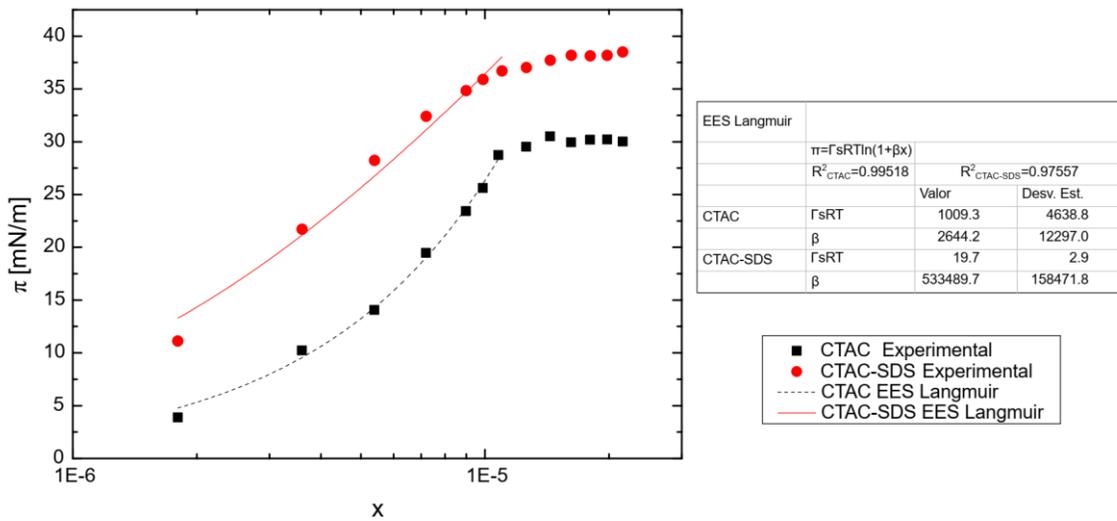


Figura 8. Presión Superficial de interacción de CTAC y SDS

Tabla 1. Propiedades de superficie para CTAC y CTAC-SDS en solución acuosa obtenidos mediante la EES de Langmuir

Sistema	π_{sat} [mN/m]	$A_{min} = 1/\Gamma_s$ [Å ² /molécula]	β	$x_{CMC} \times 10^5$	R^2
CTAC	30.06	0.4	2644	1.14	0.9951
CTAC-SDS	37.95	20.9	533489	1.10	0.9751

La Figura 9 muestra la presión superficial en función del logaritmo natural de la fracción mol y el ajuste de la ecuación de estado de Gibbs para el sistema CTAC y CTAC-SDS desde la región diluida hasta la saturación. Se observa que el área mínima es mayor para el caso de la mezcla CTAC-SDS con respecto al sistema CTAC, ver Tabla 2. Esto puede ser debido a que la molécula del tensoactivo es más grande o tiene una estructura más compleja.

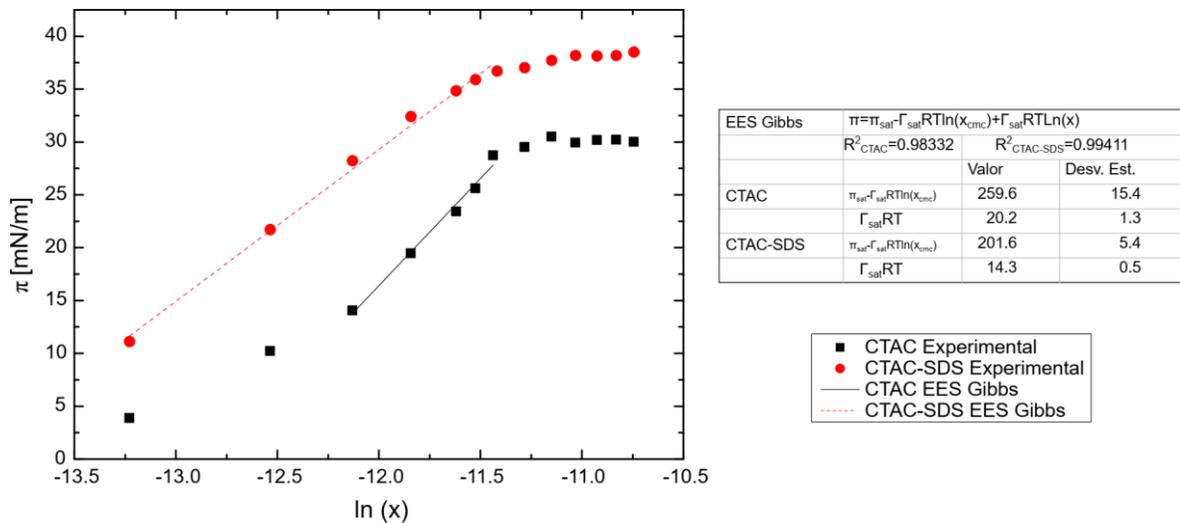


Figura 9. Presión Superficial de interacción de CTAC y SDS en función de logaritmo natural

Tabla 2. Propiedades de superficie para CTAC y CTAC-SDS en solución acuosa obtenidos mediante la EES de Gibbs

Sistema	$A_{min} = 1/\Gamma_s$ [Å ² /molécula]	$x_{CMC} \times 10^5$	R^2
CTAC	20.4	1.16	0.9833
CTAC-SDS	28.8	1.07	0.9941

Se observó que la presión superficial de la mezcla CTAC-SDS es mayor que la de la solución de CTAC. Este comportamiento se atribuye a la interacción entre ambos tensoactivos. Se propone que la parte catiónica del CTAC interactúa con la parte aniónica del SDS, formando un complejo con carga neta nula. Este complejo posee una sola cabeza hidrofílica y dos colas hidrofóbicas, lo que aumenta su tamaño e hidrofobicidad. Como consecuencia, la tendencia de este complejo a migrar a la interfase aire-líquido aumenta, elevando la presión superficial.

Estabilidad de espuma

Los resultados de la estabilidad de la espuma mediante la técnica Ross-Miles se muestran en el Anexo C. La Figura 10 muestra la altura en función del tiempo para los sistemas SDS y CTAC-SDS, a diferentes concentraciones. Se observa que el sistema SDS a 175% de su CMC mostró la mayor altura de espuma. Las mezclas CTAC-SDS mostraron alturas de espuma menores al SDS a 175% de su CMC pero mayores a la del SDS a 10% de su CMC. Se analizó la estabilidad de espuma como el cociente de la altura inicial entre la diferencia de alturas inicial y final, ver Tabla 3. La altura inicial de espuma permite observar la capacidad instantánea de formación de espuma y la elasticidad de la solución. La diferencia de altura inicial y final de la espuma permite observar si la altura es constante en función del tiempo. Conforme el cociente de la altura inicial y la diferencia de alturas aumenta, la estabilidad de la espuma aumenta. Se observó que el sistema que generó la espuma más estable fue el sistema SDS al 175% de CMC y los sistemas CTAC-SDS en la CMC y al 50% de la CMC del SDS.

Tabla 3. Estabilidad de la espuma para cada sistema

Sistema	$H_0/\Delta H$
SDS a 175% de CMC	7.14
CTAC-SDS a 150% de CMC	7.70
CTAC-SDS a 125% de CMC	6.66
CTAC-SDS a CMC	7.14
CTAC-SDS a 50% de CMC	7.14
CTAC-SDS a 25% de CMC	3.33
SDS a 10% de CMC	1.25

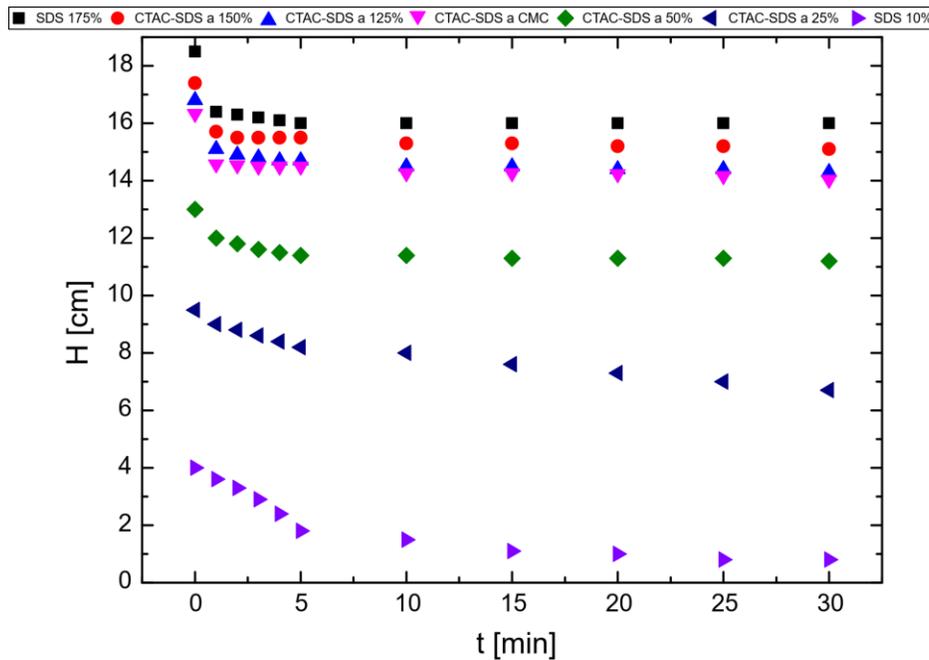


Figura 10. Método Ross-miles para estabilidad de espuma de la Mezcla CTAC-SDS

Adicionalmente, se fotografió la espuma generada por el sistema CTAC-SDS, ambos a su CMC, ver Figura 11.

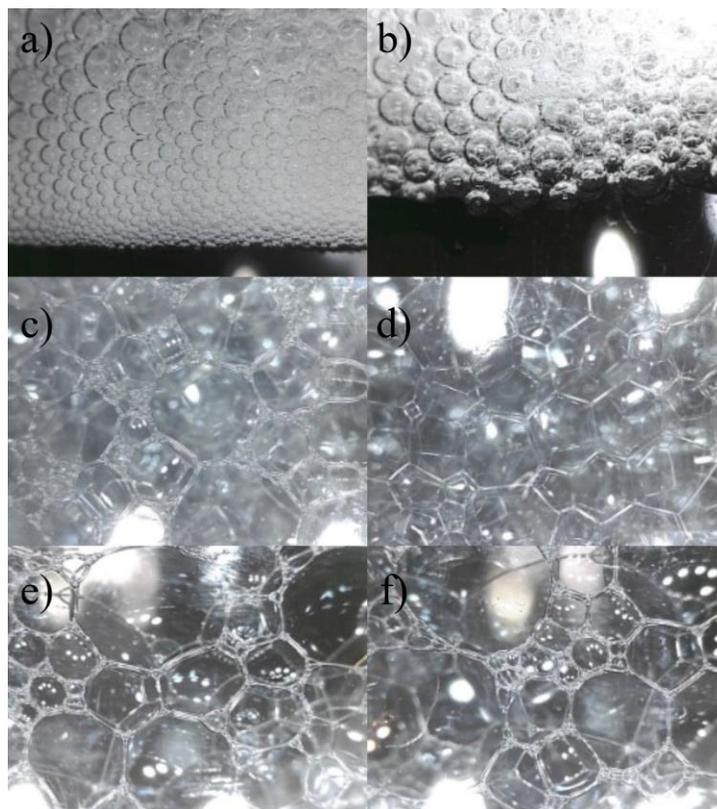


Figura 11. Fotografías de la espuma del sistema CTAC-SDS ambos a su CMC durante el método Ross-Miles a 10 min. a) y b) parte inferior, c) y d) parte intermedia, e) y f) parte superior de la espuma.

La tabla 4 muestra el tamaño y desviación estándar de las burbujas de la espuma de la Figura 11. Se observa que en la parte inferior de la espuma, el tamaño de las burbujas es pequeño y con una baja desviación estándar. En la parte intermedia de la espuma se observa que el tamaño de las burbujas aumenta, así como la desviación estándar. En la parte superior de la espuma se observa que el tamaño de las burbujas es aún mayor y la desviación estándar es más alta. Esto puede ser por la diferencia de presión entre la parte superior e inferior de la espuma, la coalescencia entre las burbujas y el drenaje o escurrimiento del líquido a través de las lamelas provocado por el debilitamiento de los bordes de Plateau.

Tabla 4. Tamaño y desviación estándar de las burbujas en la espuma formada por el sistema CTAC-SDS ambos a su CMC

Parte de espuma	Tamaño de Celda [mm]
Inferior	1.53±1.07
Intermedia	15.66±5.57
Superior	21.63±13.83

Control de espuma

En la tabla 5 se presenta el análisis de control de la altura de espuma con los antiespumantes empleados. Se observó que, salvo los aceites hidrolizados, los antiespumantes utilizados incrementaban el volumen y altura de la espuma, presentando propiedades de una espuma persistente. Los aceites vegetales hidrolizados fueron los únicos que funcionaron como antiespumantes, con un control efectivo sobre la formación de espuma.

Tabla 5. Control de espuma mediante la adición de antiespumantes.

Antiespumante	¿Disminuyo la altura de la espuma?
Aceite de oliva	No
Aceite de coco	No
Aceite canola	No
Aceite de oliva hidrolizado	Si
Aceite de coco hidrolizado	Si
Aceite de canola hidrolizado	Si
Ácido oleico	No
Ácido esteárico	No
Ciclopentasiloxano	No
Alcohol láurico etoxilado de 9 moles	No
Aceite de ricino	No

Columna de adsorción-espumación

Se midió la altura de la espuma en la columna de adsorción-espumación para el sistema CTAC-SDS ambos a su CMC con la adición del aceite de canola hidrolizado. Se evaluó el tiempo de residencia a diferentes flujos de aire, y el promedio con desviación estándar ver Tabla 6. Se observó que, un menor flujo de aire presenta un tiempo de residencia mayor en la columna de adsorción-espumación. Esto se debe a que la menor velocidad del gas reduce la pérdida de carga, aumentando el ΔP que impulsa la absorción del gas y la formación de espuma, reteniendo el gas por más tiempo. Así como también, una mayor densidad de la espuma, junto con un menor tamaño de burbuja, aumenta el tiempo de residencia.

Tabla 6. Parámetros del control de espuma para el sistema CTAC-SDS en columna de adsorción.espumación.

<i>Flujo (LPM)</i>	<i>Altura de espuma (cm)</i>	<i>Tiempo de residencia (min)</i>	<i>Promedio \pm Desv.Est. (min)</i>
20	51	0.16	
20	60	0.18	0.17 \pm 0.01
20	61	0.19	
15	38	0.15	
15	61	0.25	0.19 \pm 0.04
15	44	0.18	
10	61	0.37	
10	74	0.45	0.39 \pm 0.05
10	56	0.34	

Conclusiones

En este trabajo se estudió el efecto de la mezcla de dos tensoactivos, el cloruro de cetiltrimetilamonio (CTAC) y el dodecil sulfato de sodio (SDS), sobre la formación y estabilidad de espuma. Se compararon las propiedades de la mezcla CTAC-SDS con las de los sistemas individuales CTAC y SDS. Se midieron el parámetro hidrofóbico, el área mínima, la presión superficial, la altura de espuma, el tamaño de burbuja y el tiempo de residencia. Además, se evaluó el efecto de algunos antiespumantes, como los aceites vegetales hidrolizados, sobre la espuma generada.

Se observó que el parámetro hidrofóbico es mayor para el caso de la mezcla CTAC-SDS que para el sistema CTAC. Esto se atribuye a la interacción entre ambos tensoactivos. Se propone que la parte catiónica del CTAC interactúa con la parte aniónica del SDS, formando un complejo con carga neta nula. Este complejo posee una sola cabeza hidrofílica y dos colas hidrofóbicas, lo que aumenta su tamaño e hidrofobicidad. Como consecuencia, la tendencia de este complejo a migrar a la interfase aire-líquido aumenta, elevando la presión superficial. Para el caso de ΓsRT la mezcla CTAC-SDS mostró una menor concentración a saturación.

Se observó que el área mínima es mayor para el caso de la mezcla CTAC-SDS con respecto al sistema CTAC. Esto puede ser debido a que la molécula del tensoactivo es más grande o tiene una estructura más compleja. El área mínima es un indicador de la rigidez de la película superficial, que influye en la estabilidad de la espuma.

Se observó que el sistema SDS a 175% de su CMC mostró la mayor altura de espuma. Las mezclas CTAC-SDS mostraron alturas de espuma menores al SDS a 175% de su CMC pero mayores a la del SDS a 10% de su CMC. Se analizó la estabilidad de espuma como el cociente de la altura inicial entre la diferencia de alturas inicial y final. La altura inicial de espuma permite observar la capacidad instantánea de formación de espuma y la elasticidad de la solución. La diferencia de altura inicial y final de la espuma permite observar si la altura es constante en función del tiempo. Conforme el cociente de la altura inicial y la diferencia de alturas aumente, la estabilidad de la espuma aumenta. Se observó que el sistema que generó la espuma más estable fue el sistema SDS al 175% de CMC y los sistemas CTAC-SDS en la CMC y al 50% de la CMC del SDS.

Se observó que en la parte inferior de la espuma, el tamaño de las burbujas es pequeño y con una baja desviación estándar. En la parte intermedia de la espuma se observa que el tamaño de las burbujas aumenta, así como la desviación estándar. En la parte superior de la espuma se observa que el tamaño de las burbujas es aún mayor y la desviación estándar es más alta. Esto puede ser por la diferencia de presión entre la parte superior e inferior de la espuma, la coalescencia entre las burbujas y el drenaje o escurrimiento del líquido a través de las lamelas provocado por el debilitamiento de los bordes de Plateau.

Se observó que, un menor flujo de aire presenta un tiempo de residencia mayor en la columna de adsorción-espumación. Esto se debe a que la menor velocidad del gas reduce la pérdida de carga, aumentando el ΔP que impulsa la absorción del gas y la formación de espuma, reteniendo el gas por más tiempo. Así como también, una mayor densidad de la espuma,

junto con un menor tamaño de burbuja, aumenta el tiempo de residencia. El tiempo de residencia es un factor importante para la eficiencia de la separación de los componentes del gas.

Se observó que, salvo los aceites hidrolizados, los antiespumantes utilizados incrementaban el volumen y altura de la espuma, presentando propiedades de una espuma persistente. Los aceites vegetales hidrolizados fueron los únicos que funcionaron como antiespumantes, con un control efectivo sobre la formación de espuma. Los antiespumantes son sustancias que rompen o previenen la formación de espuma, y se usan cuando la espuma es indeseable o perjudicial para el proceso.

Anexos

Anexo A. Resultados de medición de tensión superficial por el método del anillo para el sistema CTAC.

<i>Muestra</i>	<i>Concentración (M)</i>	<i>Concentración (X)</i>	σ (mN/m)	<i>Ln X</i>	<i>Π</i>
Tubo 1	1.20E-03	2.16E-05	41.11	-10.74	30.00
Tubo 2	1.10E-03	1.98E-05	40.91	-10.83	30.20
Tubo 3	1.00E-03	1.80E-05	40.92	-10.93	30.19
Tubo 4	9.00E-04	1.62E-05	41.18	-11.03	29.93
Tubo 5	8.00E-04	1.44E-05	40.61	-11.15	30.50
Tubo 6	7.00E-04	1.26E-05	41.60	-11.28	29.51
Tubo 7	6.00E-04	1.08E-05	42.37	-11.44	28.74
Tubo 8	5.50E-04	9.89E-06	45.49	-11.52	25.61
Tubo 9	5.00E-04	8.99E-06	47.67	-11.62	23.44
Tubo 10	4.00E-04	7.19E-06	51.64	-11.84	19.47
Tubo 11	3.00E-04	5.39E-06	57.04	-12.13	14.07
Tubo 12	2.00E-04	3.60E-06	60.88	-12.54	10.23
Tubo 13	1.00E-04	1.80E-06	67.22	-13.23	3.88

Anexo B. Resultados de medición de tensión superficial por el método del anillo para el sistema CTAC-SDS.

<i>Muestra</i>	<i>Concentración (M)</i>	<i>Concentración (X)</i>	σ (mN/m)	<i>Ln X</i>	<i>Π</i>
Tubo 1	1.20E-03	2.16E-05	33.00	-10.74	38.49
Tubo 2	1.10E-03	1.98E-05	33.31	-10.83	38.18
Tubo 3	1.00E-03	1.80E-05	33.35	-10.93	38.13
Tubo 4	9.00E-04	1.62E-05	33.32	-11.03	38.17
Tubo 5	8.00E-04	1.44E-05	33.78	-11.15	37.71
Tubo 6	7.00E-04	1.26E-05	34.47	-11.28	37.02
Tubo 7	6.11E-04	1.10E-05	34.79	-11.42	36.70
Tubo 8	5.50E-04	9.90E-06	35.61	-11.52	35.88
Tubo 9	5.00E-04	9.00E-06	36.65	-11.62	34.84
Tubo 10	4.00E-04	7.20E-06	39.10	-11.84	32.39
Tubo 11	3.00E-04	5.40E-06	43.28	-12.13	28.21
Tubo 12	2.00E-04	3.60E-06	49.78	-12.53	21.71
Tubo 13	1.00E-04	1.80E-06	60.39	-13.23	11.10

Anexo C. Resultados de altura y tiempo para los sistemas CTAC-SDS y SDS.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Altura (cm)</i>						
	<i>SDS a 175% de CMC</i>	<i>CTAC- SDS a 150% de CMC</i>	<i>CTAC- SDS a 125% de CMC</i>	<i>CTAC- SDS a CMC</i>	<i>CTAC- SDS a 50% de CMC</i>	<i>CTAC- SDS a 25% de CMC</i>	<i>CTAC- SDS a 10% de CMC</i>
0	18.5	17.4	16.8	16.3	13.0	9.5	4.0
1	16.4	15.7	15.1	14.6	12.0	9.0	3.6
2	16.3	15.5	14.9	14.5	11.8	8.8	3.3
3	16.2	15.5	14.8	14.5	11.6	8.6	2.9
4	16.1	15.5	14.7	14.5	11.5	8.4	2.4
5	16.0	15.5	14.7	14.5	11.4	8.2	1.8
10	16.0	15.3	14.5	14.3	11.4	8.0	1.5
15	16.0	15.3	14.5	14.3	11.3	7.6	1.1
20	16.0	15.2	14.4	14.2	11.3	7.3	1.0
25	16.0	15.2	14.4	14.2	11.3	7.0	0.8
30	16.0	15.1	14.3	14.0	11.2	6.7	0.8

Referencias

- [1] Centers for Disease Control and Prevention. (2020). COVID-19 pandemic planning scenarios. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/planning-scenarios.html>
- [2] Bhardwaj, N., & Devi, S. (2020). Surfactants and polymers against COVID-19: A review. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 60, 102062.
- [3] Choudhury, R., & Ghosh, S. K. (2020). Surfactants and their role in coronavirus (SARS-CoV-2) infection and its prevention: A review. *Journal of Surfactants and Detergents*, 23(6), 1207-1219.
- [4] Alves, C. R., de Souza, L. F., de Oliveira, A. P., & de Souza, A. A. (2020). Surfactants as antiviral agents for SARS-CoV-2. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 196, 111316.
- [5] Gómez, M. A., & Gómez, J. A. (2020). Surfactants as potential antiviral agents against SARS-CoV-2. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 195, 111262
- [6] Encina Calvo, R., Bravo, A., Amigo, J., & Gracia-Fadrique, J. (2009). Dynamic surface tension, critical micelle concentration, and activity coefficients of aqueous solutions of nonyl phenol ethoxylates. *Fluid Phase Equilibria*, 282(1), 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2009.04.016>
- [7] Pramod, K., Kotta, S., Jijith, U.S., Aravind, A., Tahir, M.A., Manju, C.S., & Gangadharappa, H.V. (2020). Surfactant-based prophylaxis and therapy against COVID-19: A possibility. *Medical Hypotheses*, 143, 110081. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2020.110081>
- [8] Diomedi, A., Chacón, E., Delpiano, L., Hervé, B., Jemenao, M.I., Medel, M., Quintanilla, M., Riedel, G., Tinoco, J., & Cifuentes, M. (2017). Antisépticos y desinfectantes: apuntando al uso racional. *Recomendaciones del Comité Consultivo de Infecciones Asociadas a la Atención de Salud, Sociedad Chilena de Infectología. Revista chilena de infectología*, 34(2), 156-174. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182017000200010>
- [9] Liu, Y., Li, J., Feng, Y., & Li, L. (2020). Comparison of the ability of different aerosol foam formulations to reduce airborne bacteria and fungi in a hospital ward. *Journal of Hospital Infection*, 104(4), 529-534.
- [10] Drenckhan, W., & Saint-Jalmes, A. (2015). The science of foaming. *Advances in Colloid and Interface Science*, 222, 228-259. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.04.001>
- [11] Jiménez Islas, D., Medina Moreno, S. A., & Gracida Rodríguez, J. N. (2010). Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos: una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(1), 65-84. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-

49992010000100006&lng=es&tlng=es

[12] Yapu Machicado, W. (1997). Físicoquímica de superficies la nueva ciencia. *Revista Ciencia y Cultura*, (1), 146-154.

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-33231997000100017&lng=es&tlng=es

[13] Patel, S., Zhong, Y., Bauer, B. A., & Davis, J. E. (2009). Interfacial structure, thermodynamics, and electrostatics of aqueous methanol solutions via molecular dynamics simulations using charge equilibration models. *Journal of Physical Chemistry B*, 113(27), 9241-9254. <https://doi.org/10.1021/jp900446f>

[14] López Cervantes, José Luis. (2011). "Tensión superficial, densidad y velocidad del sonido de un biotensoactivo en disolución acuosa". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/7829>

[15] Duque Vega, P. R., & Gracia-Fadrique, J. (2015). Van der Waals, más que una ecuación cúbica de estado. *Educación Química*, 26(3), 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.05.003>

[16] Castellan, G. W. (1998). La segunda ley de la termodinámica (pp. 171-224). En *Físicoquímica* (1a. ed.). México: Addison Wesley Longman.

[17] Atkins, P., & de Paula, J. (2011). *Físicoquímica* (8ª ed.). Médica Panamericana. (p. 182).

[18] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (1999). *Termodinámica* (1a. ed.). McGraw-Hill

[19] Levine, I. N. (2004). *Físicoquímica* (5a ed.). McGraw-Hill

[20] Novello-Torres, A. M. y Gracia-Fadrique, J. (2003). Idealidad en superficies fluidas. *Educación Química*, 14(4), 224-230

[21] Sandoval-Ibarra, Federico D., López-Cervantes, José L., & Gracia-Fadrique, Jesús. (2015). Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. *Educación química*, 26(4), 307-313. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.03.002>

[22] Novello-Torres, A. M. (2010). Trayectorias en diagramas ternarios. *Educación Química*, 21(4), 300-305. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30099-5](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30099-5)

[23] Gracia-Fadrique, J. (1999). Langmuir-Bet surface equation of state in fluid-fluid interfaces. *Langmuir*, 15, 3279-3282. <https://doi.org/10.1021/la981128y>

[24] Adamson, A. W. (1969). Colloid and surface chemistry. En *Understanding physical chemistry* (2a ed., pp. 377-386). W. A. Bengamin

- [25] Calvo, E., Penas, A., Pintos, M., Bravo, R., & Amigo, A. (2001). Refractive indices and surface tension of binary mixtures of 1,4-Dioxane + 1-alkanol at 298.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 46, 692-695. <https://doi.org/10.1021/je0003821>
- [26] Langmuir, I. (1917). The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. Liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 39, 1848-1906. <https://doi.org/10.1021/ja02254a006>
- [27] Martínez-Vitela, M. A., & Gracia-Fadrique, J. (2020). The Langmuir-Gibbs surface equation of state. *Fluid Phase Equilibria*, 506, 112372. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.112372>
- [28] Gracia-Fadrique, J. (1999). Langmuir-BET surface equation of state in fluid-fluid interfaces. *Langmuir*, 15(9), 3279-3282. <https://doi.org/10.1021/la981244o>
- [29] Or, D., & Tuller, M. (2005). Capillarity. En D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 155-164). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00339-8>
- [30] Tuller, M., & Or, D. (2005). Water retention and characteristic curve. En D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of soils in the environment* (pp. 278-289). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00376-3>
- [31] Gibbs, J. W. (1878). On the equilibrium of heterogeneous substances. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*, 3, 108-248.
- [32] Robledo, A., & Ruíz, G. (1988). Microemulsiones: estructura y aplicaciones. *Revista Ciencias*, 20, 51-59
- [33] Gracia Fadrique, J. (2015). ¿Qué es la espuma? *Revista Digital Universitaria*, 15(5). Artículo.
- [34] Weaire, D., & Hutzler, S. (1999). *The physics of foams*. Oxford University Press.
- [35] Saint-Jalmes, A., & Langevin, D. (2002). Time evolution of aqueous foams: drainage and coarsening. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14(40), 9397-9412
- [36] Stevenson, P. (2008). *Foam engineering: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- [37] Hilgenfeldt, S., Koehler, S. A., & Stone, H. A. (2001). A generalized view of foam drainage: experiment and theory. *Langmuir*, 17(24), 7694-7704.
- [38] Princen, H. M., & Kiss, A. D. (1986). Rheology of foams and highly concentrated emulsions: I. Elastic properties and yield stress of a cylindrical model system. *Journal of Colloid and Interface Science*, 112(2), 427-437.

[39] García, M., & Martínez, L. (2019). Antiespumantes: una revisión de su uso en la industria alimentaria. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(3), 1067-1084.

[40] Gutiérrez, J. M., Rodríguez, G., & Oliet, M. (2017). Antiespumantes en la industria de la celulosa y el papel. En: *Tecnología de la celulosa y el papel* (pp. 245-260). Editorial Universitaria Ramón Areces.

[41] Sánchez, A., & Pérez, J. (2016). Evaluación de la eficiencia de antiespumantes en la producción de etanol a partir de jugo de caña de azúcar. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Química*, 15(1), 9-16.

[42] Novelo Torres, A. M., & Gracia Fadrique, J. (2005). Concentración micelar crítica mediante la ecuación de adsorción de Gibbs. *Educación Química*, 16(1), 10-19.
<https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2005.1.66139>

[43] American Society for Testing and Materials. (2015). Standard test method for foaming properties of surface-active agents (ASTM D1173-07(2015)). ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/D1173-07R15>