

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

Evaluación de la extracción de aceite de algas *Nannochloropsis oculata* para su potencial aplicación en la elaboración de biodiésel

Tesis presentada por Danna Sofía Pelicó Luna para optar al grado académico
en Licenciada en Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de la extracción de aceite de algas *Nannochloropsis oculata* para su potencial aplicación en la elaboración de biodiésel

Tesis presentada por Danna Sofía Pelicó Luna para optar al grado académico
en Licenciada en Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

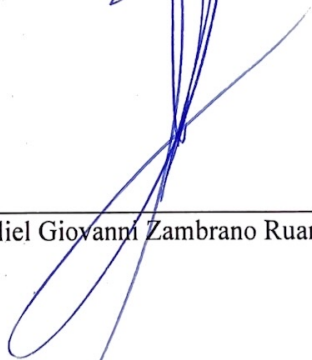
2025

Vo. Bo

(f) 
Ing. Luis Ernesto Nuñez González

Terna examinadora

(f) 
Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
Ing. Luis Ernesto Nuñez González

Fecha de aprobación: Guatemala, 09 de enero 2026

Prefacio

Este trabajo es el resultado de un proceso de aprendizaje y esfuerzo constante, en el que conté con el apoyo de personas importantes en mi vida. Agradezco a Dios por la oportunidad y la fortaleza para llegar hasta este punto.

A mis padres, por su apoyo constante, por su confianza y por brindarme las herramientas necesarias para mi formación académica y personal. A mi hermano, por su compañía y motivación a lo largo de este proceso.

A mis amigos que me acompañaron durante esta etapa, por su apoyo, comprensión y por contribuir de distintas maneras a que este logro fuera posible.

Índice

Prefacio	i
Índice de figuras	iv
Índice de cuadros	vi
Índice de ecuaciones	ix
Índice de cálculos	x
Resumen	xi
Abstract.....	xii
I. Introducción.....	1
II. Objetivos.....	2
A. Objetivo general	2
B. Objetivos específicos.....	2
III. Justificación	3
IV. Marco teórico.....	5
A. Aceites vegetales.....	5
B. Algas	6
C. Biodiésel	8
D. Elaboración de biodiésel	9
E. Método de Soxhlet	12
F. Tipos de solvente	13
G. Recuperación de solventes	14
H. Métodos de ruptura de pared celular.....	15
I. Mercado de aceites.....	18
J. Cromatografía de gases.....	19
K. Balance de masa.....	20
V. Antecedentes.....	23
VI. Metodología.....	26
A. Rompimiento de la pared celular por choque térmico	26
B. Rompimiento de la pared celular por maceración	26
C. Extracción por medio del método de Soxhlet	27
D. Esterificación del aceite	28
E. Análisis estadístico.....	29
VII. Resultados.....	30

VIII.	Discusión de resultados	38
IX.	Conclusiones.....	44
X.	Recomendaciones	45
XI.	Bibliografía	46
XII.	Anexos	51
A.	Datos de placa.....	51
B.	Datos originales	52
C.	Cálculos de muestra.....	83
D.	Datos calculados	85
E.	Análisis de error.....	92
F.	Hojas de seguridad.....	95
XIII.	Glosario	118

Índice de figuras

Figura 1. Montaje extractor de Soxhlet	13
Figura 2. Gráfico del rendimiento de la extracción de aceite de microalgas en función del tiempo	35
Figura 3. Modelo cinético de extracción y decaimiento para la obtención de aceite de microalgas.....	35
Figura 4. Cromatografía de gases aceite de microalgas	36
Figura 5. Identificación de picos en cromatografía de gases.....	37
Figura 6. Balance de masa secado de microalgas.....	71
Figura 7. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con ruptura por choque térmico	71
Figura 8. Balance de masa evaporación con ruptura por choque térmico	71
Figura 9. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con ruptura por maceración	72
Figura 10. Balance de masa evaporación con ruptura por maceración	72
Figura 11. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con etanol	72
Figura 12. Balance de masa evaporación etanol.....	73
Figura 13. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con acetona.....	73
Figura 14. Balance de masa evaporación acetona	73
Figura 15. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con hexano	74
Figura 16. Balance de masa evaporación hexano.....	74
Figura 17. Balance de masa extracción de aceite de microalgas durante 2 horas	74
Figura 18. Balance de masa evaporación 2 horas.....	75
Figura 19. Balance de masa extracción de aceite de microalgas durante 3 horas	75
Figura 20. Balance de masa evaporación 3 horas.....	75
Figura 21. Balance de masa extracción de aceite de microalgas durante 4 horas	76

Figura 22. Balance de masa evaporación 4 horas.....	76
Figura 23. Balance de masa extracción de aceite de microalgas durante 5 horas	76
Figura 24. Balance de masa evaporación 5 horas.....	77
Figura 25. Extracción de microalgas	77
Figura 26. Extracción de microalgas y remoción de contaminantes	78
Figura 27. Pesaje de algas húmedas	78
Figura 28. Algas previo al secado.....	79
Figura 29. Muestra de algas secas	79
Figura 30. Sistema de extracción.....	80
Figura 31. Sistema armado con recirculación de agua	80
Figura 32. Evaporación de etanol.....	81
Figura 33. Muestra de aceite después de evaporar	81
Figura 34. Muestra de aceite extraído	82
Figura 35. Pesaje de aceite extraído	82
Figura 36. Hoja de seguridad del n-Hexano	95
Figura 37. Hoja de seguridad del etanol.....	103
Figura 38. Hoja de seguridad de acetona.....	110

Índice de cuadros

Cuadro 1. Composición de diferentes tipos de algas.....	6
Cuadro 2. Comparación de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel y el diésel de petróleo.	9
Cuadro 3. Tipos de catalizadores.....	11
Cuadro 4. Costo de los solventes utilizados para la extracción de aceite de microalgas	30
Cuadro 5. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los diferentes métodos de ruptura de pared celular	30
Cuadro 6. Análisis de varianza de los rendimientos promedio de la extracción de aceite de microalgas con diferentes métodos de ruptura de pared celular.....	31
Cuadro 7. Rendimiento de extracción de aceite de microalgas por diferentes métodos de ruptura de pared celular	31
Cuadro 8. Compatibilidad solvente-ácido oleico por distancia de Hansen	32
Cuadro 9. Rendimiento promedio de extracción de aceite de microalgas con solventes de diferentes polaridades	32
Cuadro 10. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para extracción de aceite de microalgas con diferentes solventes.....	33
Cuadro 11. Análisis de varianza de los rendimientos promedio de la extracción de aceite de microalgas con diferentes solventes	33
Cuadro 12. Prueba Tukey de los rendimientos promedio de la extracción de aceite de microalgas con diferentes solventes	34
Cuadro 13. Rendimiento de la extracción de aceite de microalgas a diferentes tiempos.....	34
Cuadro 14. Datos de placa de los equipos utilizados	51
Cuadro 15. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de maceración 1	52
Cuadro 16. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de maceración 2	53
Cuadro 17. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de maceración 3	54

Cuadro 18. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de choque térmico 1	55
Cuadro 19. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de choque térmico 2.....	56
Cuadro 20. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de choque térmico 3.....	57
Cuadro 21. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de etanol 1	58
Cuadro 22. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de etanol 2.....	59
Cuadro 23. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de etanol 3.....	60
Cuadro 24. Ciclos realizados y duración para prueba de acetona 1	61
Cuadro 25. Ciclos realizados y duración para prueba de acetona 2	62
Cuadro 26. Ciclos realizados y duración para prueba de acetona 3	63
Cuadro 27. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de hexano 1	65
Cuadro 28. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de hexano 2.....	66
Cuadro 29. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de hexano 3	67
Cuadro 30. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de 2 horas.....	68
Cuadro 31. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de 4 horas.....	69
Cuadro 32. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de 5 horas.....	70
Cuadro 33. Parámetros de solubilidad de Hansen para solventes y lípidos	83
Cuadro 34. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando maceración como método de ruptura de pared celular	85
Cuadro 35. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando choque térmico como método de ruptura de pared celular.....	86

Cuadro 36. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando etanol como solvente	86
Cuadro 37. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando acetona como solvente.....	87
Cuadro 38. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando hexano como solvente	87
Cuadro 39. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando diferentes tiempos.....	88
Cuadro 40. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la ruptura de pared celular por maceración.....	88
Cuadro 41. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la ruptura de pared celular por choque térmico	89
Cuadro 42. Datos originales del análisis de varianza para el rendimiento de extracción de aceite por diferentes métodos de ruptura de pared celular	89
Cuadro 43. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk utilizando etanol como solvente para la extracción de aceite de microalgas	90
Cuadro 44. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk utilizando acetona como solvente para la extracción de aceite de microalgas	90
Cuadro 45. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk utilizando hexano como solvente para la extracción de aceite de microalgas	91
Cuadro 46. Datos originales del análisis de varianza para el rendimiento de extracción de aceite con diferentes solventes	91
Cuadro 47. Parámetros cinéticos del modelo ajustado	92

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Reacción química de la transesterificación catalizador	9
Ecuación 2. Ecuación del balance de masa	21
Ecuación 3. Ecuación del balance de masa en estado estacionario	21
Ecuación 4. Rendimiento de extracción	83
Ecuación 5. Distancia Hansen	84
Ecuación 6. Ecuación base de extracción	84
Ecuación 7. Crecimiento exponencial en la etapa de extracción.....	85
Ecuación 8. Media aritmética	92
Ecuación 9. Desviación estándar	92
Ecuación 10. Intervalo de confianza.....	93
Ecuación 11. Propagación de error	93

Índice de cálculos

Cálculo 1. Rendimiento de la extracción de aceite de microalgas	83
Cálculo 2. Distancia a partir de los parámetros de solubilidad de Hansen.....	84
Cálculo 3. Promedio del rendimiento de extracción de aceite de microalgas	92
Cálculo 4. Desviación estándar de extracción de aceite de microalgas.....	93
Cálculo 5. Intervalo de confianza de extracción de aceite de microalgas	93
Cálculo 6. Propagación de error del rendimiento de extracción de aceite de microalgas	94

Resumen

Este estudio evaluó la extracción de aceite de la microalga *Nannochloropsis Oculata* mediante el método de Soxhlet, con el objetivo de mejorar las condiciones del proceso y analizar la composición del aceite obtenido. Se probaron dos métodos de ruptura de pared celular (maceración y choque térmico), tres solventes de distinta polaridad (etanol, acetona y hexano) y cuatro tiempos de extracción. El tratamiento por choque térmico presentó un rendimiento promedio de $5.23 \pm 0.69 \% m/m$, superior al obtenido con maceración ($3.35 \pm 0.62 \% m/m$). Aunque el análisis ANOVA indicó que la diferencia no fue estadísticamente significativa ($p = 0.097$), la tendencia evidenció una mayor efectividad del choque térmico y una desviación estándar menor. Entre los solventes evaluados, el hexano mostró el mayor rendimiento con $4.73 \pm 0.51 \% m/m$, seguido del etanol ($3.83 \pm 0.50 \% m/m$) y la acetona ($2.72 \pm 0.51 \% m/m$), resultados coherentes con los parámetros de solubilidad de Hansen y con una diferencia marginal no significativa ($p = 0.066$). En cuanto al tiempo de extracción, se determinó que la mayor extracción fue a las 4 horas, alcanzando un rendimiento máximo de $5.50 \pm 0.52 \% m/m$, tras el cual se observó una disminución asociada a degradación térmica de lípidos. El análisis cromatográfico (GC–MS) confirmó la presencia predominante de ácidos grasos insaturados, principalmente oleico, linoleico y linolénico.

Abstract

This study evaluated the extraction of oil from the microalgae *Nannochloropsis oculata* using the Soxhlet method, with the aim of improving the process conditions and analyzing the composition of the oil obtained. Two methods of cell wall disruption (maceration and thermal shock), three solvents of different polarity (ethanol, acetone, and hexane), and four extraction times were tested. The thermal shock treatment had an average yield of 5.23 ± 0.69 % w/w, higher than that obtained with maceration (3.35 ± 0.62 % w/w). Although the ANOVA analysis indicated that the difference was not statistically significant ($p = 0.097$), the trend showed greater effectiveness of thermal shock and a lower standard deviation. Among the solvents evaluated, hexane showed the highest yield with 4.73 ± 0.51 % w/w, followed by ethanol (3.83 ± 0.50 % w/w) and acetone (2.72 ± 0.51 % w/w), results consistent with Hansen's solubility parameters and with a marginal, non-significant difference ($p = 0.066$). In terms of extraction time, it was determined that the highest extraction occurred at 4 hours, reaching a maximum yield of 5.50 ± 0.52 % w/w, after which a decrease associated with thermal degradation of lipids was observed. Chromatographic analysis (GC–MS) confirmed the predominant presence of unsaturated fatty acids, mainly oleic, linoleic, and linolenic acids.

I. Introducción

Con el crecimiento constante de diversas fuentes de energía renovable, se han intensificado las investigaciones orientadas a encontrar alternativas sostenibles a los combustibles fósiles. Bajo este contexto, el biodiésel resulta ser una opción prometedora por su capacidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Las microalgas, por su parte, representan una materia prima versátil para la producción de aceites para su uso en la fabricación de biocombustibles, ya que son organismos capaces de crecer rápidamente en distintos entornos, al tiempo que capturan dióxido de carbono durante su desarrollo (Reddy et al., 2015).

Los métodos de extracción de aceites a partir de microalgas incluyen el prensado mecánico, la extracción asistida por microondas, la extracción con fluidos supercríticos y el uso de solventes orgánicos. Aunque los dos primeros son limitados por su bajo rendimiento o altos costos, la extracción con solventes orgánicos ha demostrado ser eficiente, escalable y adaptable a condiciones de laboratorio. Dentro de este grupo, el método Soxhlet permite una extracción continua y controlada, maximizando el contacto entre biomasa y solvente y garantizando mayor recuperación de lípidos (Chaos et al., 2023).

Las microalgas *Nannochloropsis oculata* destacan por su alta producción de aceite, llegando a acumular entre 30% y 50% m/m de lípidos en su biomasa. Al igual que *Chlorella vulgaris* y *Botryococcus braunii*, siendo ideales para la producción de biodiésel por su rápido crecimiento y capacidad de cultivo en aguas residuales. El uso de solventes no polares como el hexano ha mostrado gran efectividad en la disolución de triglicéridos, evitando la extracción de compuestos no deseados y favoreciendo un aceite de mejor calidad (Becker, 1994; Yunus, 2011).

En este estudio se planteó la extracción de aceite de *Nannochloropsis oculata* mediante el método Soxhlet, evaluando tres variables principales: método de ruptura de pared celular con maceración y choque térmico, tipo de solvente, utilizando hexano, etanol y acetona y tiempo de extracción de 2 a 5 horas. El análisis de estas variables permitió establecer condiciones para mejorar el rendimiento y las propiedades del aceite, el cual fue posteriormente caracterizado mediante cromatografía de gases.

II. Objetivos

A. Objetivo general

Evaluar la extracción de aceite de algas *Nannochloropsis oculata* utilizando el método Soxhlet para su potencial aplicación en la elaboración de biodiésel a escala de laboratorio, comparando diferentes métodos de ruptura de pared celular para determinar su eficacia en la liberación de lípidos.

B. Objetivos específicos

- Comparar la influencia de dos métodos de rompimiento de la pared celular para identificar el de mayor rendimiento para la extracción de aceite de microalgas.
- Evaluar la extracción de aceite de algas *Nannochloropsis oculata* utilizando tres solventes de diferentes polaridades para determinar el rendimiento del producto extraído.
- Modificar la variable de tiempo de extracción utilizando el solvente de mayor rendimiento como mejora en la obtención de aceite.

III. Justificación

Alrededor del mundo el crecimiento de algas impulsado por el cambio climático y la contaminación por nutrientes está generando problemas ambientales y económicos. En Estados Unidos se tienen pérdidas anuales entre 10 y 100 millones de dólares en sectores como pesca y turismo. A nivel mundial este fenómeno crece con mucha rapidez, afectando ecosistemas y biodiversidad (Cleveland, 2025).

En Guatemala se ha manifestado que grandes cantidades de algas se encuentran presentes en diferentes cuerpos acuáticos del país, desde 2015 alrededor del 30 % del lago de Atitlán presenta cobertura de algas, ocasionando disminución del oxígeno disuelto, mortandad de peces. Debido a las proliferaciones que disminuyen el oxígeno y afectan la vida acuática, también generan inconvenientes en las comunidades cercanas debido a la liberación de toxinas. Teniendo en cuenta que estas crecen con mucha facilidad, su uso como materia prima para la elaboración de biocombustibles, fertilizantes y aditivos industriales no solo es una fuente económicamente viable por probar, sino que también contribuirá a la mitigación de los desafíos generados en los ecosistemas hídricos a nivel nacional (Julajuj, 2015).

El mercado de aceites a escala global está experimentando un crecimiento significativo, en 2024 se estimó un valor de USD 250 mil millones con una tasa de crecimiento anual compuesta del 4.1 %. En Guatemala el mercado de aceites alcanzará un valor de USD 653 millones con un crecimiento anual del 8.31 % entre 2025 y 2030 (Salgarkar, 2025; Statista, s. f.). Estas cifras reflejan el potencial para aprovechar las algas como recurso renovable y convertir un problema ambiental en una oportunidad económica.

Sin embargo, en Guatemala no existen estudios previos que apliquen el método Soxhlet para la extracción de aceites a partir de microalgas del tipo *Nannochloropsis oculata*. La extracción de aceite por medio de la técnica de Soxhlet puede ser una solución sostenible a largo plazo en Guatemala, principalmente porque este método es considerado alta eficiencia y precisión para obtener mayor pureza en los aceites extraídos, además de no haber sido utilizado en estudios previos (Becker, 1994). Por esta razón, el presente trabajo busca responder a esa necesidad, evaluando de forma experimental la extracción de aceite de *Nannochloropsis oculata* con tres solventes de distinta polaridad, dos métodos de ruptura de pared celular y diferentes tiempos de extracción, utilizando el método Soxhlet.

De esta forma, el estudio contribuye a generar información importante sobre la extracción de aceites de microalgas mediante Soxhlet. Los resultados obtenidos en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, incluyendo la caracterización del aceite por cromatografía de gases, permiten establecer condiciones de

extracción a escala de laboratorio y sientan las bases para investigaciones futuras en procesos de producción de biodiésel a mayor escala.

IV. Marco teórico

A. Aceites vegetales

El uso de aceites vegetales presenta una serie de ventajas, entre las principales se encuentran que las plantas oleaginosas crecen alrededor del mundo, también presentan la ventaja de ser sustancias renovables debido a que las plantas pueden sembrarse y cosecharse durante cualquier época del año, otra de las ventajas es que son combustibles más verdes, ya que no contienen azufre o las cantidades son muy bajas en comparación a otros combustibles. A pesar de tener una amplia variedad de ventajas, también presenta una serie de desventajas, como la alta viscosidad del biodiésel, baja volatilidad y reactividad de las cadenas de hidrocarburos saturados (Benjumea et al., s. f.; Garrido, 2010).

Los aceites vegetales tienen una composición de triglicéridos que representa un 90 % de su peso, estas son moléculas resultantes de la esterificación de la glicerina con la presencia de tres moléculas de ácidos grasos. La composición de los aceites vegetales consta de triglicéridos simples y mixtos, una de las principales características de este tipo de aceite es que varios pueden tener perfiles similares con respecto a los ácidos grasos, pero se diferencian por el contenido de triglicéridos (Bulla, 2014).

1. Uso directo del aceite o mezclas: a pesar de que el uso directo de los aceites es una opción viable, si la combustión se realiza de manera directa con el aceite vegetal, se puede ver reducida la vida útil del motor (Garrido, 2010).
2. Aceites microemulsificados en diésel: se realiza una mezcla de aceites vegetales con diésel para la formación de micro emulsiones estables, este tipo de mezcla no afecta el motor en donde se utilice (Garrido, 2010).
3. Pirolisis del aceite: se lleva a cabo la descomposición del aceite vegetal por medio de un aumento de temperatura significativo, de esta forma es posible producir combustibles líquidos o sólidos que pueden ser utilizados en los motores de diésel luego de pasar por una serie de tratamientos adicionales (Garrido, 2010).

Muchos países alrededor del mundo necesitan nuevas fuentes de producción de aceites vegetales, producidos a partir de plantas disponibles en su territorio, para reducir la dependencia a las importaciones. El aumento en la demanda de aceites se debe a su consumo y a la producción de biodiésel, por lo que se requiere de procesos más eficientes (Piloto & Suarez, 2021).

Existen métodos tradicionales de extracción de aceites vegetales, los dos métodos más utilizados son prensado y extracción con solventes. El uso de solventes es un método más efectivo y rápido, sin embargo, este representa un mayor costo por los equipos utilizados. Antes de la extracción, se debe de realizar un tratamiento previo, en el caso de las semillas se debe realizar un descascarado, limpieza y trituración. Se puede utilizar un

proceso de precalentamiento para obtener mejores resultados, esto se realiza con aire caliente, tratamiento de microondas o ultrasonidos (Piloto & Suarez, 2021).

El aceite extraído en un tornillo o prensa hidráulica es de las formas más fáciles y económicas, este implica la aplicación de presión para expulsar el aceite. El prensado de tornillo presenta una ventaja sobre la prensa hidráulica, ya que esta es ideal para trabajos de laboratorio y en países en desarrollo. El prensado puede realizarse tanto en frío como en caliente. Se realiza un prensado en frío, por debajo de 50 °C para la preservación de la pureza y propiedades del aceite. Por otro lado, el prensado en caliente se realiza para obtener mayor rendimiento, ya que se disminuye la viscosidad, mejorando el flujo durante la extracción (Piloto & Suarez, 2021).

B. Algas

Con el paso del tiempo las algas se han convertido en una materia prima prometedora para la producción de biodiésel, esto se debe a su capacidad para crecer bajo cualquier tipo de condiciones y a la capacidad que tiene para generar lípidos. Existe una gran variedad de algas que pueden ser clasificadas bajo diversos criterios, como el tipo de agua en donde viven, tamaño, color, pigmentos, estructura, naturaleza de la pared celular y producto de reserva (Martín, 2007).

A partir de las algas se pueden obtener diferentes productos que se utilizan como fármacos, productos alimenticios, cosméticos y productos energéticos. En el siguiente cuadro se presenta la composición de diferentes tipos de algas.

Cuadro 1. Composición de diferentes tipos de algas

Tipo	Proteínas (%)	Carbohidratos (%)	Lípidos (%)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	-	1.9
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8-18	21-52	16-40

<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Spirogyra sp</i>	6-20	33-64	11-21
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20
<i>Prymnesium parvum</i>	28-45	25-33	22-38
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Spirulina platenses</i>	46-63	8-14	4-9
<i>Spirulina máxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Synechoccus sp.</i>	63	15	11

<i>Anabaena cilindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Nannochloropsis oculata</i>	30-50	10-20	30-50

(Becker, 1994)

Las algas con mayor contenido de lípidos presentan un mayor porcentaje de aceite extraído por el proceso de transesterificación, cuando las algas presentan un alto nivel de azúcares, almidón o celulosas se obtiene bioetanol (Martín, 2007).

C. Biodiésel

El biodiésel es un biocombustible renovable que se deriva de los aceites vegetales que se obtienen a partir de cultivos, grasas animales o aceites usados de cocina. De acuerdo con la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales el biodiésel se describe como esteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadenas largas, derivados de insumos grasos renovables como los aceites o grasas animales. Para la formación de este producto se debe llevar a cabo una reacción de un triacilglicérido con un alcohol, esta reacción requiere de la presencia de catalizadores, en donde los más utilizados son el hidróxido de sodio o hidróxido de potasio. Los principales alcoholes utilizados en esta reacciones son el metano y el etanol, sin embargo, se pueden considerar otros tipos, como el butanol, propanol, isopropanol, terbutanol, octanol y otros ramificados (Benjumea et al., s. f.).

Para seleccionar el tipo de alcohol, se deben considerar varios factores, en caso de utilizar metanol, se tienen costos menores, es un compuesto más reactivo y los esteres metílicos de ácidos grasos son más volátiles, el uso de etanol representa un mayor costo, pero tiene un menor grado de toxicidad y es considerado como un compuesto renovable. El biodiésel es un compuesto de apariencia amarilla con una viscosidad bastante similar a la del diésel producido a partir de petróleo, presenta las características de no ser inflamable, no es explosivo, tiene un punto de inflamación más alto, es biodegradable y al ser quemado no emite una alta cantidad de gases tóxicos. En el siguiente cuadro se muestra una comparación más detallada de las características fisicoquímicas (Bulla, 2014).

Cuadro 2. Comparación de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel y el diésel de petróleo.

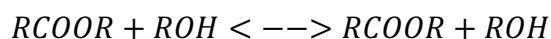
Propiedades	Diésel de petróleo	Biodiésel
Densidad (g/cm ³ a 15 °C)	0.82-0.85	0.86-0.90
Poder calorífico (MJ/kg)	42-45	37-40
Indice de cetano	40-55	48-65
Viscosidad (cSt a 40 °C)	2-4.5	4-6
Punto de inflamación (°C)	60-80	100-170
Contenido de azufre (ppm)	10-5,000	<10
Biodegradabilidad	Media-Baja	Alta

(PEMEX, 2015; LGC, 2017)

D. Elaboración de biodiésel

El método de transesterificación es el más utilizado para la elaboración de biodiésel, en la reacción 01 se observar que un aceite con presencia de alcohol con un catalizador o sin catalizador puede producir biodiésel y glicerol. Es posible llevar a cabo reacciones diferentes, una con presencia de catalizador y una con ausencia de catalizador, pero el uso de catalizadores mejora el rendimiento del producto final. Dentro de la reacción se pueden utilizar catalizadores homogéneos, heterogéneos y enzimáticos, sin embargo, los más utilizados en la industria son los alcalinos, debido a que requiere condiciones específicas para evitar la producción de saponificación (Bulla, 2014).

Ecuación 1. Reacción química de la transesterificación catalizador



Un factor importante dentro de la producción de biodiésel es el control de los triglicéridos, estos deben tener un bajo porcentaje de AGL para evitar que los catalizadores formen neutralizaciones y se generen jabones como subproducto. El exceso de alcohol dentro de las reacciones puede desplazar el equilibrio de las reacciones a lo largo del producto, por esa razón es importante controlar una serie de variables que pueden llegar a afectar el proceso de transesterificación, estas son presentadas a continuación (Bulla, 2014).

- Calidad del aceite

Un punto importante dentro del proceso de transesterificación es la cantidad de ácidos grasos y agua presentes en el aceite, para que una reacción se lleve a cabo de manera efectiva debe tener un valor de AGL menor a 3 % p/p, cuando la acidez alcanza niveles muy altos se tiene una menor conversión a esteres y los altos niveles de humedad disminuyen el rendimiento. Para evitar los altos niveles de acidez se pueden utilizar catalizadores, pero se debe de usar cuidadosamente para que no se produzca jabón, la humedad también reacciona ante la presencia de catalizadores (Bulla, 2014).

Los aceites vegetales de calidades inferiores presentan un alto número de ácidos grasos que no puede ser transformado a biodiésel cuando se utilizan catalizadores homogéneos, para este tipo de casos se realizan procesos de dos etapas, en la primera etapa se lleva a cabo la esterificación con un alcohol y un catalizador homogéneo ácido para producir esteres etílicos de ácido grasos y en la segunda etapa se realiza la transesterificación con el uso de alcoholes y catalizadores básicos (Garrido, 2010).

- Características del catalizador

El uso de catalizadores básicos requiere de una atención especial en las condiciones de reacción, principalmente en la cantidad y temperatura de este con el fin de evitar el proceso de saponificación. Los catalizadores ácidos tienen un papel importante en la obtención de biocombustibles, en el siguiente cuadro se presenta una clasificación de los diferentes tipos de catalizadores y ejemplos de cada uno de ellos (Cabello et al., 2015).

Los catalizadores enzimáticos presentan resultados importantes en medios acuosos y no acuosos, proporcionando una solución a la producción de glicerol, porque a pesar de ser producida con este tipo de catalizadores, puede ser removida con mayor facilidad. Otro punto importante es que los ácidos grasos presentes pueden ser convertidos en esteres alquílicos, la principal desventaja de este tipo es el costo, ya que es mucho mayor que los otros catalizadores (Cabello et al., 2015).

Tipos de catalizadores para la obtención de biodiésel

Cuadro 3. Tipos de catalizadores

Tipo de catalizador	Ejemplos de catalizadores
Ácidos homogéneos	Ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido fosfórico.
Básicos homogéneos	Hidróxido de potasio e hidróxido de sodio
Ácidos heterogéneos	Zeolita, óxido de titanio, resinas sulfónicas y catalizadores a base de carbono.
Básicos heterogéneos	Óxido de magnesio, óxido de calcio y alúmina
Enzimáticos	Lipasas, <i>cándida</i> , <i>penicillium</i> y <i>pseudomonas</i>

(Cabello et al., 2015)

- Características de la reacción

La temperatura y el tiempo de reacción son factores altamente importantes durante el proceso de transesterificación por la relación existente entre ambas variables. Cuando se aumenta la temperatura, la velocidad y el rendimiento de conversión incrementan significativamente, de acuerdo con algunas investigaciones realizadas en los últimos años, se determinó que la temperatura ideal para llevar a cabo la reacción es de 55 °C, sin embargo, esto depende del tipo de reactor que se está utilizando, pues la temperatura no debe ser demasiado alta para evitar que el alcohol se evapore (Vidal et al., 2017).

El tiempo de transesterificación se determina como una relación en donde aumenta al mismo ritmo que los TG, esta variable depende del catalizador que se utilice, el tiempo de reacción tiene un rango que va desde los 20 minutos hasta 5 horas. Para que este tiempo sea menor se deben considerar factores como

temperatura, tiempo utilizado, porcentaje de alcohol en la mezcla y el tipo y cantidad de catalizador utilizado (Vidal et al., 2017)

- Agitación

Esta es una variable importante durante la reacción de transesterificación debido a que al realizar la mezcla de aceite con alcohol se debe de formar una fase homogénea. Con la implementación de un proceso de mezclado es posible que las partículas de alcohol se puedan dispersar en el interior del aceite con el propósito de obtener áreas de contacto mayores entre ambos componentes (Vidal et al., 2017).

E. Método de Soxhlet

El método de Soxhlet es una técnica de extracción sólido-líquido muy utilizada en laboratorios analíticos y de investigación para obtener compuestos específicos de matrices sólidas con alta eficiencia. Fue desarrollado en 1879 por el químico alemán Franz von Soxhlet, originalmente para la extracción de grasas en alimentos. Su principio se basa en la extracción continua y cíclica de un analito mediante el uso de un disolvente volátil, lo que permite obtener un rendimiento elevado con una cantidad relativamente baja de solvente (Campos, s. f.).

El proceso consiste en colocar la muestra sólida, previamente seca y triturada, en un cartucho de celulosa dentro del extractor de Soxhlet. El disolvente se calienta en un matraz y sus vapores ascienden hacia un condensador, donde se licúan y caen sobre la muestra. El disolvente caliente disuelve los compuestos de interés, llenando gradualmente la cámara del extractor. Cuando el nivel del líquido alcanza el sifón, la solución enriquecida retorna al matraz colector, donde se acumula el extracto. Este ciclo se repite múltiples veces hasta lograr una extracción prácticamente completa, manteniendo contacto renovado entre el sólido y el disolvente (Campos, s. f.).

Una de las principales ventajas del método es que garantiza una extracción exhaustiva sin la necesidad de reemplazar manualmente el disolvente. Además, al ser un proceso automático y repetitivo, reduce la manipulación de la muestra y asegura mayor reproducibilidad. Se emplea de manera extendida en la determinación de lípidos en alimentos, aceites esenciales de plantas, contaminantes en suelos, residuos de plaguicidas y, en general, en la recuperación de compuestos orgánicos solubles. En la industria oleoquímica, el método de Soxhlet es clave para la extracción de aceites destinados a la producción de biodiésel, ya que permite obtener el máximo rendimiento de lípidos presentes en semillas y biomasa (Campos, s. f.).

Entre las principales limitaciones de esta técnica se encuentran el tiempo prolongado que requiere el proceso, la necesidad de mantener temperaturas relativamente

altas que pueden degradar compuestos termolábiles, y el consumo de solventes orgánicos que pueden resultar tóxicos o inflamables. Por ello, aunque sigue siendo una técnica de referencia (“método estándar”) en análisis de laboratorio, se han desarrollado métodos alternativos más rápidos y sostenibles, como extracción asistida por microondas, ultrasonido o fluidos supercríticos (Jafarinejad, 2017).

El fundamento químico del Soxhlet radica en el principio de solubilidad: los analitos deben ser solubles en el solvente elegido, mientras que la matriz sólida permanece insoluble. Posteriormente, la separación del extracto se logra mediante destilación del solvente o por técnicas de secado. Para optimizar el proceso, la elección del disolvente debe considerar su polaridad, volatilidad, punto de ebullición y afinidad con los compuestos a extraer. Solventes comunes incluyen hexano, éter de petróleo, etanol, metanol, acetona o cloroformo, dependiendo de la naturaleza de la sustancia objetivo. El agua y sólidos presentes pueden ser eliminados por centrifugación, y la mezcla de aceite y solvente puede ser separada por destilación (Jafarinejad, 2017).

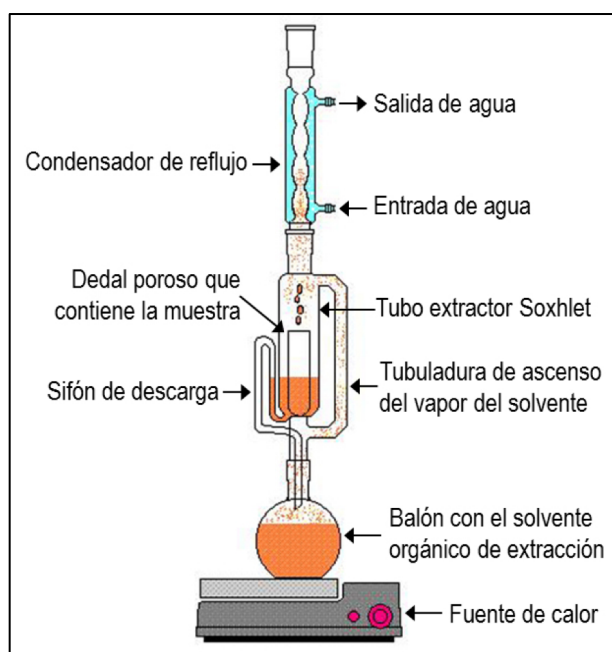


Figura 1. Montaje extractor de Soxhlet

(Vásquez, 2017)

F. Tipos de solvente

Para la correcta obtención de los compuestos lipídicos presentes en los sólidos, se utilizan solutos no polares como el n-Hexano. Las propiedades que se desean para que

un solvente sea adecuado en la extracción de aceites son numerosas. Para la sección de este se deben tener en cuenta cuales son los objetivos y disponibilidad de recursos, algunos solventes pueden ser más abundantes y con un precio más bajo. También se debe considerar la inflamabilidad y toxicidad de este ante las condiciones de trabajo (Ozer, 2014).

El solvente seleccionado debe ser recuperado fácilmente, para esto se deben considerar las propiedades físicas tales como calor específico, calor latente de vaporización, punto de ebullición y viscosidad. Estas propiedades afectan la facilidad y cantidad de energía requerida para recuperar el solvente. A mayor polaridad del solvente, este es fuertemente absorbido por las proteínas a través de los enlaces de hidrogeno, los cuales dificultan la obtención de niveles bajos en los residuos de solvente (Jafarinejad, 2017).

La estabilidad del solvente ante el calor, luz y agua resulta ser otra característica importante, ya que este debe ser recirculado varias veces y es necesario que resista los ciclos repetido de calentamiento, vaporización y enfriamiento. El solvente no debe de reaccionar con el aceite extraído, ni debe ser corrosivo para el equipo que se está utilizando (Ozer, 2014).

El hexano puede emitirse durante su uso en la extracción y recuperación de este, siendo identificado como un contaminante del aire que puede reaccionar con otros contaminantes para producir ozono y oxidantes. Por esa razón se utilizan otras alternativas de solventes orgánicos más seguros como el etanol. El etanol es un solvente para investigar por su bajo costo y la facilidad de producción, este tiene una menor inflamabilidad que el hexano (Ozer, 2014).

G. Recuperación de solventes

La recuperación de solventes es una etapa importante en los procesos de extracción de lípidos a partir de algas, debido a su impacto directo en la viabilidad económica, la sostenibilidad ambiental y la seguridad del proceso. En la extracción de aceite de algas, solventes orgánicos son ampliamente utilizados por su capacidad para solubilizar compuestos lipídicos, sin embargo, su uso implica la necesidad de sistemas eficientes de separación y recuperación posterior (Mata et al., 2010).

Desde el punto de vista económico, la recuperación del solvente permite reducir significativamente los costos operativos, ya que los solventes representan una fracción importante del costo total del proceso. Ambientalmente, una recuperación ineficiente incrementa las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y la generación de residuos peligrosos. Asimismo, la recuperación adecuada es necesaria para cumplir con normativas ambientales y de seguridad industrial (Seader et al., 2011)

Los métodos más comunes para la recuperación de solventes en procesos de extracción son la destilación, la evaporación y en algunos casos la adsorción. Entre estos, la destilación es la técnica más utilizada debido a las diferencias en puntos de ebullición entre el solvente y el aceite extraído, permitiendo una separación efectiva y reproducible a escala industrial (Richardson et al., 2017).

En sistemas sólido-líquido como la extracción de aceite de algas, el solvente es separado del extracto lipídico mediante calentamiento controlado, favoreciendo la vaporización del solvente, el cual posteriormente es condensado y reutilizado en el proceso. La selección del método de recuperación depende de las propiedades fisicoquímicas del solvente, tales como punto de ebullición, polaridad, presión de vapor y estabilidad térmica (Perry, 2008).

El hexano es uno de los solventes más utilizados en la extracción de aceites debido a su alta afinidad por compuestos no polares y su bajo punto de ebullición. Estas características facilitan su recuperación mediante destilación simple o evaporación a presión reducida, lo que reduce el consumo energético del proceso. Sin embargo, el hexano es un solvente altamente inflamable y tóxico, por lo que su recuperación debe realizarse en sistemas cerrados y con controles estrictos de temperatura y ventilación (Perry, 2008).

El etanol es un solvente polar que ha ganado interés como alternativa al hexano, especialmente en procesos orientados a la producción sostenible de biocombustibles. Su recuperación se realiza principalmente por destilación, aprovechando su punto de ebullición. Sin embargo, la presencia de agua puede complicar el proceso debido a la formación de mezclas azeotrópicas, lo que puede requerir etapas adicionales de separación o mayor consumo energético (Perry, 2008).

La acetona es un solvente de polaridad intermedia, con un punto de ebullición bajo, lo que facilita su recuperación mediante destilación a temperaturas moderadas. Esta propiedad permite una separación eficiente del aceite extraído, reduciendo la degradación térmica de los lípidos. Sin embargo, al igual que el hexano, la acetona es altamente volátil e inflamable, por lo que su recuperación debe realizarse bajo condiciones de seguridad estrictas (Perry, 2008).

H. Métodos de ruptura de pared celular

La ruptura o disrupción de la pared celular es un paso de mucha importancia en muchos procesos biotecnológicos, ya que permite la liberación del contenido intracelular como proteínas, lípidos, pigmentos, metabolitos y otros compuestos. Dependiendo del tipo de célula la estructura de la pared varía en composición química y rigidez, lo cual condiciona las estrategias efectivas de ruptura (Zhao et al., 2024).

En general los métodos de disrupción se pueden clasificar como mecánicos, que considera grinding, bead milling, homogenización, químicos con detergentes, solventes ácidos o básicos, enzimáticos con lisozimas y quinasas o físicos como térmicos, de choque osmótico, choque térmico, ultrasonido, campos eléctricos (Zhao et al., 2024).

Las paredes celulares de microalgas como *Nannochloropsis oculata* presentan capas de polisacáridos y lípidos complejos que confieren alta resistencia, lo que dificulta su ruptura mediante métodos simples (Becker, 1994).

Los métodos mecánicos aplican fuerzas físicas directas sobre las celular para fragmentar la pared celular. La homogenización a alta presión utiliza un flujo forzado a través de una válvula angosta, generando la lisis celular. La ultrasonificación, por su parte, genera ondas ultrasónicas que inducen cavitación, colapsando burbujas microscópicas que impactan y rompen la pared celular. Aunque estos métodos son muy eficaces, requieren de un alto consumo energético y puede afectar la estabilidad de los compuestos sensibles al calor o a la oxidación (Chisti & Moo-Young, 1986).

Los métodos químicos se basan en el uso de solventes orgánicos, detergentes o soluciones ácidas o básicas que disuelven o degradan los componentes de la pared celular. Por ejemplo, el uso de hexano o etanol en la extracción de aceites favorece la disolución de lípidos intracelulares al alterar la estructura de la membrana. Sin embargo, el uso de agentes químicos puede generar impurezas o degradación de biomoléculas si no se controla adecuadamente (Benjumea et al., s. f.).

Los métodos enzimáticos usan enzimas específicas como celulasas, lisozimas o proteasas para hidrolizar los componentes de la pared celular, logrando una disolución selectiva y suave. Aunque este método permite conservar la integridad de los productos, requieren de altos tiempos de acción y costos, por lo que su aplicación industrial se ve afectada (Rahman et al., 2022).

Los métodos físicos incluyen diferentes estrategias que modifican las condiciones ambientales de la célula como temperatura, presión y campos eléctricos para inducir tensiones internas o rupturas estructurales. En este grupo destacan la maceración, el choque térmico, el choque osmótico y la electroporación.

La maceración consiste en la trituración manual o semimecánica de la biomasa seca utilizando un mortero y pistilo, con el fin de romper la pared celular mediante fricción y presión directa. Este procedimiento es uno de los métodos más sencillos y accesibles para disgregar células y liberar su contenido intracelular. Durante la maceración, se aplican fuerzas de cizalla y compresión que rompen la integridad estructural de la pared. Este tipo de disrupción es especialmente útil en biomasa seca o

deshidratada, ya que la celulosa y otros polímeros de la pared se vuelven más frágiles (Rahman et al., 2022).

La maceración resulta eficiente para pequeñas cantidades de muestra y suele emplearse como pretratamiento antes de aplicar métodos de extracción con solventes o ultrasonido. En el caso de las microalgas, este procedimiento ayuda a romper los agregados celulares y aumentar la superficie de contacto con el solvente, mejorando la eficiencia de extracción de aceites (Rahman et al., 2022).

El choque térmico consiste en someter la biomasa a cambios bruscos de temperatura, generalmente pasando de una condición fría a una caliente en poco tiempo. Este cambio provoca tensiones internas en las células por la expansión diferencial de los componentes y la desnaturalización de proteínas estructurales, lo que conduce a la ruptura parcial o total de la pared celular. Este método puede aumentar la permeabilidad celular y favorecer la liberación de lípidos. Su eficacia depende de la rapidez del cambio de temperatura, la cantidad de biomasa y la resistencia de la pared celular (Quesada et al., 2021).

La ultrasonificación utiliza ondas ultrasónicas con frecuencias mayores de 20 kHz para inducir cavitación acústica en el medio líquido. La formación y colapso de microburbujas genera ondas de choque que impactan la superficie celular, rompiendo la pared. La intensidad de la cavitación depende de la amplitud, frecuencia y tiempo de exposición. En biomasa microalgal, este método puede alcanzar altos niveles de ruptura en tiempos cortos, aunque el calor generado requiere control térmico para evitar la degradación de los compuestos extraídos (Chisti & Moo-Young, 1986).

El choque osmótico se produce al someter las células a medios con diferente concentración de solutos. Si una célula se coloca en un medio hipotónico, el agua ingresa al interior, aumentando la presión interna hasta que la pared o membrana se rompe. En cambio, en medios hipertónicos, el agua sale, provocando colapso o plasmólisis. En células sin pared rígida, como bacterias o levaduras, este método puede ser muy eficaz. En microalgas, generalmente se utiliza como complemento para aumentar la permeabilidad de la pared antes de un tratamiento mecánico o químico (Quesada et al., 2021).

La electroporación consiste en aplicar pulsos eléctricos de alto voltaje, entre 1 y 20 kV/cm durante milisegundos. Esto genera poros transitorios en la membrana y la pared celular, aumentando la permeabilidad o provocando ruptura total. Aunque se usa principalmente para introducir material genético, también se ha empleado para la extracción de metabolitos intracelulares y la inactivación microbiana. La electroporación tiene gran control experimental, pero su costo y complejidad técnica limitan su uso a escala industrial (Rahman et al., 2022).

El tratamiento por microondas utiliza radiación electromagnética con frecuencias alrededor de 2.45 GHz para calentar el interior de las células por interacción con moléculas polares como el agua. El calentamiento rápido y no uniforme produce gradientes de presión y ruptura localizada de la pared celular, liberando el contenido intracelular. Este método se considera eficiente para biomasa húmeda y puede combinarse con extracción con solventes (Konrad, 2015).

I. Mercado de aceites

Se proyecta que en el mercado mundial los aceites vegetales alcancen los 128 millones de dólares en 2025, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 5 %, dicho crecimiento se debe a la concientización por temas de salud, uso cosmético y para la producción de biocombustibles. Asia pacífico es la región dominante para el mercado de aceites vegetales, y aunque la producción es alta, el consumo supera dichos niveles, dando lugar a importaciones. Este es un mercado competitivo y en donde se requieren estrategias clave para la innovación (Mordor, 2023).

En los últimos 5 años se ha tenido un crecimiento notable en la demanda de aceites para diversas aplicaciones, la industria ha experimentado un auge en el consumo, sin embargo, se ha presentado problemas como la inestabilidad en los precios de la materia prima, interrupciones en la cadena de suministro y preocupaciones ambientales por el aceite de palma (Mordor, 2023).

En Guatemala el mercado de aceites comestibles se ha consolidado como uno de los sectores agroindustriales de mayor crecimiento en los últimos años. Los ingresos estimados para este mercado alcanzan los 653,67 millones de dólares, con una tasa de crecimiento anual proyectada del 8,31 % entre 2025 y 2030. Este dinamismo responde a factores como la urbanización, el incremento del poder adquisitivo y la diversificación de la oferta, que ha permitido el acceso a diferentes tipos de aceites tanto en supermercados como en plataformas de comercio electrónico (Group, 2025).

En este contexto, los aceites vegetales constituyen la categoría más relevante, incluyendo productos como aceite de maíz, soya, girasol, oliva y palma. Por esa razón, mientras el aceite de palma y maíz mantienen su predominio por ser productos de bajo costo y amplia disponibilidad, aceites como el de oliva o el de aguacate han ganado terreno entre consumidores urbanos de mayor poder adquisitivo que priorizan beneficios nutricionales (Group, 2025).

Por otro lado, Guatemala ocupa un lugar destacado en la producción mundial de aceite de palma, siendo el sexto productor global y el segundo en América Latina. En ese año, el país produjo alrededor de 941 963 toneladas métricas, de las cuales cerca del 79 % se destinó a exportación y únicamente el 21 % al mercado local. Este sector ha

generado divisas por más de \$715 millones, representando un motor clave de la economía agroindustrial guatemalteca. Además, un 64 % de la producción cuenta con certificación de sostenibilidad, lo que fortalece su competitividad frente a mercados internacionales más estrictos en términos ambientales (Mazariegos, 2022; GREPALMA, 2023).

J. Cromatografía de gases

La cromatografía de gases es una técnica analítica de separación que permite resolver mezclas complejas de compuestos volátiles y semi volátiles con una alta sensibilidad y resolución. Tiene como principio la distribución diferencial de los analitos entre una fase móvil gaseosa (gas portador inerte) y una fase estacionaria que puede ser sólida o líquida soportada. Su uso se limita a compuestos con adecuada estabilidad térmica, generalmente de peso molecular inferior a 1000 g/mol y con temperaturas de trabajo menores a 400 °C (Barquero, 2006).

En un análisis por cromatografía de gases, una pequeña cantidad de muestra es vaporizada e inyectada en un flujo de gas portador, el cual puede ser helio, hidrógeno o nitrógeno. Los componentes se separan en la columna cromatográfica por mecanismos de partición o adsorción, emergiendo en tiempos distintos de retención. La separación se evalúa por la resolución de picos cromatográficos y depende de parámetros como el número de platos teóricos, la altura equivalente de un plato teórico (HEPT) y la selectividad de la fase estacionaria (Barquero, 2006).

Un cromatógrafo de gases está compuesto por las siguientes partes

- Fuente de gas portador: utiliza gases inertes como helio, hidrógeno o nitrógeno. Estos gases deben ser de alta pureza, ya que impurezas como oxígeno o vapor de agua pueden deteriorar la fase estacionaria o alterar la señal del detector. Para garantizar un flujo estable y reproducible se emplean reguladores de presión y filtros de humedad y oxígeno, lo que permite mantener condiciones controladas durante todo el análisis (Barquero, 2006).
- Sistema de inyección: se realiza la introducción de la muestra para vaporizar rápidamente los analitos y transferirlos a la corriente de gas portador sin degradarlos. En columnas empaquetadas se pueden inyectar microlitros de muestra sin pérdida significativa de eficiencia, mientras que, en columnas capilares, debido a su baja capacidad de carga, se requieren técnicas especiales como la inyección Split. donde solo una fracción de la muestra entra a la columna, la inyección splitless, en la que toda la muestra se dirige a la columna para alcanzar altos niveles de sensibilidad en análisis de trazas, o la inyección on-column, en la que la muestra se deposita directamente dentro de la columna evitando discriminaciones entre compuestos. Además, existen técnicas específicas como la inyección mediante válvulas de gases,

la desorción térmica de contaminantes ambientales y el análisis de espacio de cabeza, que permite estudiar compuestos volátiles en equilibrio con matrices líquidas o sólidas (Barquero, 2006).

- Horno: componente esencial, ya que en donde está la columna y mantiene una temperatura precisa dentro de márgenes de ± 1 °C. Puede operar en condiciones isotérmicas, útiles cuando los compuestos presentan volatilidades similares, o bajo programación de temperatura, donde la temperatura se incrementa gradualmente para separar compuestos de diferente punto de ebullición. Este control térmico avanzado es fundamental para mejorar la resolución y reducir los tiempos de análisis, principalmente en muestras complejas (Barquero, 2006).
- Columna cromatográfica: existen principalmente dos tipos, las columnas empaquetadas, compuestas por tubos de vidrio o acero rellenos de soportes sólidos recubiertos con fase líquida, presentan eficiencias moderadas. En contraste, las columnas capilares u open tubular, fabricadas de sílice fundida con diámetros internos muy pequeños y longitudes que alcanzan los 50 metros, los cuales tienen eficiencias superiores, de hasta 50,000 platos teóricos, lo que las convierte en la opción ideal en la cromatografía moderna. Dentro de estas últimas destacan las columnas WCOT (fase líquida recubierta en la pared interna) y las PLOT o SCOT, que emplean capas porosas o soportes impregnados para mejorar la retención (Barquero, 2006).
- Detector: transforma la presencia de los analitos en señales medibles que se registran en forma de picos cromatográficos. Entre los detectores más utilizados se encuentran el de conductividad térmica de carácter universal, el de ionización de llama siendo altamente sensible a compuestos orgánicos, y el de captura electrónica el cual es extremadamente sensible a halógenos y pesticidas. Otros detectores incluyen el nitrógeno-fósforo, el fotométrico de llama, el fotoionización y, en equipos de alto nivel, el acoplamiento a espectrometría de masas, que permite la identificación estructural de los compuestos separados. Los detectores modernos, junto con los sistemas de adquisición de datos computarizados, permiten integrar picos, calcular tiempos de retención, evaluar resoluciones y cuantificar concentraciones de manera precisa, consolidando a la cromatografía de gases como una de las técnicas más potentes y versátiles en el análisis instrumental (Barquero, 2006).

K. Balance de masa

Un balance de masa es una de las herramientas fundamentales de la ingeniería química y de procesos. Su base es el principio de conservación de la materia, el cual establece que la masa no se crea ni se destruye, únicamente cambia de forma o de ubicación dentro de un sistema. En este sentido, todo proceso puede ser descrito

cuantitativamente mediante la relación entre las entradas, salidas, acumulación, generación y consumo de materia (Felder & Rousseau, 2004).

Ecuación 2. Ecuación del balance de masa

$$\textit{Entrada} + \textit{Generación} - \textit{Salida} - \textit{Consumo} = \textit{Acumulación}$$

Este planteamiento se adapta a distintos tipos de sistemas. En estado estacionario, la acumulación es nula, por lo que el balance se simplifica a:

Ecuación 3. Ecuación del balance de masa en estado estacionario

$$\textit{Entrada} + \textit{Generación} = \textit{Salida} + \textit{Consumo}$$

Por otro lado, cuando el sistema opera en estado no estacionario, la acumulación debe considerarse, ya que la cantidad de materia varía con el tiempo. Este enfoque es esencial en procesos donde las condiciones cambian de forma transitoria, como en reacciones químicas, procesos de carga-descarga o extracciones discontinuas (Geankopolis, 2003).

Los balances de masa pueden aplicarse en diferentes escalas: globales, cuando se analizan todas las corrientes de un proceso, o parciales, cuando se estudia un componente específico de la mezcla. Los balances por componente permiten evaluar con detalle la eficiencia de separación de una sustancia o la conversión de reactivos en un reactor químico. En ingeniería de procesos, el balance de masa cumple múltiples funciones. Permite calcular flujos de entrada y salida, dimensionar equipos, verificar la eficiencia de operaciones unitarias y detectar pérdidas o inconsistencias. También constituye la base para el balance de energía, ya que ambos están interrelacionados en la descripción integral de un sistema. En el ámbito académico, es la primera herramienta matemática para conectar teoría con la operación real de equipos industriales (Smith et al., 2005).

En el caso particular de la extracción por Soxhlet, el balance de masa se utiliza para cuantificar:

- La biomasa inicial
- El solvente inicial
- El solvente evaporado y condensado
- La masa de aceite extraído
- Las pérdidas de solvente

Aplicar un balance de masa en este tipo de proceso permite determinar la eficiencia real de extracción, ya que no solo se relaciona la masa de aceite obtenida con la biomasa inicial, sino también la cantidad de solvente efectivamente recuperado, lo que

es clave para la reproducibilidad y la viabilidad económica del método (Piloto & Suarez, 2021).

V. Antecedentes

Un estudio realizado por Yunus et al. (2011) evaluó la extracción de aceite a partir de *Nannochloropsis sp.* comparando dos técnicas ampliamente utilizadas a escala laboratorio, el método Soxhlet y la extracción asistida por ultrasonido, empleando etanol como solvente. El estudio analizó de manera sistemática la influencia de la concentración del solvente, variando entre 66 % y 94 % m/m, así como el tiempo de extracción, el cual se estableció entre 80 y 220 minutos. Esta variación experimental permitió identificar cómo los parámetros operativos afectan tanto el rendimiento como la calidad del aceite obtenido. Los resultados mostraron que, aunque la extracción asistida por ultrasonido presentó rendimientos ligeramente superiores, el método Soxhlet permitió obtener aceites con mejores características fisicoquímicas, evidenciadas por menores valores de ácidos grasos libres y menor índice de peróxidos. Estos parámetros son indicadores clave de la estabilidad oxidativa del aceite y su idoneidad para aplicaciones energéticas como el biodiésel. El estudio resalta que la mejora de las condiciones de extracción no solo debe centrarse en maximizar el rendimiento, sino también en preservar la calidad del producto final, aspecto fundamental en procesos de valorización de biomasa algal.

García y Miranda (2011) realizaron un estudio comparativo de distintos métodos de extracción de aceite de microalgas a escala de laboratorio, con énfasis en su aplicación para la producción de biodiésel. El método fue analizado utilizando diferentes solventes orgánicos, destacando el uso de hexano debido a su elevada afinidad por lípidos neutros y su amplio uso en la industria de aceites vegetales. Se reportó que el método Soxhlet con hexano permitió obtener rendimientos de extracción adecuados y aceites con propiedades compatibles con los estándares requeridos para la producción de biodiésel, como un perfil de ácidos grasos favorable y bajos contenidos de impurezas. Asimismo, el estudio evidenció que a pesar de ser un método tradicional y de mayor consumo energético, el Soxhlet continúa siendo una técnica confiable, reproducible y útil para estudios comparativos y etapas preliminares de investigación en microalgas, sirviendo como referencia para la evaluación de métodos alternativos.

Dagnino et al. (2014) estudiaron la extracción de lípidos de *Nannochloropsis oculata* cultivada bajo condiciones naturales, utilizando el método Soxhlet con hexano como solvente. El objetivo principal fue evaluar el contenido lipídico de la biomasa y caracterizar los lípidos obtenidos en función de su potencial para la producción de biodiésel. El estudio consideró la influencia de las condiciones de cultivo, las cuales afectan directamente la acumulación de lípidos en las microalgas. Los resultados mostraron que el contenido y la composición de los lípidos variaron significativamente según las condiciones ambientales, lo que confirma la sensibilidad del metabolismo lipídico. Sin embargo, el método Soxhlet permitió una extracción eficiente de los lípidos acumulados, facilitando su posterior caracterización mediante análisis fisicoquímicos. Este trabajo destaca la importancia de

considerar tanto las condiciones de cultivo como el método de extracción para maximizar el aprovechamiento de microalgas como materia prima para biocombustibles.

Santoro et al. (2019) investigaron la extracción de lípidos de microalgas mediante el uso de solventes verdes y dióxido de carbono en condiciones supercríticas, comparando estos métodos con técnicas convencionales. Posteriormente, los extractos obtenidos fueron caracterizados mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), una técnica ampliamente utilizada para determinar la composición de ácidos grasos en aceites. El análisis cromatográfico permitió identificar catorce ácidos grasos metilados, tanto saturados como insaturados, lo que confirmó el potencial del aceite de microalgas para aplicaciones energéticas como el biodiésel. Este estudio resalta la importancia de la caracterización química del aceite extraído, ya que la composición de ácidos grasos influye directamente en propiedades clave del biodiésel, como el índice de cetano y la estabilidad oxidativa. Además, el trabajo aporta evidencia sobre la viabilidad de métodos alternativos de extracción orientados a reducir el impacto ambiental del proceso.

En la Universidad del Valle de Guatemala, en 2012 se realizó el proyecto titulado “Obtención de aceite a partir de algas unicelulares oleogénicas”, en el cual se evaluaron distintas estrategias de cultivo y extracción de algas recolectadas del lago de Amatitlán. El estudio incluyó la aplicación de pretratamientos físicos, como ultrasonido, con el objetivo de favorecer la ruptura de la pared celular y mejorar la eficiencia de la extracción lipídica. Las extracciones se realizaron mediante el método Soxhlet empleando hexano y éter diisopropílico como solventes. Los resultados mostraron que el hexano permitió obtener una mayor proporción de extracto lipídico y a un menor costo unitario en comparación con el éter diisopropílico. Esto demuestra la aplicabilidad del método Soxhlet y del uso de hexano en estudios locales, así como su potencial para procesos de investigación orientados a la producción de biodiésel a partir de microalgas.

En 2021, en la Universidad del Valle de Guatemala, se llevó a cabo un estudio sobre la extracción de curcumina a partir del rizoma de cúrcuma (*Curcuma longa*), utilizando el método Soxhlet y comparándolo con la extracción asistida por ultrasonido. Aunque el sustrato vegetal difiere de las microalgas, el estudio resulta relevante desde el punto de vista metodológico, ya que evalúa la eficiencia del Soxhlet y el efecto del tipo de solvente en el rendimiento de extracción. Se emplearon solventes como etanol al 95 y 70 % m/m, así como acetona, obteniéndose rendimientos entre 2.66 y 3.74 % m/m y concentraciones de hasta 904 µg/mL. Los resultados demostraron que el método Soxhlet permite obtener extractos concentrados y reproducibles, consolidándose como una técnica robusta y confiable en investigaciones realizadas. Este antecedente respalda el uso del Soxhlet en estudios experimentales donde la reproducibilidad y el control de variables son aspectos prioritarios.

Un estudio realizado por Tir et al. (2012) evaluó la influencia de la polaridad del solvente sobre el rendimiento y la composición del aceite extraído de semillas de sésamo (*Sesamum indicum*) mediante el método Soxhlet. Se emplearon solventes de diferente polaridad, entre ellos hexano, etanol, acetona, isopropanol y mezclas binarias como hexano: isopropanol y diclorometano: metanol. Los resultados mostraron rendimientos que oscilaron entre 28.86 y 52.83 % m/m, variando en función del solvente utilizado. Asimismo, se observaron diferencias en la composición de ácidos grasos, esteroides y tocoferoles, evidenciando que la polaridad del solvente influye directamente en la selectividad de los compuestos extraídos. En general, los solventes menos polares como el hexano favorecieron una mayor recuperación de lípidos neutros, mientras que los solventes más polares promovieron la extracción de componentes polares asociados a las membranas celulares lipídicas.

En Guatemala, en la Universidad del Valle de Guatemala, se realizó un estudio sobre la producción de biomasa de *Nannochloropsis oculata* utilizando un fotobiorreactor de columna de burbuja ascendente. La investigación tuvo como objetivo evaluar el crecimiento celular bajo distintas concentraciones iniciales de nitrógeno y determinar las condiciones experimentales que permitieran obtener mayor producción y rendimiento de biomasa. Los resultados indicaron que una concentración de 0.300 g NaNO₃/L permitió alcanzar la mayor producción de biomasa, mientras que una concentración menor generó el mayor rendimiento. Además, se desarrolló un modelo cinético basado en Monod para describir el crecimiento celular y el consumo de nitrato como sustrato limitante, evidenciando un crecimiento influenciado por la absorción de energía radiante (Montufar, Nuñez, & Zambrano, 2024).

VI. Metodología

A. Rompimiento de la pared celular por choque térmico

Materiales, equipo y reactivos:

- 60 gramos de microalgas *Nannochloropsis Oculata*
- 10 lb de hielo
- 2 Beaker de 400 mL
- 1 estufa
- 1 recipiente plástico
- 1 colador
- 2 termómetros
- 10 tubos de ensayo de plástico
- 6 bandejas de aluminio
- 1 horno de laboratorio
- 1 espátula analítica
- 1 par de guantes térmicos

Procedimiento:

- a) Se utilizó un colador para recolectar las algas *Nannochloropsis oculata*.
- b) Se colocaron las algas en las bandejas de aluminio.
- c) Se dejaron en el horno de laboratorio por 12 horas para eliminar la humedad.
- d) Se retiraron del horno y se maceraron las algas para reducir su tamaño y facilitar el proceso de choque térmico.
- e) Las algas se colocaron a baño maría hasta alcanzar los 100 °C y se dejaron durante 5 minutos.
- f) Se retiraron del baño maría.
- g) Se colocaron en un baño de hielo a 0 °C durante 5 minutos.
- h) Se repitió el proceso 5 veces para mejorar los resultados.

B. Rompimiento de la pared celular por maceración

Materiales, equipo y reactivos:

- 60 gramos de microalgas *Nannochloropsis oculata*
- 1 mortero
- 1 pistilo
- 1 Beaker de 250 mL
- 1 colador

- 6 bandejas de aluminio
- 1 horno de laboratorio
- 1 espátula analítica

Procedimiento:

- a) Se utilizó un colador para recolectar las algas *Nannochloropsis oculata*.
- b) Se colocaron las algas en las bandejas de aluminio.
- c) Se dejaron en el horno de laboratorio por 12 horas para eliminar la humedad.
- d) Se colocaron las algas dentro del mortero.
- e) Se maceraron por 10 minutos.
- f) Se recolectó la muestra.

C. Extracción por medio del método de Soxhlet

Materiales, equipo y reactivos:

- 1 extractor de Soxhlet
- 1 condensador
- 1 balón de 125 mL
- 5 Erlenmeyer de 125 mL
- 3 Beaker de 250 mL
- 1 probeta 100 mL
- 1 Erlenmeyer de 500 mL
- 3 ampollas de decantación
- 1 embudo pequeño
- 2 vidrios de reloj
- 2 mangueras
- 1 bomba de recirculación
- 1 cubeta 20 L
- 1 espátula de laboratorio
- 1 manto calefactor
- 2 anillos de hierro
- 2 soportes de laboratorio
- 3 pinzas de tres dedos
- Papel filtro
- Hilo
- 1 balanza analítica
- 1 termómetro
- Vaselina
- 400 g de microalgas secas
- 700 mL de hexano (solvente no polar)

- 400 mL de acetona (solvente de polaridad intermedia)
- 1L de etanol (solvente polar)

Procedimiento:

- a) Se pesaron 20 gramos de algas en papel filtro, haciendo uso de la balanza analítica.
- b) Se utilizó hilo para cerrar el papel filtro y evitar la salida de las algas.
- c) Se colocó el soporte universal en una superficie plana.
- d) Se posiciono el manto calefactor al lado de soporte.
- e) Se midieron 100 mL del solvente en una probeta.
- f) Se agregaron los 100mL al balón.
- g) El balón se colocó en el soporte utilizando una pinza de tres dedos.
- h) Se agregaron los 20 gramos de algas al extractor de Soxhlet.
- i) Se posiciono el extractor de Soxhlet sobre el matraz colector, colocando vaselina en las puntas.
- j) Se conecto el condensador a la bomba de recirculación haciendo uso de las mangueras.
- k) Se coloco la bomba de recirculación dentro de la cubeta y se conectó a una fuente de energía.
- l) Se conectó el manto calefactor.
- m) Se verificó que el solvente suba como vapor hacía el condensador, de esta forma se aseguró el correcto funcionamiento.
- n) El solvente debe regresar al cartucho de Soxhlet y mezclarse con las algas.
- o) Se espero el tiempo definido previamente para la realización de la extracción
- p) Se desconecto el manto calefactor y se retiró del balón.
- q) Se desconectó la bomba de recirculación.
- r) Se desarmo el sistema de extracción.
- s) Se paso la solución a una ampolla de decantación.
- t) Se agregaron 10 mL de solvente para obtener aceite puro, se agitó y se liberó la presión.
- u) Se decanto de 3 a 8 veces la mezcla.
- v) Se evaporo la mezcla dentro de una campana de extracción para eliminar el solvente.
- w) Se peso y almaceno el aceite extraído.

D. Esterificación del aceite

Materiales, equipo y reactivos:

- 4 mL de aceite de microalgas

- 10 mL de metanol
- 0.05g hidróxido de sodio
- 1 pipeta graduada 5 mL
- 1 pipeteador manual
- 1 Beaker 25 mL
- 1 Beaker 50 mL
- 1 agitador magnético
- 1 termometro
- 1 estufa

Procedimiento:

- a) Se disolvieron 0.05 gramos de hidróxido de sodio en 2 mL de metanol.
- b) Se colocaron los 4 mL de aceite en el Beaker de 25 mL.
- c) Se agrego la solución de NaOH y metanol al Beaker con aceite.
- d) Se calentó a baño maría hasta llegar a 50°C por 30 minutos con una agitación constante.
- e) Se removió de la fuente de calor y se dejó reposar hasta observar la separación de fases.
- f) La fase superior es el aceite esterificado y la fase inferior glicerina y restos de catalizador.
- g) Se almacenó el aceite esterificado.
- h) Se realizó una cromatografía de gases de la muestra.

E. Análisis estadístico

Materiales, equipo y reactivos:

No aplica.

Procedimiento:

- a) Se tabularon los datos experimentales obtenidos para cada objetivo.
- b) Se determinó la media aritmética y la desviación estándar para describir la tendencia central y la dispersión de los resultados.
- c) Se calcularon los intervalos de confianza al 95% para estimar el rango de los valores reales.
- d) Se evaluó la incertidumbre de las mediciones y cálculos.
- e) Se realizó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y un análisis de varianza para conocer la significancia estadística de los resultados.
- f) El procedimiento se realizó en Excel.

VII. Resultados

Cuadro 4. Costo de los solventes utilizados para la extracción de aceite de microalgas

Solvente	Costo (Q/L)
Etanol	250
Acetona	115
Hexano	419

En el cuadro anterior se presentan los costos en quetzales por cada litro de cada uno de los solventes utilizados para la extracción de aceite de microalgas.

Cuadro 5. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los diferentes métodos de ruptura de pared celular

Método	W estadístico	W critico	Conclusión
Maceración	0.86	0.75	Normalidad aceptada
Choque térmico	0.92	0.75	Normalidad aceptada

En el cuadro anterior se presentan los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk aplicada a los rendimientos promedio obtenidos mediante los métodos de ruptura de pared celular maceración y choque térmico. Los valores de W estadístico y su comparación con el valor critico permiten determinar si los datos de cada grupo tienen una distribución normal.

Cuadro 6. Análisis de varianza de los rendimientos promedio de la extracción de aceite de microalgas con diferentes métodos de ruptura de pared celular

F calculado	F crítico (0.05)	p
4.65	7.71	0.097

En el cuadro anterior se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los rendimientos promedio obtenidos mediante distintos métodos de ruptura de pared celular. Los valores de F calculado, F crítico y p permiten determinar la existencia o no de diferencias significativas entre tratamientos, siendo esta información importante para evaluar el efecto del método de ruptura en la eficiencia de extracción del aceite.

Cuadro 7. Rendimiento de extracción de aceite de microalgas por diferentes métodos de ruptura de pared celular

Método de ruptura	Rendimiento Promedio (%)	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza
Maceración	3.35 ± 0.62	1.23	[0 – 12.40]
Choque térmico	5.23 ± 0.69	0.87	[0 – 11.60]

En el cuadro anterior se muestran los valores promedio de rendimiento de extracción, desviación estándar e intervalo de confianza correspondientes a los métodos de maceración y choque térmico. Estos resultados reflejan la variabilidad experimental asociada a cada tratamiento y sirven de base para comparar los métodos empleados en la liberación de compuestos lipídicos.

Cuadro 8. Compatibilidad solvente-ácido oleico por distancia de Hansen

Solvente	R_a
Etanol	15.32
Acetona	7.83
Hexano	6.43

En el cuadro anterior se presentan los valores de la distancia de Hansen (R_a) calculados para los solventes utilizados en la extracción de aceite, considerando al ácido oleico como compuesto modelo de los lípidos. Este parámetro permite evaluar la afinidad entre el solvente y la fase lipídica, donde menores valores de R_a indican mayor compatibilidad y, por tanto, un potencial más alto de disolución y eficiencia en la extracción.

Cuadro 9. Rendimiento promedio de extracción de aceite de microalgas con solventes de diferentes polaridades

Solvente	Rendimiento Promedio (%)	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza
Etanol	3.83 ± 0.50	0.76	[0 – 9.43]
Acetona	2.72 ± 0.51	0.85	[0 – 8.99]
Hexano	4.73 ± 0.51	0.87	[0 – 11.14]

En el cuadro anterior se presentan los valores promedio de rendimiento de extracción obtenidos con los solventes etanol, acetona y hexano, junto con su desviación estándar e intervalo de confianza.

Cuadro 10. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para extracción de aceite de microalgas con diferentes solventes

Método	W estadístico	W crítico	Conclusión
Etanol	0.96	0.75	Normalidad aceptada
Acetona	0.95	0.75	Normalidad aceptada
Hexano	0.95	0.75	Normalidad aceptada

En el cuadro anterior se presentan los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk aplicada a la extracción de aceite de microalgas utilizando solventes de distintas polaridades. Los valores de W estadístico y su comparación con el valor crítico permiten determinar si los datos de cada grupo tienen una distribución normal.

Cuadro 11. Análisis de varianza de los rendimientos promedio de la extracción de aceite de microalgas con diferentes solventes

F calculado	F crítico (0.05)	p
4.40	5.14	0.066

En el cuadro anterior se muestran los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los rendimientos promedio obtenidos con distintos solventes. Los valores de F calculado, F crítico y p permiten determinar la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, siendo esta información útil para establecer la influencia del tipo de solvente sobre el rendimiento de extracción.

Cuadro 12. Prueba Tukey de los rendimientos promedio de la extracción de aceite de microalgas con diferentes solventes

Comparación	Diferencia	Tukey crítico	Decisión
Hexano – Acetona	2.01	2.08	No significativo
Hexano – Etanol	0.90	2.08	No significativo
Acetona - Etanol	1.11	2.08	No significativo

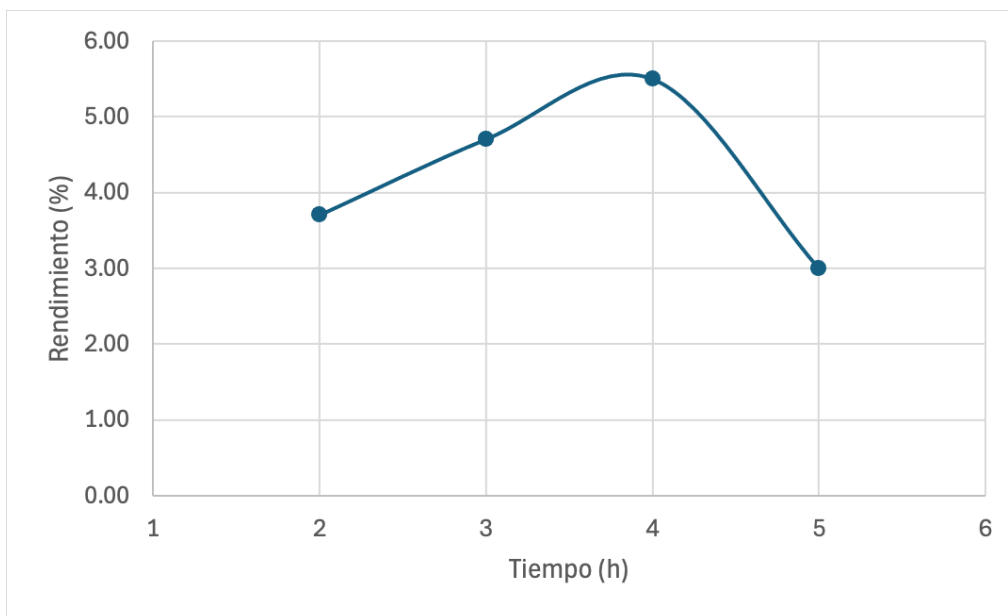
En el cuadro anterior se presentan los resultados de la prueba de comparación múltiple de Tukey, utilizada para identificar diferencias significativas entre pares de solventes. Se incluyen los valores de diferencia observada, el valor crítico de Tukey y la decisión estadística correspondiente, permitiendo validar los resultados del análisis de varianza y establecer si existen diferencias significativas en la eficiencia de extracción.

Cuadro 13. Rendimiento de la extracción de aceite de microalgas a diferentes tiempos

Tiempo (h)	Rendimiento Promedio (%)
2	3.70 ± 0.46
3	4.70 ± 0.51
4	5.50 ± 0.52
5	3.00 ± 0.50

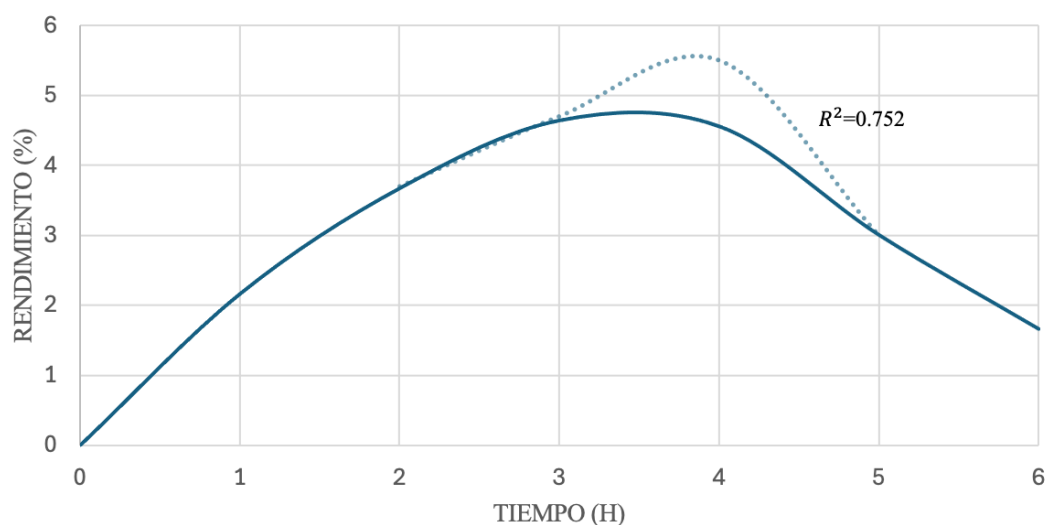
En el cuadro anterior se muestran los rendimientos promedio obtenidos en función del tiempo de extracción, expresados junto con su incertidumbre. Esta información permite analizar la evolución del proceso y determinar el intervalo temporal en el cual se alcanzan los valores máximos de recuperación de aceite.

Figura 2. Gráfico del rendimiento de la extracción de aceite de microalgas en función del tiempo



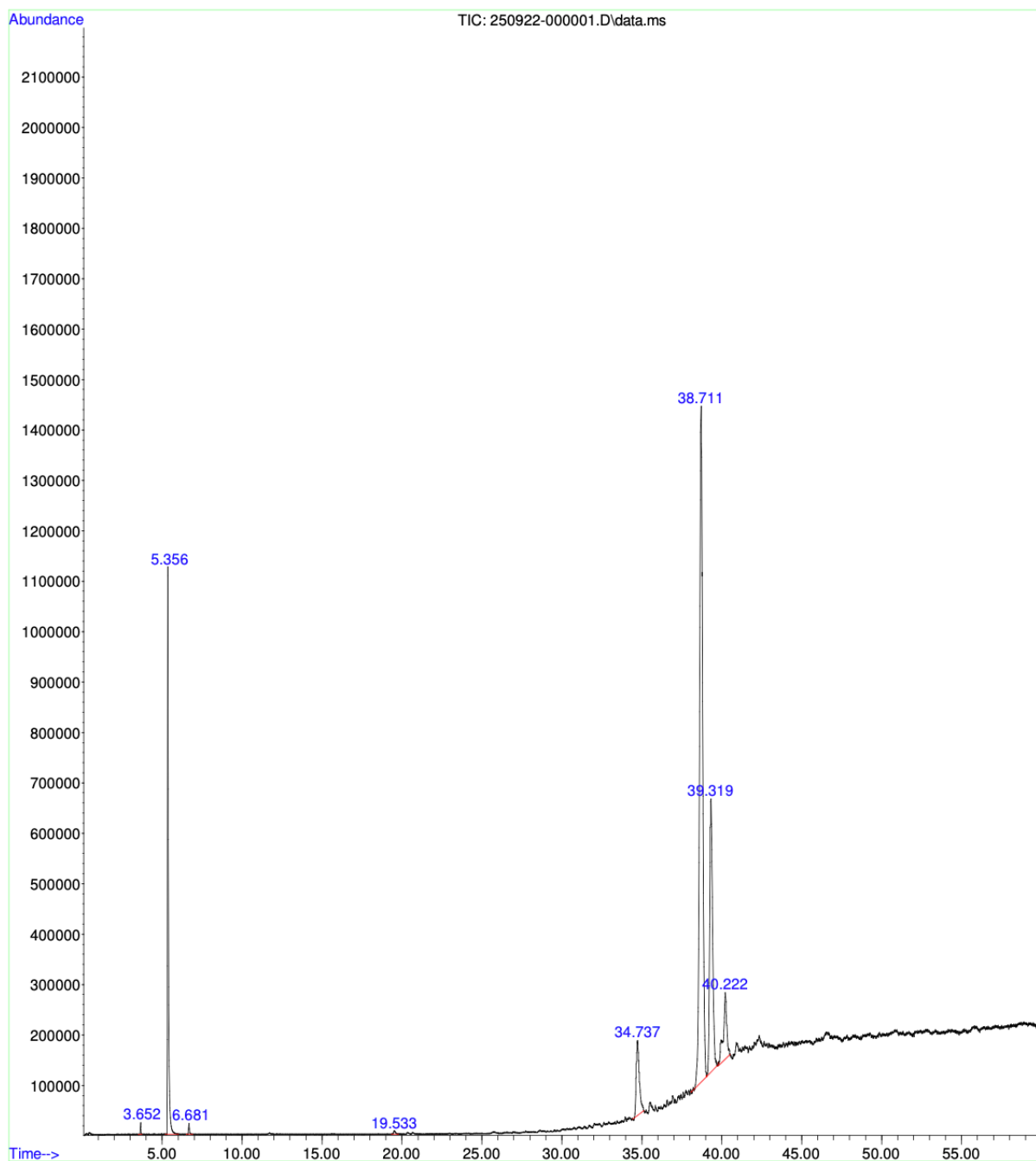
En la figura anterior se muestra la relación entre el tiempo de extracción y el rendimiento presentado en el Cuadro 10 para el proceso de recuperación de aceite de microalgas.

Figura 3. Modelo cinético de extracción y decaimiento para la obtención de aceite de microalgas



En la figura anterior se muestra el comportamiento del modelo cinético ajustado para describir la variación del rendimiento de extracción de aceite de microalgas en función del tiempo.

Figura 4. Cromatografía de gases aceite de microalgas



La figura anterior presenta el cromatograma obtenido mediante cromatografía de gases del aceite esterificado. Se observan diversos picos correspondientes a los compuestos presentes en la muestra, representados en función del tiempo de retención.

Figura 5. Identificación de picos en cromatografía de gases

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	3.653	0.14	C:\Database\NIST05a.L Glycidol Oxiranemethanol, (R)- Ethyne, fluoro-	789 796 76	000556-52-5 057044-25-4 002713-09-9	4 4 3
2	5.355	13.05	C:\Database\NIST05a.L Ethyl alcohol Ethyl alcohol Ethyl alcohol	93 95 94	000064-17-5 000064-17-5 000064-17-5	91 91 72
3	6.683	0.25	C:\Database\NIST05a.L Ammonia Water	6 7	007664-41-7 007732-18-5	2 1
4	19.533	0.14	C:\Database\NIST05a.L Guanidine Guanidine Acetamide	250 252 234	000113-00-8 000113-00-8 000060-35-5	9 5 5
5	34.739	5.93	C:\Database\NIST05a.L Pentadecanoic acid, 14-methyl-, me thyl ester Pentadecanoic acid, 14-methyl-, me thyl ester Pentadecanoic acid, 14-methyl-, me thyl ester	105659 105661 105662	005129-60-2 005129-60-2 005129-60-2	97 97 97
6	38.710	54.45	C:\Database\NIST05a.L 9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl e ster 9-Octadecenoic acid, methyl ester 9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	122323 122299 122326	000112-62-9 002462-84-2 001937-62-8	99 99 99
7	39.319	20.05	C:\Database\NIST05a.L 9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester 8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester 9,15-Octadecadienoic acid, methyl ester, (Z,Z)-	121106 121092 121114	000112-63-0 056599-58-7 017309-05-6	99 99 99
8	40.224	6.00	C:\Database\NIST05a.L 9,12,15-Octadecatrien-1-ol, (Z,Z,Z)- 9,12,15-Octadecatrienoic acid, met hyl ester, (Z,Z,Z)- 7,10,13-Hexadecatrienoic acid, met hyl ester	101506 119877 101432	000506-44-5 000301-00-8 056554-30-4	86 46 45

La figura anterior presenta la identificación de los compuestos detectados en el cromatograma del aceite de microalgas mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS). Los picos se identificaron con base en sus tiempos de retención y comparación con la base de datos.

VIII. Discusión de resultados

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la extracción de aceite de microalga del tipo *Nannochloropsis oculata* mediante el método de Soxhlet, analizando la influencia de distintos métodos de ruptura de pared celular, solventes de diferentes polaridades y tres tiempos de extracción diferentes para mejorar el rendimiento. Esta investigación busco identificar la combinación de variables con mayor rendimiento para la obtención de aceite para su potencial aplicación en la producción de biodiésel a escala laboratorio.

Durante la primera fase experimental, se recolectó la biomasa de *Nannochloropsis oculata* en condiciones controladas. Las muestras se sometieron a un proceso de limpieza inicial para eliminar contaminantes visibles como insectos, partículas extrañas o restos orgánicos no deseados. Posteriormente la biomasa húmeda se secó en un horno de laboratorio durante 12 horas con el fin de reducir el contenido de agua y garantizar la estabilidad previo al proceso de extracción. Este paso es fundamental, ya que la humedad excesiva interfiere en la solubilidad de los lípidos y puede afectar la eficiencia del solvente en el sistema Soxhlet (Ozer, 2014; Piloto & Suarez, 2021).

La selección de los métodos de ruptura de pared celular se basó en su simplicidad, bajo costo y posibilidad de aplicación a escala piloto. Se eligió maceración y choque térmico, dos métodos físicos en los que no se requiere de solventes adicionales ni equipos especializados. La maceración permite romper mecánicamente las estructuras celulares por fricción, mientras que el choque térmico induce estrés osmótico al alternar temperaturas de 100 y 0 °C, generando fisuras que facilitan la liberación de los lípidos intracelulares. Otros métodos, como ultrasonido o microondas, pueden ofrecer mayor eficiencia, pero implican mayores costos de operación y consumo energético, lo cual los hace poco viables para procesos de escala industrial.

Con la biomasa seca se utilizaron ambos métodos de ruptura de pared celular. A partir de los resultados se identificó que el choque térmico tuvo un rendimiento promedio de $5.23 \pm 0.69 \% m/m$, superior a la maceración con un rendimiento promedio de $3.35 \pm 0.62 \% m/m$. Esta diferencia muestra la capacidad de la técnica térmica para romper de forma más efectiva la pared celular, permitiendo que los lípidos quedaran disponibles para el proceso de extracción. La desviación estándar presenta un valor más bajo en el choque térmico (0.87) frente a la desviación presentada en la maceración (1.23).

El análisis de varianza presentado en el Cuadro 6 mostro un valor de $F = 4.65$ frente a un $F_{critico} = 7.71$ con un $p = 0.097$, lo que indica que no existe diferencia estadísticamente significativa al 95 % de confianza, aunque si una tendencia a favor del choque térmico. Previo a la aplicación del análisis de varianza, se realizó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para cada tratamiento, con el fin de validar la distribución de

los datos. En ambos métodos se obtuvo un valor de W estadístico superior al W crítico, lo que permite aceptar la hipótesis de normalidad. Esto confirma que los datos cumplen con los supuestos estadísticos necesarios para validar el análisis de varianza aplicado. Esto coincide con lo indicado por García y Miranda (2011), quienes dicen que la eficiencia de la liberación de lípidos depende directamente de la integridad de la pared celular, la cual es una barrera en la recuperación de compuestos lipídicos. Por esa razón, aunque no se identificaron diferencias significativas, el comportamiento experimental confirma que el choque térmico es una mejor alternativa y también es económica y fácil de implementar.

Luego del pretratamiento por choque térmico, se procedió a evaluar la eficiencia de tres solventes de distintas polaridades para la extracción de aceites con Soxhlet. Todas las pruebas se realizaron con biomasa previamente sometida a ciclos térmicos de ruptura celular, con el fin de maximizar el rendimiento. Los solventes utilizados fueron hexano como solvente no polar, acetona como polaridad intermedia y etanol como polar. Al igual que en la fase anterior, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk para los tres solventes, obteniendo en todos los casos un W estadístico mayor al W crítico, confirmando que los datos siguen una distribución normal y validando el uso de pruebas paramétricas para su análisis.

La elección de estos solventes se basó tanto en su compatibilidad química como en su disponibilidad y costo. El hexano tiene un costo promedio de 419 quetzales por litro, y es ampliamente utilizado en la industria de aceites vegetales por su alta selectividad con los triglicéridos y su facilidad de recuperación. Por otro lado, el etanol tiene un costo de 250 quetzales por litro, siendo una alternativa renovable y menos tóxica, y la acetona con un costo de 115 quetzales por litro.

Desde una perspectiva técnica y económica, aunque la acetona es el solvente de menor costo, su baja eficiencia y alta volatilidad limitan su viabilidad. En contraste, el hexano, a pesar de tener el costo por litro más elevado, es una mejor opción económica en términos de calidad de aceite extraído. Su alta selectividad garantiza un extracto con menor contenido de impurezas polares, lo que reduce los costos de purificación posteriores y asegura una mejor conversión en el proceso de producción de biodiésel.

En el Cuadro 9 se muestran los resultados donde el hexano presentó el mayor rendimiento promedio con $4.73 \pm 0.51 \% m/m$, seguido por el etanol con un valor promedio de $3.83 \pm 0.50 \% m/m$ y la acetona fue el solvente menos eficiente con un rendimiento promedio de $2.72 \pm 0.51 \% m/m$. Aunque el análisis de varianza mostro un valor $p = 0.066$ y la prueba de Tukey en el Cuadro 12 no presento diferencias significativas entre los pares de solventes, la tendencia observada es coherente con la teoría de la distancia de Hansen (R_a). En esta, el hexano presento el valor más bajo $R_a = 6.43$, teniendo una mayor compatibilidad con el ácido oleico, considerado el principal componente de las microalgas.

El etanol que tuvo un valor $R_a = 15.32$, presenta menor afinidad por su alta polaridad y la acetona un $R_a = 7.83$ con una compatibilidad intermedia.

De acuerdo con la teoría, un menor valor de R_a implica mayor afinidad solvente-soluto, por lo tanto, una mayor capacidad de disolución lipídica. Esto explica el rendimiento superior del hexano, ya que su naturaleza apolar favorece la extracción selectiva de triglicéridos y evita el arrastre de compuestos no deseados. En cambio, los solventes polares como el etanol tienden a extraer simultáneamente pigmentos y carbohidratos, lo que reduce el porcentaje de lípidos puros recuperados. Además, la alta volatilidad de la acetona puede provocar pérdidas por evaporación durante los ciclos Soxhlet, afectando la eficiencia global del proceso (Becker, 1994; Ozer, 2014; Piloto & Suarez, 2021).

Con base en lo anterior, se evidencia que la elección de solvente es un factor decisivo en el proceso de extracción. Bajo las condiciones de choque térmico, el hexano se consolidó como el solvente más adecuado para la extracción de aceite de *Nannochloropsis oculata*, y su desempeño superior confirma la importancia de emplear solventes no polares en procesos de recuperación de lípidos. Sin embargo, el rendimiento máximo obtenido indica que una fracción del aceite total permanece aún en la biomasa residual. Considerando que especies del género *Nannochloropsis* pueden presentar contenidos lipídicos teóricos superiores al 20–30% en base seca bajo condiciones de estrés, los resultados sugieren que el método empleado no logra recuperar la totalidad del aceite disponible. Para incrementar este rendimiento, se podrían integrar pretratamientos químicos o enzimáticos que degraden de forma más agresiva los carbohidratos de la pared celular, facilitando el acceso del solvente a los lípidos ocluidos.

Al comparar este rendimiento con fuentes tradicionales, resalta el potencial de *Nannochloropsis oculata* frente a cultivos terrestres. Se estima que las microalgas pueden alcanzar rendimientos de aceite por hectárea entre 10 y 23 veces superiores a los obtenidos por la palma de aceite, la cual es considerada la fuente terrestre más eficiente. Esta ventaja competitiva refuerza el uso de microalgas como una materia prima estratégica que no compite con el suelo agrícola destinado a la alimentación (GREPALMA, 2023).

Luego de identificar el choque térmico y el hexano como la combinación de variables más eficientes para la extracción de aceite, se evaluó el tiempo de extracción por el método de Soxhlet. El análisis se realizó con 2, 3, 4 y 5 horas, con el propósito de identificar la duración que maximiza la recuperación de aceite sin comprometer la calidad del producto.

Los resultados presentados en el Cuadro 13 mostraron que a las 2 horas se tiene un rendimiento de $3.70 \pm 0.46 \% m/m$, considerando 12 ciclos de recirculación. Este valor representa la etapa inicial de la disolución rápida de lípidos disponibles. Para la extracción de 3 horas se tuvo un aumento en el rendimiento, llegando a $4.72 \pm 0.51 \%$, considerando 18 ciclos, evidenciando que un mayor número de recirculaciones favorece la transferencia de masa y mejora la eficiencia.

El mayor rendimiento se observó a las 4 horas de extracción, con un valor de 5.50 ± 0.52 %, luego de 23 ciclos de recirculación. Para este tiempo se identificó un equilibrio entre el tiempo de operación y el número de ciclos, logrando extraer con mayor eficiencia los lípidos disponibles en las muestras utilizadas. Este comportamiento concuerda con lo indicado en la teoría, en donde existe una etapa rápida de disolución inicial, seguida por una fase limitada, por esa razón extender el proceso no representa un incremento significativo en la extracción (Campos, s. f.; Ozer, 2014).

Por otro lado, en la extracción de 5 horas se observó una caída en el rendimiento, llegando a 3.00 ± 0.50 %, a pesar de alcanzar 25 ciclos. Esto puede explicarse por la prolongación del tiempo de operación, que genera una degradación térmica de los compuestos lipídicos y aumenta el arrastre de impurezas. Resultados similares se han reportado en estudios en donde con tiempos prolongados se reduce la calidad y estabilidad el aceite extraído (Reddy et al., 2015; Chaos et al., 2023). Asimismo, la incertidumbre experimental refleja que, a mayores tiempos, las pérdidas se vuelven más significativas.

Bajo un enfoque de biorrefinería, esta biomasa no debe considerarse un desperdicio, tras una etapa de eliminación del solvente y recuperación del hexano, el residuo rico en proteínas y carbohidratos podría utilizarse para la producción de biogás por digestión anaerobia o como suplemento en aplicaciones industriales, siempre que se asegure la remoción total de residuos químicos. Sin embargo, debido a que en este estudio la biomasa residual conserva un porcentaje considerable de lípidos no extraídos, su uso directo en biodigestores podría comprometer la estabilidad del sistema, ya que el exceso de grasas tiende a generar espumas y puede inhibir la actividad microbiana por la acumulación de ácidos grasos de cadena larga. Por lo tanto, para un aprovechamiento integral en este caso específico, sería indispensable someter la biomasa a una segunda etapa de extracción más severa o considerar procesos de conversión termoquímica, como la pirólisis, para transformar el residuo en biochar y gas de síntesis sin que el contenido lipídico remanente represente un obstáculo operativo (Ozer, 2014).

El comportamiento observado se ajustó a un modelo cinético de extracción y decaimiento presentado en la Figura 3, que describe el incremento inicial de la eficiencia hasta un punto máximo seguido de una caída progresiva. Este modelo refleja el equilibrio entre la cantidad de lípido disponible y las pérdidas térmicas asociadas al tiempo prolongado, confirmando que el punto óptimo de operación se encuentra alrededor de las 4 horas.

Es importante mencionar que, aunque el método de Soxhlet es adecuado a escala laboratorio por su simplicidad, no es una alternativa eficiente para un escalamiento industrial, debido a que es un proceso discontinuo, de alto consumo energético y largos tiempos de operación. A nivel industrial los sistemas de extracción continua con solvente, como los extractores tipo percolación o de lecho móvil, así como tecnologías emergentes como la

extracción con CO₂ supercrítico, ofrecen mayores eficiencias, mejor control del proceso y recuperación del solvente, reduciendo costos operativos y riesgos ambientales.

Para asegurar la viabilidad industrial, el hexano se recupera mediante la destilación al vacío y el uso de condensadores para su reutilización. El sistema se complementa con absorbedores y desolventizadores para la biomasa residual, logrando recuperar un alto porcentaje del solvente. Este proceso de circuito cerrado es fundamental para minimizar los costos operativos y el impacto ambiental del proceso.

Para complementar la evaluación del método de extracción, se realizó un análisis de cromatografía de gases con espectrometría de masas. Los resultados de la Figura 4 y Figura 5 presentaron varios picos de importancia, los cuales corresponden tanto a compuestos volátiles residuales como ácidos grasos presentes en el aceite extraído.

En la región inicial, entre 3.65 y 6.68 min, se detectaron compuestos de bajo peso molecular, principalmente etanol, lo que indica la presencia de trazas del solvente utilizado en la extracción. También se identificaron pequeñas señales correspondientes a amoníaco y glicidol. Estos compuestos no comprometen la calidad del aceite extraído, pero sí resaltan la importancia de asegurar una evaporación adecuada del solvente al finalizar el proceso. Cabe destacar que no se detectaron residuos de hexano ni acetona, lo cual se explica por su mayor volatilidad, que facilita su eliminación completa durante la etapa de evaporación.

En la zona intermedia de 34.73 a 40.22 min se observaron picos más relevantes, los cuales corresponden a ácidos grasos en forma de esteres metílicos. Se identificó la presencia de ácido pentadecanoico, 14-metil y éster metílico en RT 34.73. Posteriormente, se detectó un pico mayoritario a 38.71 que corresponde al ácido oleico, el cual es uno de los ácidos más abundantes en aceites vegetales y de algas (Becker, 1994; Rubio et al., 2012).

Asimismo, se identificaron ácidos grasos poliinsaturados, como el ácido linoleico (éster metílico del ácido (Z,Z)9,12-octadecadienoico) y el ácido linolénico (9,12,15 octadecatrienocio). Dichos compuestos son característicos de microalgas y confirma que *Nannochloropsis oculata* contiene una fracción significativa de ácidos grasos insaturados, incrementando la calidad del biodiésel por su buen perfil de combustión (Rubio et al., 2012; Dagnino, 2014). Por esa razón la cromatografía de gases confirma que el aceite extraído de *Nannochloropsis oculata* presenta picos que sugieren que el aceite extraído está compuesto principalmente por ácidos grasos insaturados, especialmente de oleico y linoleico, complementados por ácidos grasos saturados en cantidades menores.

A partir de estos hallazgos, se abre un campo de investigación orientado a mejorar la eficiencia de extracción mediante la recuperación de solventes y la evaluación de nuevos pretratamientos físicos que reduzcan el consumo energético. Asimismo, el aprovechamiento de *Nannochloropsis oculata* como fuente de aceite representa una oportunidad estratégica

para Guatemala, donde la producción de biocombustibles a partir de microalgas podría contribuir significativamente a la seguridad energética y a la diversificación de fuentes renovables.

IX. Conclusiones

El pretratamiento por choque térmico demostró ser más efectivo que la maceración, alcanzando un rendimiento promedio de $5.23 \pm 0.69 \% m/m$, superior al obtenido con maceración $3.35 \pm 0.62 \% m/m$. Los ciclos de calentamiento a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y enfriamiento a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ favorecieron la ruptura de la membrana celular y facilitaron la liberación de triglicéridos, confirmando que este método tiene una mayor eficiencia y reproducibilidad.

El hexano demostró ser el solvente más eficaz en las condiciones evaluadas, alcanzando un rendimiento promedio de $4.73 \pm 0.51 \% m/m$, superior al etanol ($3.83 \pm 0.50 \% m/m$) y la acetona ($2.72 \pm 0.51 \% m/m$).

El mejor tiempo de extracción evaluado se estableció en 4 horas, con un rendimiento máximo de $5.50 \pm 0.52 \% m/m$ y 23 ciclos de recirculación. Esto coincide con el equilibrio observado en la gráfica y el modelo cinético de extracción, que muestran un incremento inicial seguido de un decaimiento asociado a la degradación térmica y arrastre de impurezas en tiempos prolongados.

X. Recomendaciones

Integrar técnicas de disrupción más intensivas como ultrasonido o microondas en combinación con el choque térmico y maceración, con el fin de mejorar la ruptura de la pared celular y facilitar la liberación de lípidos, buscando mejorar el rendimiento de las extracciones.

Evaluar mezclas de los solventes utilizados para identificar si existe un aumento en la eficiencia con respecto al incremento de la selectividad hacia los triglicéridos y reducir la extracción de impurezas como pigmentos.

Analizar el aceite en diferentes etapas de extracción para identificar variaciones en la composición lipídica y determinar si existe un punto de saturación antes de alcanzar el máximo rendimiento.

Evaluar cómo el aumento de la escala de operación influye en la eficiencia de ruptura celular y en la solubilización de los lípidos durante la extracción. Este análisis permitirá determinar si los parámetros de laboratorio se mantienen al pasar a condiciones de planta piloto o industrial.

Implementar ensayos con mayores volúmenes de biomasa y solvente para validar los resultados obtenidos, cuantificar el rendimiento en condiciones reales y establecer la factibilidad técnica del método Soxhlet a mayor escala.

Evaluar la efectividad de agentes químicos y de enzimas específicas como alternativas a los métodos de ruptura de pared celular físicos, con el objetivo de incrementar la liberación de lípidos y disminuir el consumo energético.

Estimar los costos de operación asociados al consumo de solvente y energía, considerando precios locales en Guatemala, para establecer la viabilidad económica del proceso y su potencial de implementación a nivel industrial.

Explorar la posibilidad de emplear herramientas de ingeniería genética para incrementar el contenido lipídico de *Nannochloropsis oculata* y mejorar su respuesta a los procesos de ruptura y extracción.

XI. Bibliografía

- BaneBio. (s. f.). *VWR Horizontal Air Flow Oven Symphony 414004-564*.
- Barquero, M. (2006). *Principios y aplicaciones de la cromatografía de gases*. Costa Rica: Editorial UCR.
- Becker, E. W. (1994). *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Benjumea et al. (s. f.). *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización*. Universidad de Antioquia. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yiaApKhNqRYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=biodiésel+producción&ots=E5_72RuEnR&sig=RAquj2QKq103gLQzNUOE4u50hJI#v=onepage&q&f=false
- Bulla, E. (2014). *Diseño del proceso de producción del biodiésel a partir de aceites de fritura*. Universidad Nacional de Colombia.
- Cabello et al. (2015). *Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiésel*. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/320756/411247>
- Campos, M. (s. f.). *Soxhlet, del inventor al método*. <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/244-numero-29/450-soxhlet-del-inventor-al-metodo.html>
- Chaos et al. (2023). *Extraction methods of algae oils for the production of third generation biofuels – A review*. ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523021252?utm_
- Chisti, Y., & Moo-Young, M. (1986). *Disruption of microbial cells for intracellular products*. Enzyme and Microbial Technology.
- Cleveland, P. (2025). *Water-Treatment Startup Sees Carbon Benefit in Harmful Algal Blooms*. https://www.wsj.com/articles/water-treatment-startup-sees-carbon-benefit-in-harmful-algal-blooms-688708c8?utm_
- Dagnino, E. (2014). *Evaluación de Lípidos Extraídos de Microalgas Nannochloropsis oculata para la Producción de Biodiésel*. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/29620/CONICET_Digital_Nro.00c1929c-b807-4b5f-a49a-4bf669cbdd44_D.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Deme et al. (2012). *Effect of the extraction solvent polarity on the sesame seeds oil composition*.
- Felder, R., & Rousseau, R. (2004). *Elementary Principles of Chemical Processes*.

- Garcia, J., & Miranda, J. (2011). *Comparación de metodos de extracción de aceite de microalgas a escala laboratorio para la producción de biodiésel*. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/21f3723e3f80-42de-9d23-3db02a9a0b7e/content>
- Garrido, S. (2010). *Tecnología, territorio y sociedad. Producción de biodiésel a partir de aceites usados*. <https://www.redalyc.org/pdf/509/50918216006.pdf>
- Geankopolis, C. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles*. Prentice Hall.
- GREPALMA. (2023). *Aceite de palma aportó más de Q12,500 millones de quetzales a la economía de Guatemala durante el 2023*. <https://www.grepalma.org/noticia/aceite-de-palma-aporto-mas-de-q12500-millones-de-quetzales-a-la-economia-de-guatemala-durante-el-2023/>
- Group, S. (2025). *Guatemala Cooking and Edible Oils Market 2025*. <https://strategyh.com/report/cooking-and-edible-oils-market-in-guatemala>
- Hansen, C. (2007). *Hansen Solubility Parameters*. CRC Press.
- Iten et al. (2012). *Obtención de aceite a partir de algas unicelulares oleogénicas*. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/1522>
- Jafarinejad, S. (2017). *Petroleum Waste Treatment and Pollution Control*. Elsevier.
- Julajuj, A. (2015). *Atacan tres tipos de cianobacterias al lago de Atitlán*. <https://www.prensalibre.com/ciudades/solola/atacan-tres-tipos-de-cianobacteria-al-lago-de-atitlan/>
- Konrad, E. (2015). *Boosting power output of a sugarcane bagasse cogeneration plant using parabolic trough collectors in a feedwater heating scheme*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915005632?via%3Dihub>
- LGC. (2017). *Hoja de Datos de Seguridad Biodiésel/Fuel Blends 10%*. https://assets.lgcstandards.com/sys-master%2Fpdfs%2Fh12%2Fhc8%2F10147850780702%2FSDS_VHG-BDBLEND-10P-20_ST-WB-MSDS-2460822-1-1-1.PDF
- Lopez, D. (2021). *Extracción de curcumina a escala laboratorio*. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4531>
- Martín, F. (2007). *Biodiésel de algas*. https://oa.upm.es/2926/1/INVE_MEM_2008_60135.pdf

- Mata et al. (2010).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032109001646>
- Mazariegos, L. (2022). *Un sector agroindustrial guatemalteco encontró un nicho de mercado mundial este año y lo seguirá aprovechando.*
<https://www.prensalibre.com/economia/un-sector-agroindustrial-guatemalteco-encontro-un-nicho-de-mercado-mundial-este-ano-y-lo-seguira-aprovechando>
- Merck. (2024). *Acetona* SDS.
https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/msds/MDA_CHEM-100014?Origin=PDP
- Merck. (2024). *Etanol* SDS.
https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/msds/MDA_CHEM-100990?Origin=PDP
- Merck. (2024). *n-Hexano* SDS.
https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/msds/MDA_CHEM-104374?Origin=PDP
- Montúfar et al. (2024). *Evaluación de la producción de biomasa utilizando Nannochloropsis oculata en un fotobiorreactor de columna de burbuja ascendente.*
<https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/5773>
- Mordor. (2023). *Tamaño del mercado de aceites vegetales y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029)*
<https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/vegetable-oil-market>
- OHAUS. (s. f.). *Valor™ 3000 Xtreme Compact Precision Scales.*
- Ozer, R. (2014). *Algae Drying and Extraction.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com.translate.google.topics/engineering/solvent-extraction?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- PEMEX. (2015). *Hoja de Datos de Seguridad Diésel.*
<https://distribuidorariopanuco.com/pdfs/diesel.pdf>
- Perry, R. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook.* McGraw-Hill.
- Piloto, R., & Suarez, J. (2021). *Extracción de aceites de origen vegetal.*
https://www.researchgate.net/profile/Ramon-Piloto-Rodriguez/publication/356287423_Extraccion_de_aceites_de_origen_vegetal/links/61950fec07be5f31b78ecec/Extraccion-de-aceites-de-origen-

vegetal.pdf?__cf_chl_tk=BgDy16PQqWpuszt_JUMog_5Jyh2ClqWGZZXI9wLx53
E-17

- Quesada et al. (2021). *Optimization and Comparison of Three Cell Disruption Processes on Lipid Extraction from Microalgae*. <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/2/369>
- Rahman et al. (2022). *Recovering Microalgal Bioresources: A Review of Cell Disruption Methods and Extraction Technologies*. <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/9/2786>
- Richardson et al. (2017). *Coulson and Richardson's Chemical Engineering*. Butterworth-Heinemann.
- Reddy et al. (2015). *Microalgae as Sustainable Renewable Energy Feedstock for Biofuel Production*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4385614/>
- Romero, A. (2010). *Aprovechamiento De La Biomasa Como Fuente De Energía Alternativa A Los Combustibles Fósiles*. <https://rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Rubio et al. (2012). *Obtención de ácidos grasos a partir de biomasa microalgal cultivada bajo diferentes condiciones de iluminación*. Univsersida de America.
- Salgarkar, R. (2025). *Edible Oils Market Growth Accelerates with Innovation and Sustainability Efforts*. https://www.globenewswire.com/news-release/2025/04/02/3054338/0/en/Edible-Oils-Market-Growth-Accelerates-with-Innovation-and-Sustainability-Efforts.html?utm_=&utm
- Seader et al. (2011). *Separation Process Principles*. Wiley.
- Smith et al. (2005). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. McGraw-Hill.
- Statista. (s. f). *Edible Oils - Guatemala*. https://www.statista.com/outlook/cmo/food/oils-fats/edible-oils/guatemala?utm_
- Tacias et al. (2016). *Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992016000300303&script=sci_arttext
- Tir et al. (2012). *Effect of the extraction solvent polarity on the sesame seeds oil composition*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ejlt.201200129>
- Vidal et al. (2017). *Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532017000200155&script=sci_arttext

- Yunus, R. (2011). *Extraction of Algae Oil from Nannochloropsis Oculata sp: A study of Soxhlet and Ultrasonic-Assisted Extraction*. <https://scialert.net/fulltext/fulltextpdf.php?pdf=ansinet/jas/2011/3607-3612.pdf>
- Zhao et al. (2024). *Physical Cell Disruption Technologies for Intracellular Compound Extraction from Microorganisms*. <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/10/2059?>

XII. Anexos

A. Datos de placa

Cuadro 14. Datos de placa de los equipos utilizados

Equipo	Especificaciones
VWR Horizontal Air Flow Oven Symphony 414004-564	Dimensiones externas: 21.1 x 24.4 x 28.8 Dimensiones internas: 14.6 x 13.3 x 16.4 Rango de temperatura: 70 – 250 °C Tiempo de calentamiento: 15 minutos Capacidad: 50L 120V 60Hz 900W
BALANZAS DE MOSTRADOR Y COMPACTAS VALOR™ 3000	Dimensiones: 146 x 158 mm Batería: 50 horas con células alcalinas Capacidad: 300 ± 0.1 g Peso neto: 1.4 kg Temperatura de operación: 0 – 40 °C Tiempo de estabilización: 0.5 segundos

(BaneBio, s. f.; OHAUS, s. f.)

En el cuadro anterior se presentan las especificaciones de cada uno de los equipos utilizados durante la elaboración de la parte experimental.

B. Datos originales

Cuadro 15. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de maceración 1

Ciclo	Tiempo (min)
1	7.24 ± 0.003
2	7.04 ± 0.003
3	7.1 ± 0.003
4	7.1 ± 0.003
5	7.14 ± 0.003
6	7.1 ± 0.003
7	7.14 ± 0.003
8	6.52 ± 0.003
9	6.52 ± 0.003
10	6.54 ± 0.003
11	6.52 ± 0.003
12	6.55 ± 0.003
13	6.46 ± 0.003
14	6.54 ± 0.003
15	6.56 ± 0.003
16	6.5 ± 0.003
17	6.52 ± 0.003
18	6.51 ± 0.003
19	6.5 ± 0.003
20	6.52 ± 0.003
21	6.54 ± 0.003
22	6.48 ± 0.003
23	6.52 ± 0.003
24	6.57 ± 0.003
25	6.57 ± 0.003
26	6.56 ± 0.003
27	6.55 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la primera extracción de aceite de microalgas con rompimiento de pared celular por maceración utilizando hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 16. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de maceración 2

Ciclo	Tiempo (min)
1	7.44 ± 0.003
2	7.45 ± 0.003
3	7.44 ± 0.003
4	7.42 ± 0.003
5	7.44 ± 0.003
6	7.42 ± 0.003
7	7.41 ± 0.003
8	7.42 ± 0.003
9	7.52 ± 0.003
10	7.49 ± 0.003
11	7.4 ± 0.003
12	7.45 ± 0.003
13	7.33 ± 0.003
14	7.31 ± 0.003
15	7.3 ± 0.003
16	7.33 ± 0.003
17	7.15 ± 0.003
18	6.4 ± 0.003
19	6.32 ± 0.003
20	6.31 ± 0.003
21	6.36 ± 0.003
22	6.47 ± 0.003
23	6.39 ± 0.003
24	6.28 ± 0.003
25	6.12 ± 0.003
26	6.14 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la segunda extracción de aceite de microalgas con rompimiento de pared celular por maceración utilizando hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 17. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de maceración 3

Ciclo	Tiempo (min)
1	7.22 ± 0.003
2	7.02 ± 0.003
3	7.09 ± 0.003
4	7.15 ± 0.003
5	7.04 ± 0.003
6	7.07 ± 0.003
7	6.45 ± 0.003
8	6.55 ± 0.003
9	6.5 ± 0.003
10	6.55 ± 0.003
11	7.11 ± 0.003
12	6.59 ± 0.003
13	7.01 ± 0.003
14	6.56 ± 0.003
15	7.04 ± 0.003
16	7.14 ± 0.003
17	7.11 ± 0.003
18	7.02 ± 0.003
19	6.58 ± 0.003
20	7.1 ± 0.003
21	7.1 ± 0.003
22	7.12 ± 0.003
23	6.54 ± 0.003
24	7.11 ± 0.003
25	7.2 ± 0.003
26	7.11 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la tercera extracción de aceite de microalgas con rompimiento de pared celular por maceración utilizando hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 18. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de choque térmico 1

Ciclo	Tiempo (min)
1	6.53 ± 0.003
2	6.41 ± 0.003
3	6.58 ± 0.003
4	7.00 ± 0.003
5	7.07 ± 0.003
6	7.11 ± 0.003
7	7.09 ± 0.003
8	7.15 ± 0.003
9	7.19 ± 0.003
10	7.25 ± 0.003
11	7.18 ± 0.003
12	7.16 ± 0.003
13	7.3 ± 0.003
14	7.25 ± 0.003
15	7.28 ± 0.003
16	7.28 ± 0.003
17	7.10 ± 0.003
18	7.14 ± 0.003
19	7.3 ± 0.003
20	7.01 ± 0.003
21	7.08 ± 0.003
22	7.15 ± 0.003
23	7.15 ± 0.003
24	7.08 ± 0.003
25	7.10 ± 0.003
26	7.4 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la primera extracción de aceite de microalgas con rompimiento de pared celular por choque térmico utilizando hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 19. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de choque térmico 2

Ciclo	Tiempo (min)
1	7.45 ± 0.003
2	7.2 ± 0.003
3	7.18 ± 0.003
4	7.14 ± 0.003
5	7.16 ± 0.003
6	7.22 ± 0.003
7	6.55 ± 0.003
8	7.22 ± 0.003
9	7.2 ± 0.003
10	7.13 ± 0.003
11	7.15 ± 0.003
12	7.04 ± 0.003
13	7.17 ± 0.003
14	7.18 ± 0.003
15	7.21 ± 0.003
16	7.18 ± 0.003
17	7.12 ± 0.003
18	7.1 ± 0.003
19	7.04 ± 0.003
20	7.15 ± 0.003
21	7.12 ± 0.003
22	7.3 ± 0.003
23	7.27 ± 0.003
24	7.34 ± 0.003
25	7.01 ± 0.003
26	8.32 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la segunda extracción de aceite de microalgas con rompimiento de pared celular por choque térmico utilizando hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 20. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de choque térmico 3

Ciclo	Tiempo (min)
1	8.1 ± 0.003
2	7.14 ± 0.003
3	6.59 ± 0.003
4	7.08 ± 0.003
5	7.45 ± 0.003
6	7.22 ± 0.003
7	7.17 ± 0.003
8	7.23 ± 0.003
9	7.3 ± 0.003
10	7.22 ± 0.003
11	7.3 ± 0.003
12	7.14 ± 0.003
13	7.18 ± 0.003
14	7.19 ± 0.003
15	7.13 ± 0.003
16	7.23 ± 0.003
17	7.01 ± 0.003
18	7.21 ± 0.003
19	7.14 ± 0.003
20	7.37 ± 0.003
21	7.33 ± 0.003
22	7.34 ± 0.003
23	7.28 ± 0.003
24	7.41 ± 0.003
25	7.31 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la tercera extracción de aceite de microalgas con rompimiento de pared celular por choque térmico utilizando hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 21. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de etanol 1

Ciclo	Tiempo (min)
1	9.23 ± 0.003
2	9.21 ± 0.003
3	9.26 ± 0.003
4	9.14 ± 0.003
5	9.24 ± 0.003
6	9.23 ± 0.003
7	9.26 ± 0.003
8	9.17 ± 0.003
9	8.39 ± 0.003
10	8.56 ± 0.003
11	8.46 ± 0.003
12	8.49 ± 0.003
13	8.42 ± 0.003
14	8.43 ± 0.003
15	8.23 ± 0.003
16	8.32 ± 0.003
17	8.50 ± 0.003
18	8.41 ± 0.003
19	8.32 ± 0.003
20	8.37 ± 0.003
21	8.21 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la primera extracción de aceite de microalgas con etanol como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 22. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de etanol 2

Ciclo	Tiempo (min)
1	7.28 ± 0.003
2	7.09 ± 0.003
3	6.33 ± 0.003
4	6.32 ± 0.003
5	6.47 ± 0.003
6	6.21 ± 0.003
7	6.31 ± 0.003
8	6.37 ± 0.003
9	6.32 ± 0.003
10	6.16 ± 0.003
11	6.12 ± 0.003
12	6.32 ± 0.003
13	7.14 ± 0.003
14	7.12 ± 0.003
15	6.51 ± 0.003
16	6.23 ± 0.003
17	6.33 ± 0.003
18	6.13 ± 0.003
19	6.27 ± 0.003
20	6.33 ± 0.003
21	6.31 ± 0.003
22	6.25 ± 0.003
23	6.32 ± 0.003
24	6.31 ± 0.003
25	6.31 ± 0.003
26	6.45 ± 0.003
27	6.31 ± 0.003
28	6.36 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la segunda extracción de aceite de microalgas con etanol como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 23. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de etanol 3

Ciclo	Tiempo (min)
1	9.45 ± 0.003
2	8.48 ± 0.003
3	7.41 ± 0.003
4	7.49 ± 0.003
5	7.33 ± 0.003
6	7.14 ± 0.003
7	7.24 ± 0.003
8	7.31 ± 0.003
9	7.14 ± 0.003
10	6.59 ± 0.003
11	6.57 ± 0.003
12	6.51 ± 0.003
13	6.42 ± 0.003
14	6.51 ± 0.003
15	6.56 ± 0.003
16	6.57 ± 0.003
17	6.51 ± 0.003
18	6.53 ± 0.003
19	6.57 ± 0.003
20	6.53 ± 0.003
21	6.51 ± 0.003
22	6.55 ± 0.003
23	6.51 ± 0.003
24	6.57 ± 0.003
25	6.58 ± 0.003
26	6.57 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la tercera extracción de aceite de microalgas con etanol como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 24. Ciclos realizados y duración para prueba de acetona 1

Ciclo	Tiempo (min)
1	5.47 ± 0.003
2	5.48 ± 0.003
3	5.44 ± 0.003
4	5.43 ± 0.003
5	5.45 ± 0.003
6	5.44 ± 0.003
7	5.49 ± 0.003
8	5.44 ± 0.003
9	5.45 ± 0.003
10	5.44 ± 0.003
11	5.45 ± 0.003
12	5.46 ± 0.003
13	5.42 ± 0.003
14	5.47 ± 0.003
15	5.48 ± 0.003
16	5.42 ± 0.003
17	5.42 ± 0.003
18	5.44 ± 0.003
19	5.46 ± 0.003
20	5.44 ± 0.003
21	5.47 ± 0.003
22	5.42 ± 0.003
23	5.46 ± 0.003
24	5.47 ± 0.003
25	5.45 ± 0.003
26	5.46 ± 0.003
27	5.47 ± 0.003
28	5.48 ± 0.003
29	5.51 ± 0.003
30	5.47 ± 0.003
31	5.49 ± 0.003
32	5.5 ± 0.003
33	5.48 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la primera extracción de aceite de microalgas con acetona como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 25. Ciclos realizados y duración para prueba de acetona 2

Ciclo	Tiempo (min)
1	5.39 ± 0.003
2	5.43 ± 0.003
3	5.48 ± 0.003
4	5.46 ± 0.003
5	5.5 ± 0.003
6	5.43 ± 0.003
7	5.48 ± 0.003
8	5.42 ± 0.003
9	5.47 ± 0.003
10	5.46 ± 0.003
11	5.39 ± 0.003
12	5.52 ± 0.003
13	5.45 ± 0.003
14	5.42 ± 0.003
15	5.44 ± 0.003
16	5.32 ± 0.003
17	5.48 ± 0.003
18	5.46 ± 0.003
19	5.39 ± 0.003
20	5.46 ± 0.003
21	5.55 ± 0.003
22	5.51 ± 0.003
23	5.5 ± 0.003
24	5.53 ± 0.003
25	5.48 ± 0.003
26	5.43 ± 0.003
27	5.46 ± 0.003
28	5.43 ± 0.003
29	5.42 ± 0.003
30	5.49 ± 0.003
31	5.47 ± 0.003
32	5.46 ± 0.003
33	5.56 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la segunda extracción de aceite de microalgas con acetona como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 26. Ciclos realizados y duración para prueba de acetona 3

Ciclo	Tiempo (min)
1	5.19 ± 0.003
2	5.22 ± 0.003
3	5.18 ± 0.003
4	4.44 ± 0.003
5	5.18 ± 0.003
6	4.37 ± 0.003
7	5.23 ± 0.003
8	4.49 ± 0.003
9	4.38 ± 0.003
10	4.3 ± 0.003
11	4.31 ± 0.003
12	4.34 ± 0.003
13	4.36 ± 0.003
14	4.33 ± 0.003
15	4.47 ± 0.003
16	4.37 ± 0.003
17	4.31 ± 0.003
18	4.29 ± 0.003
19	4.37 ± 0.003
20	4.35 ± 0.003
21	4.32 ± 0.003
22	4.36 ± 0.003
23	4.34 ± 0.003
24	4.38 ± 0.003
25	4.42 ± 0.003
26	4.26 ± 0.003
27	4.27 ± 0.003
28	4.14 ± 0.003
29	4.17 ± 0.003
30	4.27 ± 0.003
31	4.3 ± 0.003
32	4.12 ± 0.003
33	4.23 ± 0.003
34	4.21 ± 0.003
35	4.12 ± 0.003

36	4.16 ± 0.003
37	4.15 ± 0.003
38	4.2 ± 0.003
39	4.12 ± 0.003
40	4.15 ± 0.003
41	4.22 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la tercera extracción de aceite de microalgas con acetona como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 27. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de hexano 1

Ciclo	Tiempo (min)
1	8.41 ± 0.003
2	8.32 ± 0.003
3	8.47 ± 0.003
4	8.39 ± 0.003
5	8.22 ± 0.003
6	8.31 ± 0.003
7	10.35 ± 0.003
8	10.17 ± 0.003
9	10.32 ± 0.003
10	10.01 ± 0.003
11	10.34 ± 0.003
12	10.38 ± 0.003
13	10.42 ± 0.003
14	10.43 ± 0.003
15	9.14 ± 0.003
16	10.03 ± 0.003
17	10.39 ± 0.003
18	10.47 ± 0.003
19	10.49 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la primera extracción de aceite de microalgas con hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 28. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de hexano 2

Ciclo	Tiempo (min)
1	13.2 $\pm$ 0.003
2	8.37 $\pm$ 0.003
3	8.28 $\pm$ 0.003
4	8.39 $\pm$ 0.003
5	9.31 $\pm$ 0.003
6	9.24 $\pm$ 0.003
7	11.14 $\pm$ 0.003
8	8.31 $\pm$ 0.003
9	8.02 $\pm$ 0.003
10	8.24 $\pm$ 0.003
11	10.45 $\pm$ 0.003
12	9.52 $\pm$ 0.003
13	8.28 $\pm$ 0.003
14	8.22 $\pm$ 0.003
15	9.11 $\pm$ 0.003
16	9.07 $\pm$ 0.003
17	8.21 $\pm$ 0.003
18	8.25 $\pm$ 0.003
19	8.15 $\pm$ 0.003
20	8.56 $\pm$ 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la segunda extracción de aceite de microalgas con hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 29. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de hexano 3

Ciclo	Tiempo (min)
1	12.36 ± 0.003
2	10.12 ± 0.003
3	10.02 ± 0.003
4	10.56 ± 0.003
5	12.51 ± 0.003
6	12.3 ± 0.003
7	12.02 ± 0.003
8	10.53 ± 0.003
9	11.5 ± 0.003
10	11.53 ± 0.003
11	11.44 ± 0.003
12	10.22 ± 0.003
13	11.46 ± 0.003
14	10.35 ± 0.003
15	12.17 ± 0.003
16	11.37 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la tercera extracción de aceite de microalgas con hexano como solvente, también se presenta la duración de cada uno de los ciclos en minutos.

Cuadro 30. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de 2 horas

Ciclo	Tiempo (min)
1	9.54 ± 0.003
2	9.51 ± 0.003
3	9.53 ± 0.003
4	9.55 ± 0.003
5	9.56 ± 0.003
6	9.19 ± 0.003
7	9.57 ± 0.003
8	9.03 ± 0.003
9	9.26 ± 0.003
10	8.25 ± 0.003
11	9.32 ± 0.003
12	10.21 ± 0.003

En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la extracción de aceite de microalgas utilizando hexano como solvente en un periodo de 2 horas, también se muestra la duración de los ciclos en minutos.

Cuadro 31. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de 4 horas

Ciclo	Tiempo (min)
1	6.49 ± 0.003
2	6.32 ± 0.003
3	10.35 ± 0.003
4	10.41 ± 0.003
5	10.36 ± 0.003
6	10.51 ± 0.003
7	10.03 ± 0.003
8	10.55 ± 0.003
9	10.03 ± 0.003
10	10.12 ± 0.003
11	10.48 ± 0.003
12	10.28 ± 0.003
13	10.37 ± 0.003
14	10.44 ± 0.003
15	11.31 ± 0.003
16	11.17 ± 0.003
17	11.58 ± 0.003
18	11.52 ± 0.003
19	12.44 ± 0.003
20	11.24 ± 0.003
21	11.38 ± 0.003
22	12.53 ± 0.003
23	11.15 ± 0.003

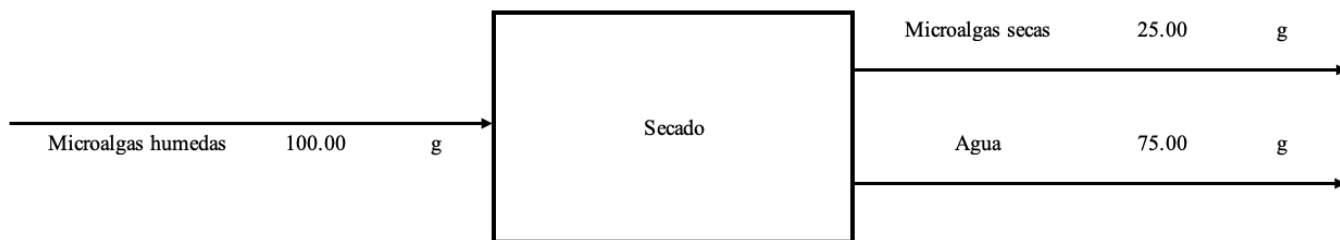
En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la extracción de aceite de microalgas utilizando hexano como solvente en un periodo de 4 horas, también se muestra la duración de los ciclos en minutos.

Cuadro 32. Ciclos realizados y duración de la extracción de aceite de microalgas para prueba de 5 horas

Ciclo	Tiempo (min)
1	12.51 $\pm$ 0.003
2	13.53 $\pm$ 0.003
3	11.53 $\pm$ 0.003
4	12.46 $\pm$ 0.003
5	12.5 $\pm$ 0.003
6	12.36 $\pm$ 0.003
7	11.58 $\pm$ 0.003
8	13.44 $\pm$ 0.003
9	10.14 $\pm$ 0.003
10	12.06 $\pm$ 0.003
11	10.24 $\pm$ 0.003
12	10.04 $\pm$ 0.003
13	13.48 $\pm$ 0.003
14	13.28 $\pm$ 0.003
15	13.47 $\pm$ 0.003
16	13.3 $\pm$ 0.003
17	11.22 $\pm$ 0.003
18	13.16 $\pm$ 0.003
19	14.41 $\pm$ 0.003
20	12.24 $\pm$ 0.003
21	12.07 $\pm$ 0.003
22	11.38 $\pm$ 0.003
23	12.21 $\pm$ 0.003
24	12.33 $\pm$ 0.003
25	11.57 $\pm$ 0.003

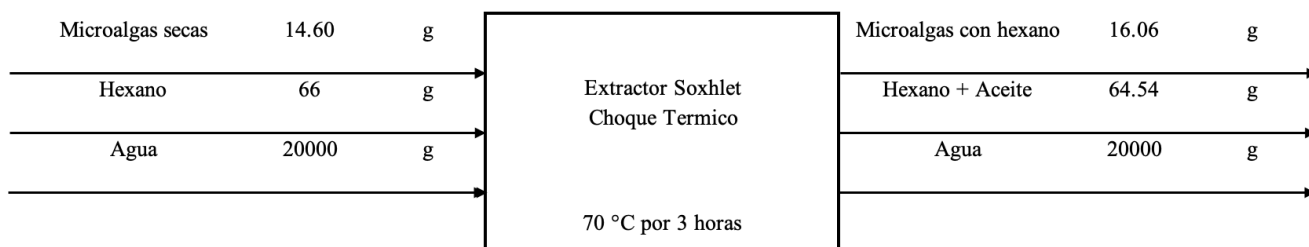
En el cuadro anterior se muestra la cantidad de ciclos realizados para la extracción de aceite de microalgas utilizando hexano como solvente en un periodo de 5 horas, también se muestra la duración de los ciclos en minutos.

Figura 6. Balance de masa secado de microalgas



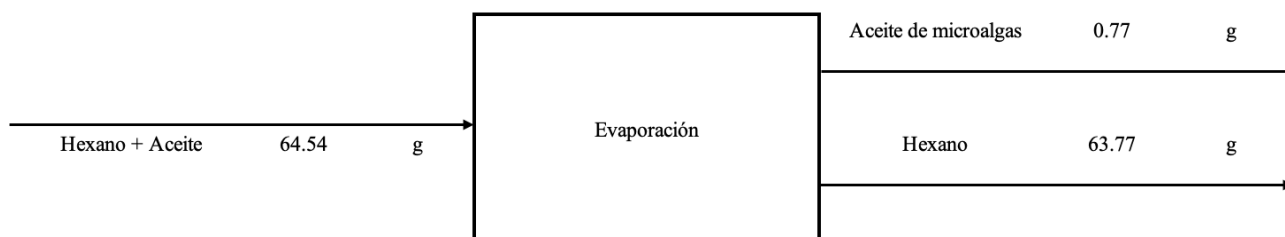
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de secado de las microalgas, este proceso permite obtener una biomasa con menor contenido de humedad, adecuada para las etapas posteriores de ruptura celular y extracción de aceite.

Figura 7. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con ruptura por choque térmico



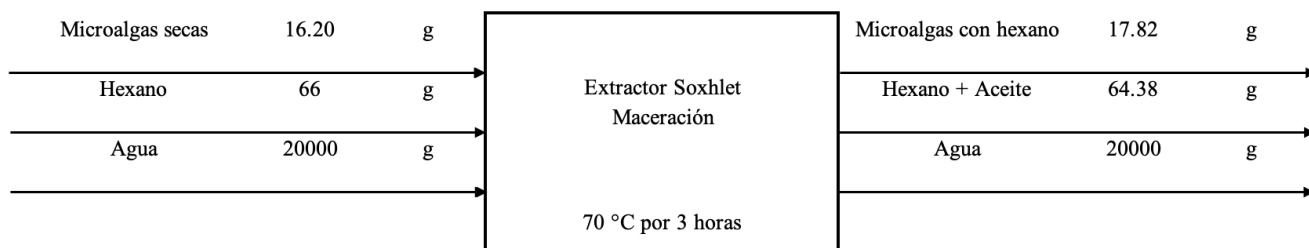
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 70°C por 3 horas, la pared celular fue previamente rota por medio de un proceso de choque térmico.

Figura 8. Balance de masa evaporación con ruptura por choque térmico



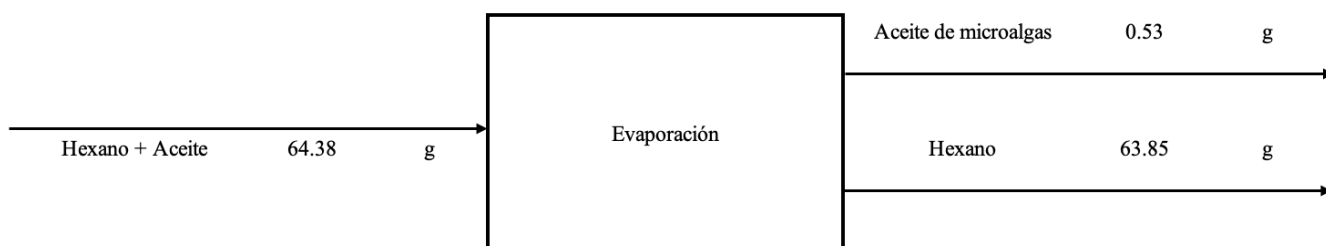
En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del solvente para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 9. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con ruptura por maceración



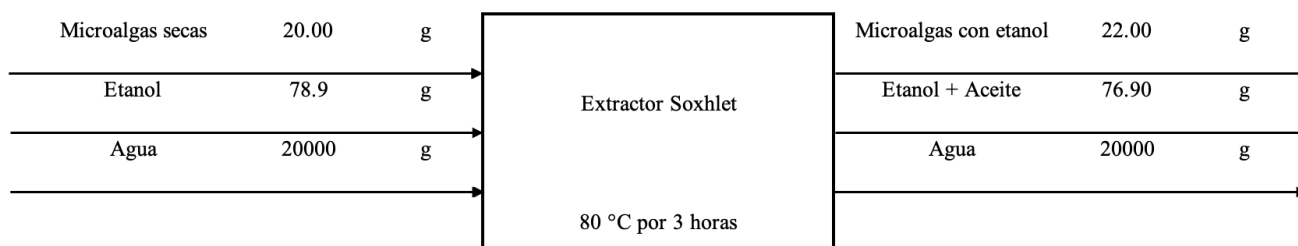
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 70°C por 3 horas, la pared celular fue previamente rota por medio de un proceso de maceración.

Figura 10. Balance de masa evaporación con ruptura por maceración



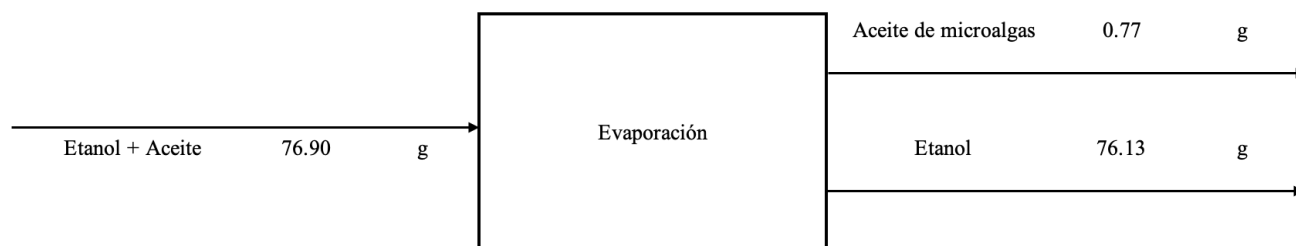
En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del solvente para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 11. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con etanol



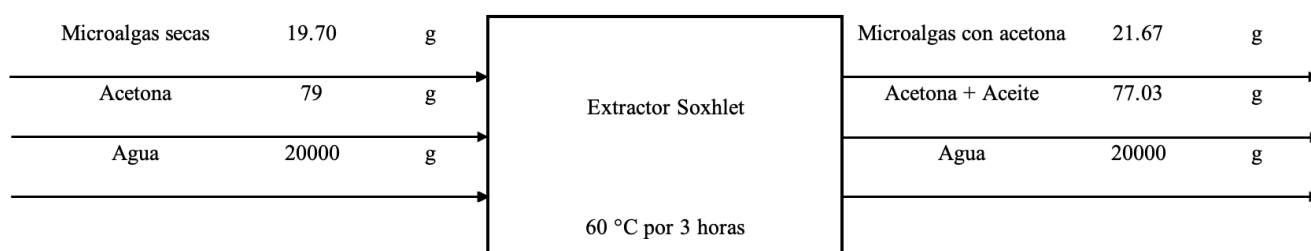
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 80°C por 3 horas, el solvente utilizado fue etanol.

Figura 12. Balance de masa evaporación etanol



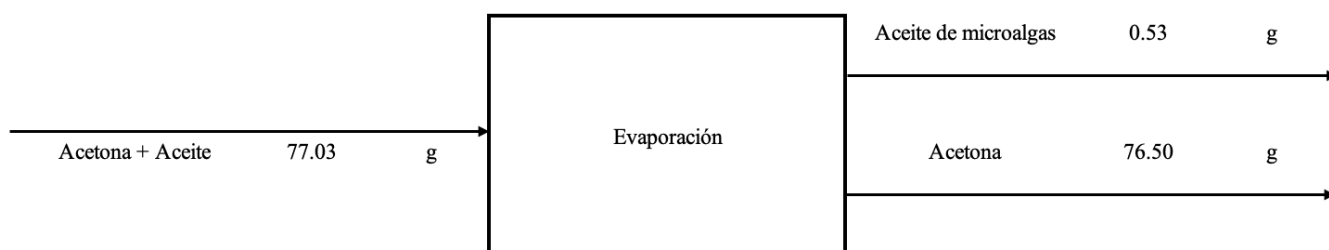
En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del etanol para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 13. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con acetona



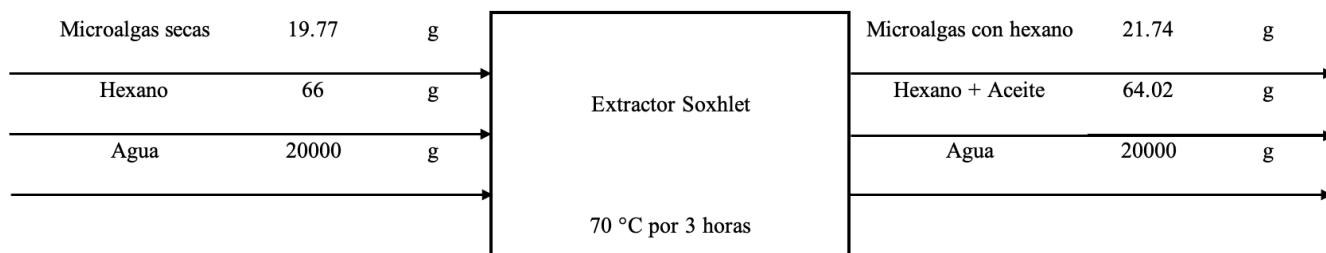
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 60°C por 3 horas, el solvente utilizado fue acetona.

Figura 14. Balance de masa evaporación acetona



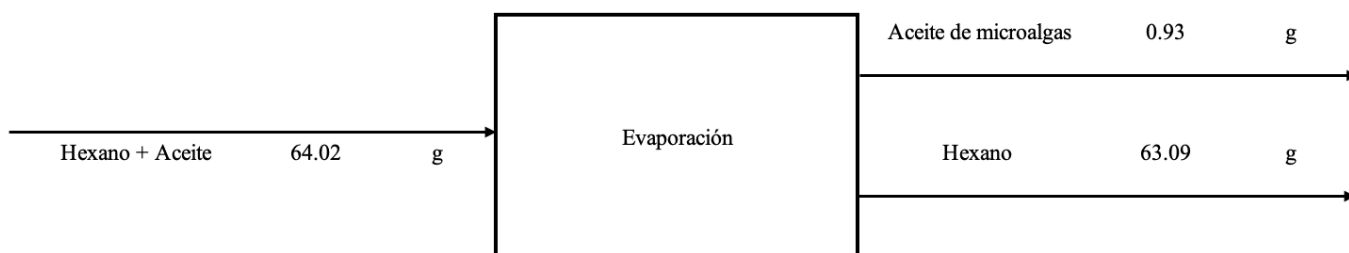
En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del acetona para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 15. Balance de masa extracción de aceite de microalgas con hexano



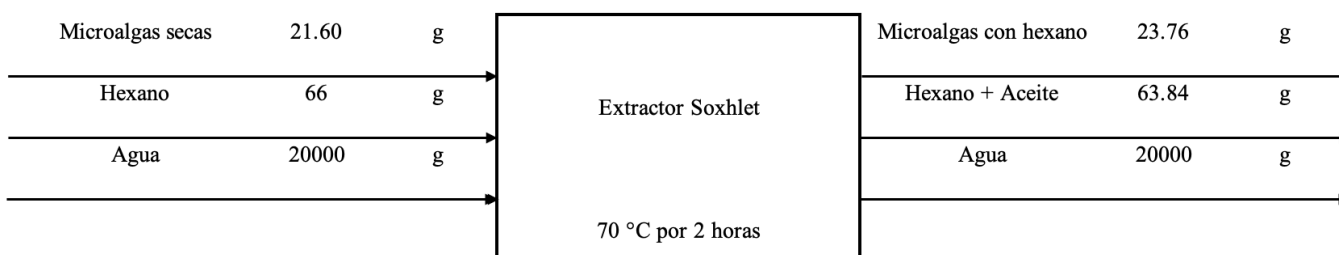
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 70°C por 3 horas, el solvente utilizado fue hexano.

Figura 16. Balance de masa evaporación hexano



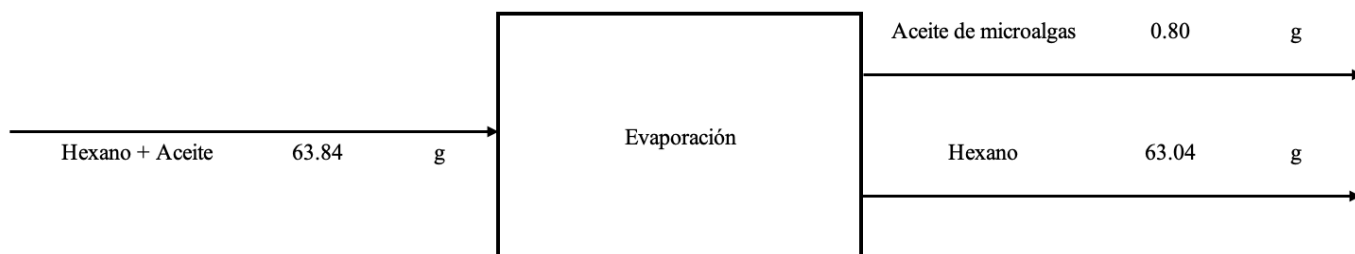
En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del hexano para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 17. Balance de masa extracción de aceite de microalgas durante 2 horas



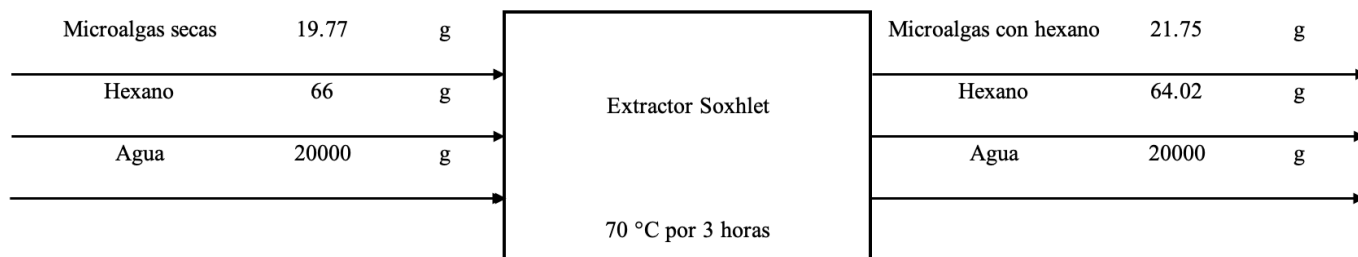
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 70°C por 2 horas, el solvente utilizado fue hexano.

Figura 18. Balance de masa evaporación 2 horas



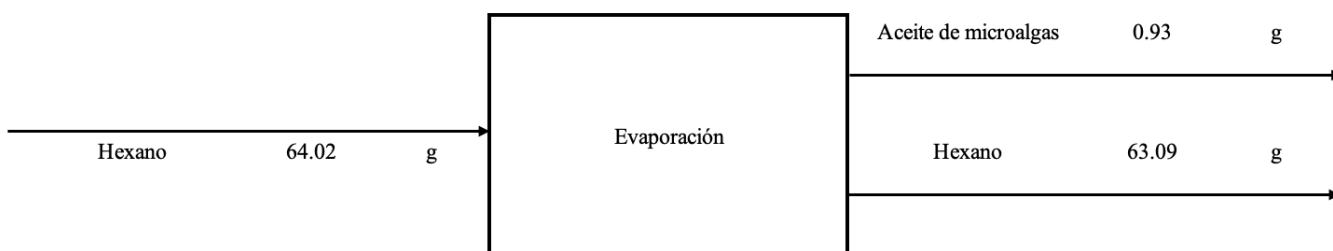
En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del hexano para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 19. Balance de masa extracción de aceite de microalgas durante 3 horas



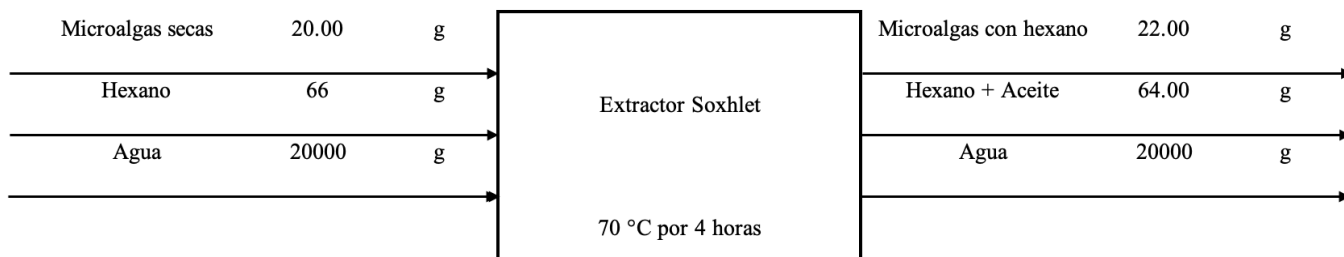
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 70°C por 3 horas, el solvente utilizado fue hexano.

Figura 20. Balance de masa evaporación 3 horas



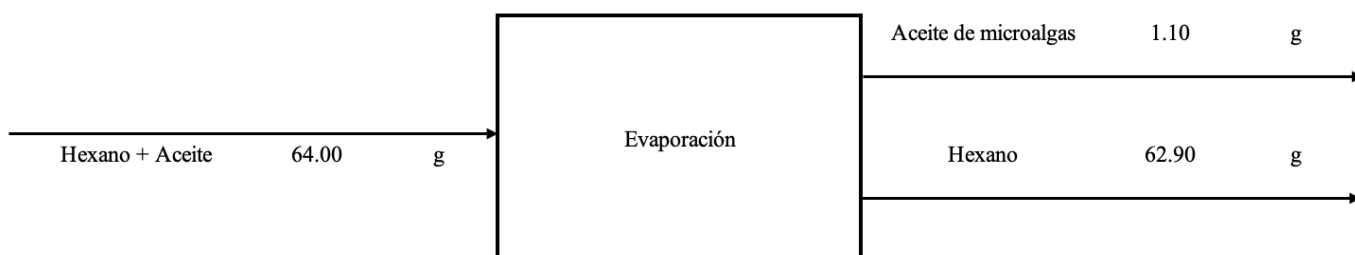
En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del hexano para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 21. Balance de masa extracción de aceite de microalgas durante 4 horas



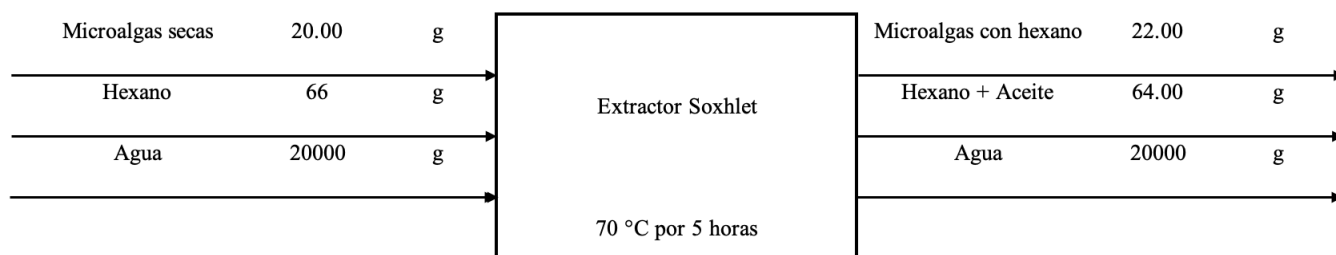
En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 70°C por 4 horas, el solvente utilizado fue hexano.

Figura 22. Balance de masa evaporación 4 horas



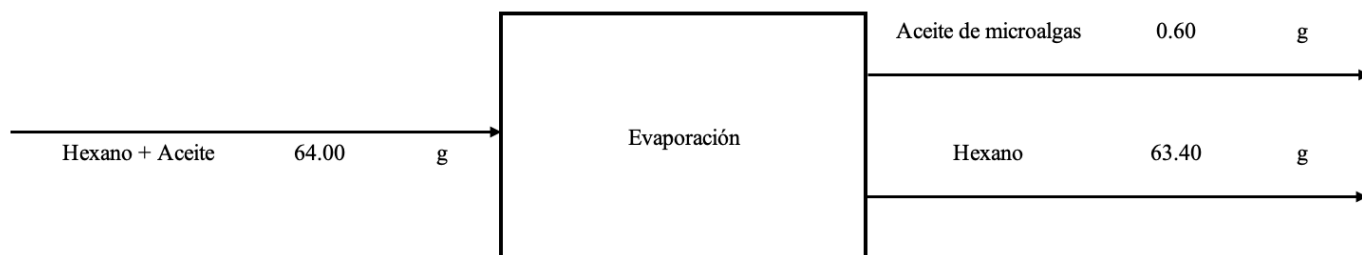
En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del hexano para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 23. Balance de masa extracción de aceite de microalgas durante 5 horas



En la figura anterior se presenta el balance de masa para el proceso de extracción de aceite de microalgas con un extractor de Soxhlet, se trabajó a una temperatura de 70°C por 5 horas, el solvente utilizado fue hexano.

Figura 24. Balance de masa evaporación 5 horas



En la figura anterior se presenta el balance de masa del proceso de evaporación del hexano para la recuperación del aceite de microalgas, este se realizó en un baño maría para mantener un mayor control sobre la temperatura.

Figura 25. Extracción de microalgas



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se puede observar la obtención de la materia prima de la piscina de microalgas del tipo *Nannochloropsis oculata* en el laboratorio de operaciones unitarias, haciendo uso de un colador y un Beaker para eliminar la mayor cantidad de agua.

Figura 26. Extracción de microalgas y remoción de contaminantes



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se pueden observar las microalgas atrapadas por el colador en el laboratorio de operaciones unitarias, se utilizaron guantes para remover contaminantes como insectos, hojas y ramas.

Figura 27. Pesaje de algas húmedas



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se presenta el pesaje de las microalgas húmedas previo al proceso de secado en el horno de laboratorio.

Figura 28. Algas previo al secado



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se presenta las microalgas en una bandeja de aluminio para eliminar su humedad en el horno de laboratorio, se muestra una capa delgada y uniforme para garantizar el mismo tiempo de secado de toda la materia prima.

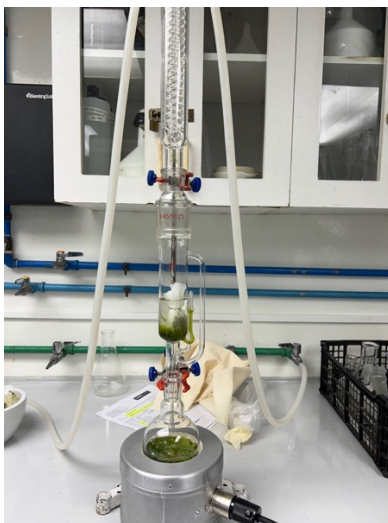
Figura 29. Muestra de algas secas



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se muestra el pesaje de las microalgas secas y trituradas en un papel filtro para el proceso de extracción en el equipo de Soxhlet.

Figura 30. Sistema de extracción



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se presenta el sistema de Soxhlet armado sin recirculación de agua, la muestra de microalgas se encuentra en un papel filtro para evitar que se atoren dentro del extractor.

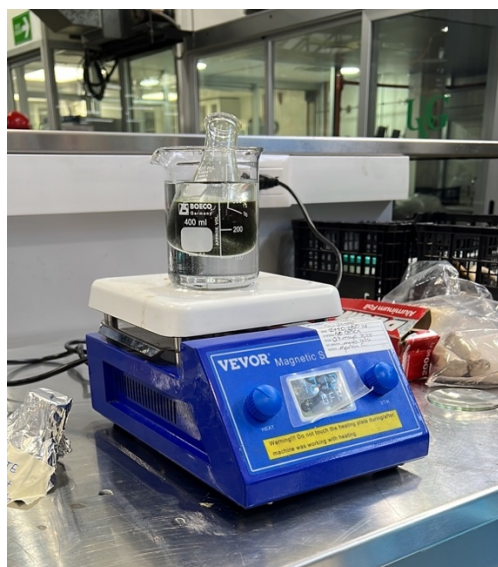
Figura 31. Sistema armado con recirculación de agua



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se presenta el sistema de Soxhlet armado con recirculación de agua haciendo uso de una bomba de retorno.

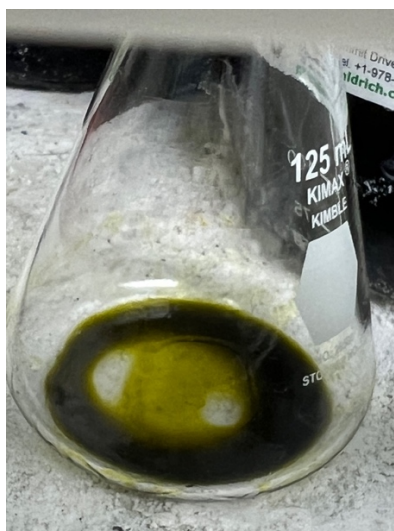
Figura 32. Evaporación de etanol



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se muestra el proceso de evaporación de etanol para la recuperación del aceite, el hexano y acetona se evaporaron dentro de la campana de laboratorio.

Figura 33. Muestra de aceite después de evaporar



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se presenta el aceite obtenido luego de la evaporación del solvente, dicha evaporación se realizó en un Erlenmeyer y posteriormente se almaceno en un recipiente de 3 mL

Figura 34. Muestra de aceite extraído



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se presenta el aceite extraído en una de las pruebas realizadas, este se almacena en un recipiente de 3 mL y se cubrió con papel aluminio.

Figura 35. Pesaje de aceite extraído



Fuente propia en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

En la figura anterior se presente el pesaje de la muestra de aceite en el recipiente de vidrio.

Cuadro 33. Parámetros de solubilidad de Hansen para solventes y lípidos

Compuesto	δ_D	δ_P	δ_H
Etanol	14.9	0.0	0.0
Acetona	15.5	10.4	7.0
Hexano	15.8	8.8	19.4
Ácido Oleico	14.3	3.1	5.5

En el cuadro anterior se presentan los parámetros de solubilidad de Hansen (δ_D , δ_P , δ_H) correspondientes a los solventes empleados en la extracción de aceite y al ácido oleico, considerado como compuesto modelo de los lípidos presentes en las microalgas. Estos parámetros describen las contribuciones de dispersión, polaridad y enlace por hidrógeno, respectivamente, y permiten evaluar la afinidad entre solventes y soluto.

C. Cálculos de muestra

Ecuación 4. Rendimiento de extracción

$$Rendimiento = \frac{masa\ final}{masa\ inicial} * 100$$

En la ecuación anterior se muestra la expresión utilizada para determinar el rendimiento de extracción del aceite obtenido a partir de la biomasa seca de microalgas, expresada como porcentaje.

Cálculo 1. Rendimiento de la extracción de aceite de microalgas

$$Rendimiento = \frac{0.9\ g}{20\ g} * 100 = 4.50\%$$

En el cálculo anterior se ejemplifica la aplicación de la ecuación 4, considerando una masa final de aceite de 0.9 g obtenida a partir de 20 g de biomasa seca. Este cálculo se realizó de la misma forma para cada uno de los rendimientos

Ecuación 5. Distancia Hansen

$$R_a = \sqrt{4(\delta_{d,s} - \delta_{d,o})^2 + (\delta_{p,s} - \delta_{p,o})^2 + (\delta_{h,s} - \delta_{h,o})^2}$$

La ecuación anterior muestra la expresión utilizada para calcular la distancia de solubilidad de Hansen (R_a) entre un solvente y un soluto. Este parámetro permite cuantificar la afinidad entre ambas sustancias en función de sus componentes de dispersión (δ_D), polaridad (δ_p) e interacciones de enlace por hidrógeno (δ_H). Cuanto menor sea el valor de R_a , mayor será la compatibilidad o afinidad del solvente con el soluto.

Cálculo 2. Distancia a partir de los parámetros de solubilidad de Hansen

Hexano

$$\delta_D = 14.9$$

$$\delta_p = 0.0$$

$$\delta_H = 0.0$$

Ácido Oleico

$$\delta_D = 14.3$$

$$\delta_p = 3.1$$

$$\delta_H = 5.5$$

(Hansen, 2007)

$$R_a = \sqrt{4(14.9 - 14.3)^2 + (0.0 - 3.1)^2 + (0.0 - 5.5)^2}$$

$$R_a = 6.43$$

En el cálculo anterior se ejemplifica la aplicación de la ecuación 5, utilizando los parámetros de solubilidad reportados por Hansen (2007) para el hexano y el ácido oleico, considerado como compuesto modelo de los lípidos presentes en las microalgas. Este cálculo se realizó de la misma forma para cada uno de los solventes utilizados.

Ecuación 6. Ecuación base de extracción

$$Y_{(ext)}(t) = Y_{max}(1 - e^{-kt})$$

La ecuación anterior describe la etapa inicial de extracción, en la cual el rendimiento aumenta de forma asintótica hasta un valor máximo, k representa la rapidez del proceso de extracción asociado a la transferencia de masa desde la biomasa hacia el solvente.

Ecuación 7. Crecimiento exponencial en la etapa de extracción

$$Y(t) = Y_{ext}(t) * e^{-k_d T_{eff}}$$

La ecuación anterior combina el crecimiento del rendimiento con una pérdida exponencial dependiente del tiempo efectivo. El parámetro k_d cuantifica la intensidad del fenómeno de pérdida.

D. Datos calculados

Cuadro 34. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando maceración como método de ruptura de pared celular

Número de prueba	Masa inicial algas (g)	Solvente utilizado (mL)	Tiempo (h)	Ciclos realizados	Masa de aceite (g)	Rendimiento (%)
1	14.7 0.1	100 ± 0.5	3	27	0.7 ± 0.1	4.76
2	16.2 ± 0.1	100 ± 0.5	3	26	0.4 ± 0.1	2.47
3	17.7 ± 0.1	100 ± 0.5	3	26	0.5 ± 0.1	2.82

En el cuadro anterior se presentan los datos experimentales obtenidos durante la extracción de aceite mediante el método de maceración. Esta información permitió calcular el rendimiento correspondiente para cada réplica y analizar la eficiencia del proceso bajo condiciones controladas de operación.

Cuadro 35. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando choque térmico como método de ruptura de pared celular

Número de prueba	Masa inicial algas (g)	Solvente utilizado (mL)	Tiempo (h)	Ciclos realizados	Masa de aceite (g)	Rendimiento (%)
1	14.1 ± 0.1	100 ± 0.5	3	26	0.6 ± 0.1	4.26
2	15.2 ± 0.1	100 ± 0.5	3	26	0.9 ± 0.1	5.92
3	14.5 ± 0.1	100 ± 0.5	3	25	0.8 ± 0.1	5.52

En el cuadro anterior se muestran los datos experimentales registrados para el método de ruptura celular por choque térmico, aplicados al proceso de extracción de aceite de microalgas. Esta información es empleada posteriormente para el cálculo de los rendimientos de extracción.

Cuadro 36. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando etanol como solvente

Número de prueba	Masa inicial algas (g)	Solvente utilizado (mL)	Tiempo (h)	Ciclos realizados	Masa de aceite (g)	Rendimiento (%)
1	20 ± 0.1	100 ± 0.5	3	21	0.9 ± 0.1	4.5
2	20 ± 0.1	100 ± 0.5	3	28	0.6 ± 0.1	3.0
3	20 ± 0.1	100 ± 0.5	3	26	0.8 ± 0.1	4.0

En el cuadro anterior se muestran los datos experimentales registrados para la extracción de aceite de microalgas utilizando etanol como solvente. Esta información es empleada posteriormente para el cálculo de los rendimientos de extracción.

Cuadro 37. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando acetona como solvente

Número de prueba	Masa inicial algas (g)	Solvente utilizado (mL)	Tiempo (h)	Ciclos realizados	Masa de aceite (g)	Rendimiento (%)
1	19.1 ± 0.1	100 ± 0.5	3	33	0.7 ± 0.1	3.66
2	20 ± 0.1	100 ± 0.5	3	33	0.5 ± 0.1	2.50
3	20 ± 0.1	100 ± 0.5	3	41	0.4 ± 0.1	2.00

En el cuadro anterior se muestran los datos experimentales registrados para la extracción de aceite de microalgas utilizando acetona como solvente. Esta información es empleada posteriormente para el cálculo de los rendimientos de extracción.

Cuadro 38. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando hexano como solvente

Número de prueba	Masa inicial algas (g)	Solvente utilizado (mL)	Tiempo (h)	Ciclos realizados	Masa de aceite (g)	Rendimiento (%)
1	20 ± 0.1	100 ± 0.5	3	19	0.9 ± 0.1	4.50
2	19.3 ± 0.1	100 ± 0.5	3	20	1.1 ± 0.1	5.70
3	20 ± 0.1	100 ± 0.5	3	16	0.8 ± 0.1	4.00

En el cuadro anterior se muestran los datos experimentales registrados para la extracción de aceite de microalgas utilizando hexano como solvente. Esta información es empleada posteriormente para el cálculo de los rendimientos de extracción.

Cuadro 39. Datos experimentales y calculados de la extracción de aceite de microalgas utilizando diferentes tiempos

Número de prueba	Masa inicial algas (g)	Solvente utilizado (mL)	Tiempo (h)	Ciclos realizados	Masa de aceite (g)	Rendimiento (%)
1	21.6 ± 0.1	100 ± 0.5	2	12	0.8 ± 0.1	3.70
2	19.77 ± 0.1	100 ± 0.5	3	18	0.93 ± 0.1	4.72
3	20 ± 0.1	100 ± 0.5	4	23	1.1 ± 0.1	5.50
4	20 ± 0.1	100 ± 0.5	5	25	0.6 ± 0.1	3.00

En el cuadro anterior se muestran los datos experimentales registrados para la extracción de aceite de microalgas en diferente tiempos utilizando hexano como solvente. Esta información es empleada posteriormente para el cálculo de los rendimientos de extracción.

Cuadro 40. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la ruptura de pared celular por maceración

Número	Rendimiento promedio	$(x_i - \bar{X})^2$	a_i	$a_i x_i$
1	2.47	0.78	0.7071	1.75
2	2.82	0.27	0	0
3	4.76	1.99	-0.7071	-3.37
Total		3.04		-1.62

En el cuadro anterior se muestran los resultados originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a los rendimientos de extracción de aceite mediante el método de ruptura de pared celular de maceración. A partir de esto se puede calcular el valor de W crítico y determinar si los resultados presentan una distribución normal.

Cuadro 41. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la ruptura de pared celular por choque térmico

Número	Rendimiento promedio	$(x_i - \bar{X})^2$	a_i	$a_i x_i$
1	4.25	0.95	0.7071	3.00
2	5.51	0.082	0	0
3	5.92	0.48	-0.7071	-4.18
Total		1.51		-1.18

En el cuadro anterior se muestran los resultados originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a los rendimientos de extracción de aceite mediante el método de ruptura de pared celular de choque térmico. A partir de esto se puede calcular el valor de W crítico y determinar si los resultados presentan una distribución normal.

Cuadro 42. Datos originales del análisis de varianza para el rendimiento de extracción de aceite por diferentes métodos de ruptura de pared celular

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5.2973	1	5.2973	4.6516	0.0972	7.7086
Dentro de los grupos	4.5552	4	1.1388			
Total	9.8525	5				

En el cuadro anterior presenta los resultados originales del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los rendimientos de extracción de aceite obtenidos mediante distintos métodos de ruptura de pared celular. Estos permitieron determinar la existencia o no de diferencias significativas entre los tratamientos considerados.

Cuadro 43. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk utilizando etanol como solvente para la extracción de aceite de microalgas

Número	Rendimiento promedio	$(x_i - \bar{X})^2$	a_i	$a_i x_i$
1	3	0.69	0.7071	2.12
2	4	0.028	0	0
3	4.50	0.44	-0.7071	-3.18
Total		1.16		-1.06

En el cuadro anterior se muestran los resultados originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a los rendimientos de extracción de aceite de microalgas utilizando etanol como solvente. A partir de esto se puede calcular el valor de W crítico y determinar si los resultados presentan una distribución normal.

Cuadro 44. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk utilizando acetona como solvente para la extracción de aceite de microalgas

Número	Rendimiento promedio	$(x_i - \bar{X})^2$	a_i	$a_i x_i$
1	2	0.52	0.7071	1.41
2	2.5	0.048	0	0
3	3.66	0.88	-0.7071	-2.59
Total		1.45		-1.17

En el cuadro anterior se muestran los resultados originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a los rendimientos de extracción de aceite de microalgas utilizando acetona como solvente. A partir de esto se puede calcular el valor de W crítico y determinar si los resultados presentan una distribución normal.

Cuadro 45. Datos originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk utilizando hexano como solvente para la extracción de aceite de microalgas

Número	Rendimiento promedio	$(x_i - \bar{X})^2$	a_i	$a_i x_i$
1	3.99	0.54	0.7071	2.82
2	4.5	0.051	0	0
3	5.69	0.93	-0.7071	-4.023
Total		1.52		-1.20

En el cuadro anterior se muestran los resultados originales de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a los rendimientos de extracción de aceite de microalgas utilizando hexano como solvente. A partir de esto se puede calcular el valor de W crítico y determinar si los resultados presentan una distribución normal.

Cuadro 46. Datos originales del análisis de varianza para el rendimiento de extracción de aceite con diferentes solventes

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6.0917	2	3.0458	4.4015	0.0665	5.1432
Dentro de los grupos	4.1520	6	0.6920			
Total	10.243	8				

El cuadro anterior muestra los datos obtenidos del análisis de varianza correspondiente a la comparación de rendimientos de extracción utilizando distintos solventes. Esta información es utilizada para evaluar la influencia del tipo de solvente sobre la eficiencia de extracción del aceite de microalgas.

Cuadro 47. Parámetros cinéticos del modelo ajustado

Parámetro	Valor	Interpretación
Y_{max}	0.072	Rendimiento máximo teórico
k	0.356	Constante cinética de extracción
k_d	0.672	Constante de pérdida
t^*	4	Inicio de pérdida significativa

En el cuadro anterior se presentan los parámetros corresponden al conjunto de valores que proporcionó el mejor ajuste del modelo cinético a los datos experimentales. Estos permiten describir tanto la etapa de extracción como la posterior disminución del rendimiento observada a tiempos prolongados.

E. Análisis de error

Ecuación 8. Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N}$$

La ecuación anterior representa la fórmula empleada para calcular la media aritmética de un conjunto de datos experimentales.

Cálculo 3. Promedio del rendimiento de extracción de aceite de microalgas

$$\bar{x} = \frac{4.50 + 5.70 + 4.00}{3} = 4.73$$

En el cálculo anterior se determina el rendimiento promedio de la extracción de aceite de microalgas utilizando hexano como solvente, se basa en la ecuación 6 y se utilizan los datos originales de la extracción. Este cálculo se realizó de la misma forma para cada una de las pruebas realizadas.

Ecuación 9. Desviación estándar

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

La ecuación anterior muestra la expresión empleada para calcular la desviación estándar de un conjunto de datos experimentales. Este parámetro estadístico permite cuantificar el grado de dispersión o variabilidad de los valores individuales respecto a la media aritmética.

Cálculo 4. Desviación estándar de extracción de aceite de microalgas

$$S = \sqrt{\frac{(4.50 - 4.73)^2 + (5.70 - 4.73)^2 + (4.00 - 4.73)^2}{2}} = 0.87$$

En el cálculo anterior se muestra la aplicación de la ecuación 7 para determinar el rendimiento promedio de extracción de aceite obtenido en tres réplicas experimentales. Este cálculo se realizó de la misma forma para cada una de las pruebas realizadas.

Ecuación 10. Intervalo de confianza

$$\bar{x} \pm Z_{0.95} + \frac{S}{\sqrt{n}}$$

La ecuación anterior expresa el cálculo del intervalo de confianza para la media aritmética de los rendimientos de extracción. Este parámetro permite estimar el rango dentro del cual se encuentra el valor real del rendimiento promedio con un nivel de confianza del 95 %.

Cálculo 5. Intervalo de confianza de extracción de aceite de microalgas

$$I.C = 4.73 \pm 12.7 * \frac{0.87}{\sqrt{3}} = [0, 11.1]$$

En el cálculo anterior se aplica la ecuación 8 para determinar el intervalo de confianza a partir de los datos obtenidos en el cálculo 3 y cálculo 4. Este cálculo se realizó de la misma forma para cada una de las pruebas realizadas.

Ecuación 11. Propagación de error

$$\Delta z = z * \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2}$$

La ecuación anterior representa la expresión utilizada para estimar la incertidumbre asociada a una magnitud calculada a partir de una o más variables medidas experimentalmente. Este método permite cuantificar cómo los errores individuales de las mediciones afectan el resultado final del parámetro calculado, proporcionando una medida del nivel de precisión del experimento.

Cálculo 6. Propagación de error del rendimiento de extracción de aceite de microalgas

$$\delta = 4.50 * \sqrt{\left(\frac{0.1}{0.9}\right)^2} = 0.50$$

En el cálculo anterior se aplica la ecuación de propagación de error al rendimiento de extracción de aceite, este cálculo se realizó de la misma forma para cada una de las pruebas realizadas.

F. Hojas de seguridad

Figura 36. Hoja de seguridad del n-Hexano

www.sigmaaldrich.com

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Versión 8.15
Fecha de revisión 09/06/2024
Fecha de impresión 09/10/2024

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto : n-Hexano para analisis EMSURE® ACS,Reag. Ph Eur

Referencia : 1.04374
Artículo número : 104374
Marca : Millipore
No. Indice : 601-037-00-0
No. CAS : 110-54-3

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Análisis químico, Producción química
Usos desaconsejados : El producto se suministra bajo la exención de I + D de la TSCA (40 CFR Sección 720.36). Es responsabilidad del destinatario cumplir con los requisitos de la exención de investigación y desarrollo. El producto no se puede utilizar para un propósito comercial no exento según la TSCA a menos que el consentimiento apropiado es otorgado por escrito por MilliporeSigma.

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Merck, S.A de C.V
Calle 5 No. 7 C.P.
53370 NAUCALPAN DE JUÁREZ, EDO. DE MÉXICO.
MEXICO

Teléfono : +52 (55)-2122-1600
Fax : +52 (55)-2122-1703

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia : 800-00-214-00 (SETIQ)
800-681-9531 (CHEMTREC)
(55) 55-59-15-88

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación SGA de acuerdo con 29 CFR 1910 (OSHA HCS).

Líquidos inflamables (Categoría 2), H225
Iritación cutáneas (Categoría 2), H315
Toxicidad para la reproducción (Categoría 2), H361
Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (Categoría 3), Sistema nervioso central, H336
Toxicidad específica en determinados órganos - exposiciones repetidas, Inhalación (Categoría 2), Sistema nervioso, H373
Peligro de aspiración (Categoría 1), H304
Peligro a corto plazo (agudo) para el medio ambiente acuático (Categoría 2), H401
Peligro a largo plazo (crónico) para el medio ambiente acuático (Categoría 2), H411

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

2.2 Elementos de las etiquetas del SGA, incluidos los consejos de prudencia

Pictograma



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H225	Líquido y vapores muy inflamables.
H304	Puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias.
H315	Provoca irritación cutánea.
H336	Puede provocar somnolencia o vértigo.
H361	Se sospecha que puede perjudicar la fertilidad o dañar el feto.
H373	Puede provocar daños en los órganos (Sistema nervioso) tras exposiciones prolongadas o repetidas si se inhala.
H411	Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Consejos de prudencia

P201	Solicitar instrucciones especiales antes del uso.
P202	No manipular la sustancia antes de haber leído y comprendido todas las instrucciones de seguridad.
P210	Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. No fumar.
P233	Mantener el recipiente herméticamente cerrado.
P240	Conectar a tierra/enlace equipotencial del recipiente y del equipo de recepción.
P241	Utilizar material eléctrico/ de ventilación/ iluminación/ antideflagrante.
P242	Utilizar únicamente herramientas que no produzcan chispas.
P243	Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.
P260	No respirar la niebla o los vapores.
P264	Lavar la piel concienzudamente tras la manipulación.
P271	Utilizar únicamente en exteriores o en un lugar bien ventilado.

P273	Evitar su liberación al medio ambiente.
P280	Llevar guantes/ ropa de protección/ equipo de protección para los ojos/ la cara.
P301 + P310	EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/ médico.
P303 + P361 + P353	EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ ducharse.
P304 + P340 + P312	EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. Llamar a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/ médico si la persona se encuentra mal.
P308 + P313	EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Consultar a un médico.
P331	NO provocar el vómito.
P332 + P313	En caso de irritación cutánea: Consultar a un médico.
P362	Quitarse las prendas contaminadas y lavarlas antes de volver a usarlas.
P370 + P378	En caso de incendio: Utilizar arena seca, producto químico seco o espuma resistente al alcohol para la extinción.
P391	Recoger el vertido.
P403 + P233	Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener el recipiente cerrado herméticamente.
P403 + P235	Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener en lugar fresco.
P405	Guardar bajo llave.
P501	Eliminar el contenido/ el recipiente en una planta de eliminación de residuos autorizada.

2.3 Peligros no clasificados de otra manera - ninguno(a)

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancias

Formula	: C ₆ H ₁₄
Peso molecular	: 86.18 g/mol
No. CAS	: 110-54-3
No. CE	: 203-777-6
No. Índice	: 601-037-00-0

Componente	Clasificación	Concentración
n-Hexano	Flam. Liq. 2; Skin Irrit. 2; Repr. 2; STOT SE 3; STOT RE 1; Asp. Tox. 1; Aquatic Acute 2; Aquatic Chronic 2; H225, H315, H361, H336, H372, H304, H401, H411 Límites de concentración: >= 5 %: STOT RE 2,	<= 100 %

	H373; >= 20 %: STOT SE 3, H336;	
--	---------------------------------	--

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

SECCIÓN 4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

Recomendaciones generales

Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

Si es inhalado

Tras inhalación: aire fresco. Llamar al médico.

En caso de contacto con la piel

En caso de contacto con la piel: Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ ducharse. Consultar a un médico.

En caso de contacto con los ojos

Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua. Consultar al oftalmólogo. Retirar las lentillas.

Por ingestión

Tras ingestión: cuidado con los vómitos. ¡Peligro de aspiración! Mantener libres las vías respiratorias. Posible obstrucción pulmonar tras aspiración del vómito. Llame inmediatamente al médico.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta (ver sección 2.2) y / o en la sección 11

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Sin datos disponibles

SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción

Medios de extinción apropiados

Dióxido de carbono (CO₂) Espuma Polvo seco

Medios de extinción no apropiados

No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Óxidos de carbono

Inflamable.

Prestar atención al retorno de la llama.

Los vapores son más pesados que el aire y pueden expandirse a lo largo del suelo.

En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos.

Son posibles mezclas explosivas con el aire a temperaturas normales.

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Permanencia en el área de riesgo sólo con sistemas de respiración artificiales e independientes del ambiente. Protección de la piel mediante observación de una distancia de seguridad y uso de ropa protectora adecuada .

5.4 Otros datos

Separar el recipiente de la zona de peligro y refrigerarlo con agua. Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.

SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Indicaciones para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia: No respirar los vapores, aerosoles. Evitar el contacto con la sustancia. Asegúrese una ventilación apropiada. Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición. Evacúe el área de peligro, respete los procedimientos de emergencia, consulte con expertos. Equipo de protección individual, ver sección 8.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. Riesgo de explosión.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

Cubra las alcantarillas. Recoja, una y aspire los derrames. Observe posibles restricciones de materiales (véanse indicaciones en las secciones 7 o 10). Recoger cuidadosamente con agentes absorbentes de líquidos, p.ej. Chemizorb®. Añadir a residuos a tratar. Aclarar.

6.4 Referencia a otras secciones

Para eliminación de desechos ver sección 13.

SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura

Consejos para una manipulación segura

Trabajar bajo campana extractora. No inhalar la sustancia/la mezcla. Evítese la generación de vapores/aerosoles.

Indicaciones para la protección contra incendio y explosión

Mantener apartado de las llamas abiertas, de las superficies calientes y de los focos de ignición. Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.

Medidas de higiene

Sustituir inmediatamente la ropa contaminada. Protección preventiva de la piel. Lavar cara y manos al término del trabajo.

Ver precauciones en la sección 2.2

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Condiciones de almacenamiento

Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado.
Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición.

Temperatura de almacenaje recomendada indicada en la etiqueta del producto.

Clase de almacenamiento

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 3: Líquidos inflamables

7.3 Usos específicos finales

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual

8.1 Parámetros de control

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

Componente	No. CAS	Valor	Parámetros de control	Base
n-Hexano	110-54-3	TWA	50 ppm	Valores límite (TLV) de la ACGIH, USA
	Observaciones	Riesgo de absorción cutánea		
		TWA	50 ppm 180 mg/m ³	Límites de exposición recomendados de NIOSH, EE.UU.
		TWA	500 ppm 1,800 mg/m ³	Límites de Exposición Ocupacional (OSHA), EE.UU - Tabla Z-1 Límites para los contaminantes del aire
		PEL	50 ppm 180 mg/m ³	California: Límites de exposición permisibles para contaminantes químicos Title 8, Article 107)
		Piel		

Límites biológicos de exposición profesional

Componente	No. CAS	Parámetros	Valor	Muestras biológicas	Base
n-Hexano	110-54-3	2,5-Hexanodiona	0.5 mg/l	Orina	ACGIH - Índices Biológicos de Exposición (BEI)
	Observaciones	Al final del turno			

8.2 Controles de la exposición

Controles técnicos apropiados

Sustituir inmediatamente la ropa contaminada. Protección preventiva de la piel. Lavar cara y manos al término del trabajo.

Protección personal

Protección de los ojos/ la cara

Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE).
Gafas de seguridad

Protección de la piel

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Sumerción

Material: Caucho nitrilo

espesura mínima de capa: 0.4 mm

Tiempo de penetración: 480 min

Material probado: Camatril® (KCL 730 / Aldrich Z677442, Talla M)

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Salpicaduras

Material: Caucho nitrilo

espesura mínima de capa: 0.11 mm

Tiempo de penetración: 10 min

Material probado: KCL 741 Dermatril® L

Protección Corporal

Vestimenta protectora antiestática retardante de la flama.

Protección respiratoria

Tipo de Filtro recomendado: Filtro A

El empresario debe garantizar que el mantenimiento, la limpieza y la prueba técnica de los protectores respiratorios se hagan según las instrucciones del productor de las mismas. Estas medidas deben ser documentadas debidamente.

necesaria en presencia de vapores/aerosoles. Nuestras recomendaciones sobre protección respiratoria se basan en las normas siguientes: DIN EN 143, DIN 14387 y otras normas relativas al uso de la protección respiratoria usada.

Control de exposición ambiental

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. Riesgo de explosión.

SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas

9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

- | | |
|--------------------|-----------------------------------|
| a) Aspecto | Forma: líquido
Color: incoloro |
| b) Olor | similar a un hidrocarburo |
| c) Umbral olfativo | Sin datos disponibles |

d) pH	7.0
e) Punto de fusión/ punto de congelación	Punto de fusión: -95.35 °C (-139.63 °F) a 1,013 hPa
f) Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	69 °C 156 °F a 1,013 hPa
g) Punto de inflamación	-22 °C (-8 °F) - copa cerrada - c.c.
h) Tasa de evaporación	15.8
i) Inflamabilidad (sólido, gas)	Sin datos disponibles
j) Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos	Límite superior de explosividad: 8.1 %(v) Límites inferior de explosividad: 1.0 %(v)
k) Presión de vapor	175.98 hPa a 20.0 °C (68.0 °F)
l) Densidad de vapor	Sin datos disponibles
m) Densidad	0.66 gcm3 a 25 °C (77 °F)
Densidad relativa	Sin datos disponibles
n) Solubilidad en agua	0.01 g/l a 25 °C (77 °F) - ligeramente soluble
o) Coeficiente de reparto n- octanol/agua	log Pow: aprox.4 a 20 °C (68 °F) - (Literatura), Bioacumulación potencial
p) Temperatura de auto-inflamación	225 °C (437 °F) a 1,013 hPa
q) Temperatura de descomposición	Sin datos disponibles
r) Viscosidad	Sin datos disponibles
s) Propiedades explosivas	No clasificado/a como explosivo/a.
t) Propiedades comburentes	ningún

9.2 Otra información de seguridad

Sin datos disponibles

(Merck, n-Hexano SDS, 2024)

Figura 37. Hoja de seguridad del etanol

www.sigmaaldrich.com

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Versión 8.12
Fecha de revisión 09/08/2024
Fecha de impresión 09/12/2024

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto : Etanol secado (max. 0.01 % H2O)

Referencia : 1.00990
Artículo número : 100990
Marca : Millipore
No. Índice : 603-002-00-5
No. CAS : 64-17-5

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Análisis químico, Producción química
Usos desaconsejados : El producto se suministra bajo la exención de I + D de la TSCA (40 CFR Sección 720.36). Es responsabilidad del destinatario cumplir con los requisitos de la exención de investigación y desarrollo. El producto no se puede utilizar para un propósito comercial no exento según la TSCA a menos que el consentimiento apropiado es otorgado por escrito por MilliporeSigma.

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Merck, S.A de C.V
Calle 5 No. 7 C.P.
53370 NAUCALPAN DE JUÁREZ, EDO. DE MÉXICO.
MEXICO

Teléfono : +52 (55)-2122-1600
Fax : +52 (55)-2122-1703

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia : 800-00-214-00 (SETIQ)
800-681-9531 (CHEMTREC)
(55) 55-59-15-88

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación SGA de acuerdo con 29 CFR 1910 (OSHA HCS).

Líquidos inflamables (Categoría 2), H225
Irritación ocular (Categoría 2A), H319

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

2.2 Elementos de las etiquetas del SGA, incluidos los consejos de prudencia

Pictograma



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H225

Líquido y vapores muy inflamables.

H319

Provoca irritación ocular grave.

Consejos de prudencia

P210

Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. No fumar.

P233

Mantener el recipiente herméticamente cerrado.

P240

Conectar a tierra/enlace equipotencial del recipiente y del equipo de recepción.

P241

Utilizar material eléctrico/ de ventilación/ iluminación/ antideflagrante.

P242

Utilizar únicamente herramientas que no produzcan chispas.

P243

Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.

P264

Lavar la piel concienzudamente tras la manipulación.

P280

Llevar guantes/equipo de protección para los ojos/ la cara.

P303 + P361 + P353

EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ ducharse.

P305 + P351 + P338

EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado.

P337 + P313

Si persiste la irritación ocular: Consultar a un médico.

P370 + P378

En caso de incendio: Utilizar arena seca, producto químico seco o espuma resistente al alcohol para la extinción.

P403 + P235

Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener en lugar fresco.

P501

Eliminar el contenido/ el recipiente en una planta de eliminación de residuos autorizada.

2.3 Peligros no clasificados de otra manera - ninguno(a)

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancias

Formula : C₂H₆O
 Peso molecular : 46.07 g/mol
 No. CAS : 64-17-5
 No. CE : 200-578-6
 No. Índice : 603-002-00-5

Componente	Clasificación	Concentración
------------	---------------	---------------

Etanol		
	Flam. Liq. 2; Eye Irrit. 2A; H225, H319 Límites de concentración: >= 50 %: Eye Irrit. 2A, H319;	<= 100 %

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

SECCIÓN 4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

Recomendaciones generales

Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

Si es inhalado

Tras inhalación: aire fresco.

En caso de contacto con la piel

En caso de contacto con la piel: Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ ducharse.

En caso de contacto con los ojos

Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua. Consultar al oftalmólogo. Retirar las lentillas.

Por ingestión

Tras ingestión: hacer beber agua inmediatamente (máximo 2 vasos). Consultar a un médico.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta (ver sección 2.2) y / o en la sección 11

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Sin datos disponibles

SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción

Medios de extinción no apropiados

No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Óxidos de carbono

Inflamable.

Prestar atención al retorno de la llama.

Los vapores son más pesados que el aire y pueden expandirse a lo largo del suelo.

En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos. Son posibles mezclas explosivas con el aire a temperaturas normales.

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

En caso de fuego, protéjase con un equipo respiratorio autónomo.

5.4 Otros datos

Separar el recipiente de la zona de peligro y refrigerarlo con agua. Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.

SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Indicaciones para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia: No respirar los vapores, aerosoles. Evitar el contacto con la sustancia. Asegúrese una ventilación apropiada. Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición. Evacúe el área de peligro, respete los procedimientos de emergencia, consulte con expertos. Equipo de protección individual, ver sección 8.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. Riesgo de explosión.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

Cubra las alcantarillas. Recoja, una y aspire los derrames. Observe posibles restricciones de materiales (véanse indicaciones en las secciones 7 o 10). Recoger con materiales absorbentes, p. ej. con Chemisorb®. Proceder a la eliminación de los residuos. Aclarar.

6.4 Referencia a otras secciones

Para eliminación de desechos ver sección 13.

SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura

Indicaciones para la protección contra incendio y explosión

Mantener apartado de las llamas abiertas, de las superficies calientes y de los focos de ignición. Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.

Medidas de higiene

Sustituir la ropa contaminada. Lavar manos al término del trabajo. Ver precauciones en la sección 2.2

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Condiciones de almacenamiento

Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición.

Temperatura de almacenaje recomendada indicada en la etiqueta del producto.

Clase de almacenamiento

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 3: Líquidos inflamables

7.3 Usos específicos finales

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual

8.1 Parámetros de control

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

Componente	No. CAS	Valor	Parámetros de control	Base
Etolol	64-17-5	TWA	1,000 ppm 1,900 mg/m ³	Límites de Exposición Ocupacional (OSHA),EE.UU - Tabla Z-1 Límites para los contaminantes del aire
		STEL	1,000 ppm	Valores límite (TLV) de la ACGIH,USA
	Observaciones	Cancerígenos en los animales		
		TWA	1,000 ppm 1,900 mg/m ³	Límites de exposición recomendados de NIOSH, EE.UU.
		PEL	1,000 ppm 1,900 mg/m ³	California: Límites de exposición permisibles para contaminantes químicos Title 8, Article 107)

8.2 Controles de la exposición

Controles técnicos apropiados

Sustituir la ropa contaminada. Lavar manos al término del trabajo.

Protección personal

Protección de los ojos/ la cara

Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE).
Gafas de seguridad

Protección de la piel

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Sumerción

Material: goma butílica

espesura minima de capa: 0.7 mm

Tiempo de penetración: 480 min

Material probado:Butoject® (KCL 898)

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar

en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Salpicaduras

Material: Caucho nitrilo

espesura minima de capa: 0.4 mm

Tiempo de penetración: 120 min

Material probado: Camatril® (KCL 730 / Aldrich Z677442, Talla M)

precisa

Protección Corporal

Vestimenta protectora antiestática retardante de la flama.

Protección respiratoria

Tipo de Filtro recomendado: Filtro A

El empresario debe garantizar que el mantenimiento, la limpieza y la prueba técnica de los protectores respiratorios se hagan según las instrucciones del productor de las mismas. Estas medidas deben ser documentadas debidamente.

Tipo de Filtro recomendado: Filtro tipo ABEK

El empresario debe garantizar que el mantenimiento, la limpieza y la prueba técnica de los protectores respiratorios se hagan según las instrucciones del productor de las mismas. Estas medidas deben ser documentadas debidamente.

necesaria en presencia de vapores/aerosoles. Nuestras recomendaciones sobre protección respiratoria se basan en las normas siguientes: DIN EN 143, DIN 14387 y otras normas relativas al uso de la protección respiratoria usada.

necesaria en presencia de vapores/aerosoles.

Nuestras recomendaciones sobre protección respiratoria se basan en las normas siguientes: DIN EN 143, DIN 14387 y otras normas relativas al uso de la protección respiratoria usada.

Control de exposición ambiental

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. Riesgo de explosión.

SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas

9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

- | | |
|--|---|
| a) Aspecto | Forma: líquido
Color: incoloro |
| b) Olor | alcohólico |
| c) Umbral olfativo | 0.1 ppm |
| d) pH | 7.0 a 10 g/l a 20 °C (68 °F) |
| e) Punto de fusión/
punto de congelación | Punto de fusión/ punto de congelación: -114.0 °C (-173.2 °F) a 1,013.25 hPa |
| f) Punto inicial de
ebullición e intervalo
de ebullición | 78.29 °C 172.92 °F a 1,013 hPa |
| g) Punto de inflamación | 13 °C (55 °F) - copa cerrada - copa cerrada |

h)	Tasa de evaporación	Sin datos disponibles
i)	Inflamabilidad (sólido, gas)	Sin datos disponibles
j)	Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos	Límite superior de explosividad: 27.7 %(v) Límites inferior de explosividad: 3.1 %(v)
k)	Presión de vapor	57.26 hPa a 19.6 °C (67.3 °F)
l)	Densidad de vapor	1.6
m)	Densidad	0.79 gcm ³ a 20 °C (68 °F)
	Densidad relativa	Sin datos disponibles
n)	Solubilidad en agua	1,000 g/l a 20 °C (68 °F) - totalmente miscible
o)	Coefficiente de reparto n- octanol/agua	log Pow: -0.35 a 24 °C (75 °F) - No es de esperar una bioacumulación.
p)	Temperatura de auto-inflamación	363 - 425 °C (685 - 797 °F) a 1,013 hPa
q)	Temperatura de descomposición	Destilable sin descomposición a presión normal.
r)	Viscosidad	Sin datos disponibles
s)	Propiedades explosivas	No clasificado/a como explosivo/a.
t)	Propiedades comburentes	ningún

9.2 Otra información de seguridad

Conductibilidad	< 1 µS/cm
Tensión superficial	22.31 mN/m a 20 °C (68 °F) - similar al agua
Densidad relativa del vapor	1.6

(Merck, Etanol SDS, 2024)

Figura 38. Hoja de seguridad de acetona



www.sigmaaldrich.com

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Versión 8.14
Fecha de revisión 09/08/2024
Fecha de impresión 09/11/2024

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto

: Acetona para analisis EMSURE®
ACS,ISO,Reag. Ph Eur

Referencia

: 1.00014

Artículo número

: 100014

Marca

: Millipore

No. Índice

: 606-001-00-8

No. CAS

: 67-64-1

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados

: Análisis químico, Producción química

Usos desaconsejados

: El producto se suministra bajo la exención de I + D de la TSCA (40 CFR Sección 720.36). Es responsabilidad del destinatario cumplir con los requisitos de la exención de investigación y desarrollo. El producto no se puede utilizar para un propósito comercial no exento según la TSCA a menos que el consentimiento apropiado es otorgado por escrito por MilliporeSigma.

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía

: Merck, S.A de C.V
Calle 5 No. 7 C.P.
53370 NAUCALPAN DE JUÁREZ, EDO. DE MÉXICO.
MEXICO

Teléfono

: +52 (55)-2122-1600

Fax

: +52 (55)-2122-1703

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia

: 800-00-214-00 (SETIQ)
800-681-9531 (CHEMTREC)
(55) 55-59-15-88

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación SGA de acuerdo con 29 CFR 1910 (OSHA HCS).

Líquidos inflamables (Categoría 2), H225

Irritación ocular (Categoría 2A), H319

Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (Categoría 3), Sistema nervioso central, H336

Para el texto íntegro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

2.2 Elementos de las etiquetas del SGA, incluidos los consejos de prudencia

Pictograma



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H225

Líquido y vapores muy inflamables.

H319

Provoca irritación ocular grave.

H336

Puede provocar somnolencia o vértigo.

Consejos de prudencia

P210

Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. No fumar.

P233

Mantener el recipiente herméticamente cerrado.

P240

Conectar a tierra/enlace equipotencial del recipiente y del equipo de recepción.

P241

Utilizar material eléctrico/ de ventilación/ iluminación/ antideflagrante.

P242

Utilizar únicamente herramientas que no produzcan chispas.

P243

Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.

P261

Evitar respirar la niebla o los vapores.

P264

Lavarse la piel concienzudamente tras la manipulación.

P271

Utilizar únicamente en exteriores o en un lugar bien ventilado.

P280

Llevar guantes/equipo de protección para los ojos/ la cara.

P303 + P361 + P353

EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ ducharse.

P304 + P340 + P312

EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. Llamar a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/ médico si la persona se encuentra mal.

P305 + P351 + P338

EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado.

P337 + P313

Si persiste la irritación ocular: Consultar a un médico.

P370 + P378

En caso de incendio: Utilizar arena seca, producto químico seco o espuma resistente al alcohol para la extinción.

P403 + P233

Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener el recipiente

P403 + P235	cerrado herméticamente.
P405	Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener en lugar fresco.
P501	Guardar bajo llave. Eliminar el contenido/ el recipiente en una planta de eliminación de residuos autorizada.

2.3 Peligros no clasificados de otra manera

La exposición repetida puede provocar sequedad o formación de grietas en la piel.

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancias

Formula	: C ₃ H ₆ O
Peso molecular	: 58.08 g/mol
No. CAS	: 67-64-1
No. CE	: 200-662-2
No. Índice	: 606-001-00-8

Componente	Clasificación	Concentración
Acetona	Flam. Liq. 2; Eye Irrit. 2A; STOT SE 3; H225, H319, H336 Límites de concentración: >= 20 %: STOT SE 3, H336;	<= 100 %

Para el texto íntegro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

SECCIÓN 4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

Recomendaciones generales

Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

Si es inhalado

Tras inhalación: aire fresco. Llamar al médico.

En caso de contacto con la piel

En caso de contacto con la piel: Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ ducharse.

En caso de contacto con los ojos

Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua. Consultar al oftalmólogo. Retirar las lentillas.

Por ingestión

Tras ingestión: hacer beber agua inmediatamente (máximo 2 vasos). Consultar a un médico.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta (ver sección 2.2) y / o en la sección 11

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Sin datos disponibles

SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción

Medios de extinción apropiados

Dióxido de carbono (CO₂) Espuma Polvo seco

Medios de extinción no apropiados

No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Óxidos de carbono

Inflamable.

Prestar atención al retorno de la llama.

Los vapores son más pesados que el aire y pueden expandirse a lo largo del suelo.

En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos.

Son posibles mezclas explosivas con el aire a temperaturas normales.

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

En caso de fuego, protéjase con un equipo respiratorio autónomo.

5.4 Otros datos

Separar el recipiente de la zona de peligro y refrigerarlo con agua. Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.

SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Indicaciones para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia: No respirar los vapores, aerosoles. Evitar el contacto con la sustancia. Asegúrese una ventilación apropiada. Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición. Evacúe el área de peligro, respete los procedimientos de emergencia, consulte con expertos. Equipo de protección individual, ver sección 8.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. Riesgo de explosión.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

Cubra las alcantarillas. Recoja, una y aspire los derrames. Observe posibles restricciones de materiales (véanse indicaciones en las secciones 7 o 10). Recoger con materiales absorbentes, p. ej. con Chemizorb®. Proceder a la eliminación de los residuos. Aclarar.

6.4 Referencia a otras secciones

Para eliminación de desechos ver sección 13.

SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura

Consejos para una manipulación segura

Trabajar bajo campana extractora. No inhalar la sustancia/la mezcla. Evítese la generación de vapores/aerosoles.

Indicaciones para la protección contra incendio y explosión

Mantener apartado de las llamas abiertas, de las superficies calientes y de los focos de ignición. Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.

Medidas de higiene

Sustituir la ropa contaminada. Es recomendable una protección preventiva de la piel. Lavar las manos al término del trabajo.

Ver precauciones en la sección 2.2

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Condiciones de almacenamiento

Protejido de la luz. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición.

Temperatura de almacenaje recomendada indicada en la etiqueta del producto.

Clase de almacenamiento

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 3: Líquidos inflamables

7.3 Usos específicos finales

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual

8.1 Parámetros de control

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

Componente	No. CAS	Valor	Parámetros de control	Base
Acetona	67-64-1	TWA	250 ppm	Valores límite (TLV) de la ACGIH, USA
	Observaciones	No clasificados como cancerígenos en humanos		
		STEL	500 ppm	Valores límite (TLV) de la ACGIH, USA
		No clasificados como cancerígenos en humanos		

		TWA	250 ppm 590 mg/m ³	Límites de exposición recomendados de NIOSH, EE.UU.
		TWA	1,000 ppm 2,400 mg/m ³	Límites de Exposición Ocupacional (OSHA), EE.UU - Tabla Z-1 Límites para los contaminantes del aire
		C	3,000 ppm	California: Límites de exposición permisibles para contaminantes químicos Title 8, Article 107)
		PEL	500 ppm 1,200 mg/m ³	California: Límites de exposición permisibles para contaminantes químicos Title 8, Article 107)
		STEL	750 ppm 1,780 mg/m ³	California: Límites de exposición permisibles para contaminantes químicos Title 8, Article 107)

Límites biológicos de exposición profesional

Componente	No. CAS	Parámetros	Valor	Muestras biológicas	Base
Acetona	67-64-1	Acetona	25 mg/l	Orina	ACGIH - Índices Biológicos de Exposición (BEI)
	Observaciones	Al final del turno (Tan pronto como sea posible después de que cese la exposición)			

8.2 Controles de la exposición

Controles técnicos apropiados

Sustituir la ropa contaminada. Es recomendable una protección preventiva de la piel.
Lavar las manos al término del trabajo.

Protección personal

Protección de los ojos/ la cara

Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE).
Gafas de seguridad

Protección de la piel

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Sumerción

Material: goma butílica

espesura mínima de capa: 0.7 mm

Tiempo de penetración: 480 min

Material probado: Butoject® (KCL 898)

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN 16523-1, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Salpicaduras

Material: Guantes de látex

espesura mínima de capa: 0.6 mm

Tiempo de penetración: 10 min

Material probado: Lapren® (KCL 706 / Aldrich Z677558, Talla M)

Protección Corporal

Vestimenta protectora antiestática retardante de la flama.

Protección respiratoria

Tipo de Filtro recomendado: Filtro tipo AX

El empresario debe garantizar que el mantenimiento, la limpieza y la prueba técnica de los protectores respiratorios se hagan según las instrucciones del productor de las mismas. Estas medidas deben ser documentadas debidamente.

necesaria en presencia de vapores/aerosoles.

Nuestras recomendaciones sobre protección respiratoria se basan en las normas siguientes: DIN EN 143, DIN 14387 y otras normas relativas al uso de la protección respiratoria usada.

Control de exposición ambiental

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. Riesgo de explosión.

SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas

9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

- | | |
|--|--|
| a) Aspecto | Forma: líquido
Color: incoloro |
| b) Olor | acre, debilmente aromático |
| c) Umbral olfativo | 0.1 ppm |
| d) pH | 5 - 6 a 395 g/l a 20 °C (68 °F) |
| e) Punto de fusión/
punto de congelación | Punto/ intervalo de fusión: -94.0 °C (-137.2 °F) |
| f) Punto inicial de
ebullición e intervalo
de ebullición | 56.0 °C 132.8 °F a 1,013 hPa |
| g) Punto de inflamación | -17.0 °C (1.4 °F) - copa cerrada |
| h) Tasa de evaporación | Sin datos disponibles |
| i) Inflamabilidad
(sólido, gas) | Sin datos disponibles |
| j) Inflamabilidad
superior/inferior o | Límite superior de explosividad: 13 %(v)
Límites inferior de explosividad: 2 %(v) |

límites explosivos

k)	Presión de vapor	245.3 hPa a 20.0 °C (68.0 °F)
l)	Densidad de vapor	Sin datos disponibles
m)	Densidad	0.79 gcm ³ a 20 °C (68 °F)
	Densidad relativa	Sin datos disponibles
n)	Solubilidad en agua	soluble, en todas las proporciones
o)	Coefficiente de reparto n-octanol/agua	Sin datos disponibles
p)	Temperatura de auto-inflamación	465.0 °C (869.0 °F)
q)	Temperatura de descomposición	Destilable sin descomposición a presión normal.
r)	Viscosidad	Sin datos disponibles
s)	Propiedades explosivas	Sin datos disponibles
t)	Propiedades comburentes	ningún

9.2 Otra información de seguridad

Conductibilidad	0.01 µS/cm a 20 °C (68 °F)
Tensión superficial	23.2 mN/m a 20.0 °C (68.0 °F)

(Merck, Acetona SDS, 2024)

XIII. Glosario

Microalgas: organismos fotosintéticos unicelulares capaces de crecer en distintos entornos acuáticos, con una elevada productividad de biomasa y capacidad de acumular lípidos.

Aceite de microalgas: mezcla de lípidos extraídos de biomasa algal, principalmente triglicéridos y ácidos grasos, que puede emplearse como materia prima para biocombustibles, alimentos o aditivos industriales.

Balance de masa: herramienta de la ingeniería química basada en el principio de conservación de la materia, que cuantifica las entradas, salidas, generación, consumo y acumulación de masa en un sistema.

Ciclos de reflujo: número de veces que el solvente se evapora, condensa y pasa sobre la muestra sólida en el cartucho extractor, disolviendo compuestos de interés y regresando al matraz colector.

Cromatografía de gases: técnica analítica que permite separar e identificar compuestos volátiles en una mezcla, basada en la diferencia de tiempos de retención en una columna cromatográfica y su detección por espectrometría de masas.

Hexano: solvente no polar comúnmente utilizado en la extracción de aceites por su alta afinidad con triglicéridos y su capacidad de evitar la co-extracción de compuestos polares no deseados.

Maceración: método de disrupción celular en el que se tritura la biomasa mediante fricción mecánica, reduciendo el tamaño de partícula para facilitar la extracción de compuestos internos.

Ruptura de pared celular: conjunto de técnicas físicas, químicas o mecánicas utilizadas para desestabilizar la membrana de las microalgas y facilitar la liberación de lípidos.

Rendimiento de extracción: relación porcentual entre la masa de aceite extraído y la masa inicial de biomasa seca, indicador clave de la eficiencia del proceso.

Soxhlet: método de extracción sólido-líquido que utiliza reflujo continuo de solvente para disolver compuestos presentes en una matriz sólida, caracterizado por su alta eficiencia y reproducibilidad.

Tiempo de extracción: variable de proceso que determina la duración total de la operación de Soxhlet, influye en el número de ciclos de reflujo y en el rendimiento final de aceite.