



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**APLICACIONES INDUSTRIALES Y MEDIOAMBIENTALES DE UN
BIOTENSIOACTIVO DE ORIGEN VEGETAL CON BASE EN
CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS Y
BALANCE HIDROFÍLICO-LIPOFÍLICO (HLB)**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. NANCY CRISTEL CORTAZA TORRES

DIRECTOR:

DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ RIVERA

CO-DIRECTORA:

DRA. MARCIA EUGENIA OJEDA MORALES

Declaración de Autoría y Originalidad

En el municipio de Cunduacán, Tabasco el día 23 del mes junio del año 2026, el que suscribe Nancy Cristel Cortaza Torres alumna del Programa de Maestría en Ciencia en Ingeniería con número de matrícula 222D19001, adscrito a la División de Ingeniería y Arquitectura (DAIA), de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado en maestra en Ciencia en Ingeniería y titulada “Aplicaciones industriales y medioambientales de un biotensioactivo de origen vegetal con base en características fisicoquímicas y balance hidrofílico-lipofílico (HLB)” dirigida por el Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera y co-directora Dra. Marcia Eugenia Ojeda Morales.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 23 de junio de 2026.



Nombre y Firma



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2026
año de
Margarita
Maza

JEFATURA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 15 de junio de 2026.

MEM/AP-DAIA/150/2026

PARA **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**
DIRECTORA DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA

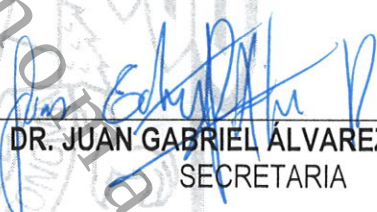
Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

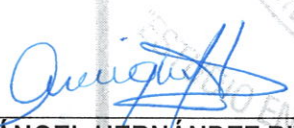
"Aplicaciones industriales y medioambientales de un biotensioactivo de origen vegetal con base en características fisicoquímicas y balance hidrofílico-lipofílico (HLB)"

Desarrollado por la IQ: **NANCY CRISTEL CORTAZA TORRES**, de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMITÉ SINODAL


DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
PRESIDENTE


DR. JUAN GABRIEL ÁLVAREZ RAMÍREZ
SECRETARIA


DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ RIVERA
VOCAL 1


DRA. YOLANDA CORDOVA BAUTISTA
VOCAL 2


DR. JOSÉ DE LOS SANTOS LÓPEZ LÁZARO
VOCAL 3



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2026
año de
Margarita
Maza

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/657/2026
FECHA: 16 de junio de 2026
ASUNTO: Autorización de
impresión definitiva

IQ. NANCY CRISTEL CORTAZA TORRES
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE

En virtud de haber elaborado su trabajo de TESIS denominado:

"Aplicaciones industriales y medioambientales de un biotensioactivo de origen vegetal con base en características fisicoquímicas y balance hidrofílico-lipofílico (HLB)"

Para obtener el grado de **Maestría en Ciencias en Ingeniería** y en el cual ha tenido como Director de Tesis al Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera y su Co-directora la Dra. Marcia Eugenia Ojeda Morales.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

c.c.p. Archivo
DRA'DMFM / MCA'RACT

Carta de Cesión de Derechos

Cunduacán, Tabasco a 23 de junio de 2026.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada Aplicaciones industriales y medioambientales de un biotensioactivo de origen vegetal con base en características fisicoquímicas y balance hidrofílico-lipofílico (HLB).

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

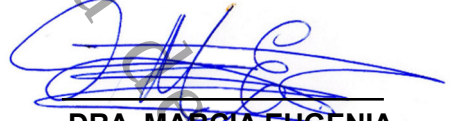
COLABORADORES



IQ. NANCY CRISTEL CORTAZA TORRES

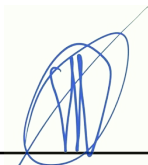


**DR. MIGUEL ÁNGEL
HERNÁNDEZ RIVERA
DIRECTOR**



**DRA. MARCIA EUGENIA
OJEDA MORALES
CODIRECTORA**

TESTIGOS



**DR. JOSÉ DE LOS
SANTOS LÓPEZ LÁZARO**



**DRA. YOLANDA
CÓRDOVA BAUTISTA**

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el valioso apoyo recibido para el desarrollo de este trabajo de Tesis y por el apoyo para realizar la estancia académica nacional a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

A la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la oportunidad de realizar mis estudios de formación profesional. Su apoyo y orientación han sido fundamental en el desarrollo de mi investigación, permitiéndome crecer personal y profesionalmente.

A los miembros de mi comité revisor, al Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera y la Dra. Marcia Eugenia Ojeda Morales, sin duda el tiempo, el esfuerzo y la dedicación que invirtieron en mí para llevar a cabo este proyecto no habría sido posible. A través de sus consejos y orientación, he podido superar obstáculos y alcanzar resultados que nunca hubiera imaginado.

Agradezco de forma especial al Dr. José de los Santos López Lázaro y a la Dra. Yolanda Córdova Bautista por su sabiduría y experiencia ya que han sido fundamentales para el desarrollo de mi investigación.

Un agradecimiento especial a Valeriano Hizo Haro, por su amor y apoyo incondicional. Sin duda cada palabra de motivación me ayudó a culminar este proyecto de tesis.

A mis amigos Aramis Landero, Viridiana Córdova, Fátima García y Willy Calderón agradezco su amor sincero y apoyo durante este tiempo.

DEDICATORIAS

Este proyecto de investigación es dedicado principalmente a Dios por permitir culminar con éxito este sueño. Así mismo, a mis padres el Sr. Felipe Cortaza Ovando y la Sra. María Paula Torres ovando, ustedes lo más importante que tengo en mi vida, siempre estaré agradecida por el apoyo incondicional y la confianza en mis decisiones. Al igual a mis hermanas Jennifer y Ana Karen por su apoyo y amor.

¡Muchas gracias!

ÍNDICE

	Pág.
Nomenclatura	X
Lista de tablas	XI
Lista de figuras	XIII
RESUMEN	1
CAPÍTULO I. Introducción	3
1.1 Introducción	4
1.2 Justificación	6
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo general	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 Antecedentes	8
1.5 Hipótesis	12
CAPÍTULO II. Marco teórico	13
2.1 Árbol de jaboncillo (<i>Sapindus saponaria</i> L)	14
2.1.1 Generalidades	14
2.1.2 Condiciones de crecimiento y producción	14
2.1.3 Taxonomía y nomenclatura	15
2.1.4 Composición química y estructural del árbol <i>Sapindus saponaria</i> L.	16
2.2 Métodos de extracción de aceite esencial	18
2.2.1 Extracción por soxhlet	18
2.2.2 Extracción asistida por ultrasonido (EAU)	20
2.2.3 Extracción asistida por microondas (EAM)	21
2.2.4 Extracción con líquidos presurizados (PLE)	22
2.2.5 Extracción con CO ₂ en estado supercríticos (SFE)	23
2.3 Aceite esencial	26
2.4 Tensioactivo	27
2.4.1 Biotensioactivos	28
2.5 Balance hidrofílico-lipofílico (HLB)	29

2.6 Concentración micelar crítica (CMC)	33
2.7 Tensión superficial	34
2.8 Medición de la tensión superficial mediante el anillo de platino Du Noüy	35

CAPÍTULO III. Desarrollo experimental 37

3.1 Desarrollo experimental	38
3.2 Etapa 1. Ubicación y recolección de material vegetal del árbol <i>sapindus saponaria</i> L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto)	39
3.2.1 Descripción del sitio	39
3.2.2 Recolección del material vegetal del árbol <i>sapindus saponaria</i> L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto)	39
3.3 Etapa 2. Procesamiento de muestras de las diferentes partes del árbol <i>sapindus saponaria</i> L. en el laboratorio	40
3.3.1 Lavado y secado de material vegetal	40
3.3.2 Molienda y tamizado del material vegetal	41
3.4 Etapa 3. Métodos de extracción de aceite esencial de las partes (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del árbol <i>sapindus saponaria</i> L.	42
3.4.1 Extracción de aceite esencial del <i>sapindus saponaria</i> L. por el método de extracción supercrítico con CO ₂ .	42
3.4.2 Extracción de aceite esencial del <i>sapindus saponaria</i> L. por el método soxhlet con hexano al 99%	44
3.5 Etapa 4. Caracterización fisicoquímica de aceite esencial de las partes (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del árbol <i>sapindus saponaria</i> L.	45
3.5.1 Determinación de la densidad del aceite extraído del <i>sapindus saponaria</i> L.	45
3.5.2 Determinación de ácidos grasos del aceite del <i>sapindus saponaria</i> L.	46
3.6 Identificación de compuestos del aceite esencial de las partes (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del árbol <i>sapindus saponaria</i> L.	47
3.6.1 Análisis por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GCMS) del aceite extraído del <i>sapindus saponaria</i> L. por los siguientes métodos: extracción con CO ₂ en estado supercrítico (SFE) y soxhlet con hexano al 99%.	47
3.6.2 Análisis por infrarrojo del aceite extraído del <i>sapindus saponaria</i> L. por los siguientes métodos:	48

extracción por supercrítico con CO ₂ (SFE) y soxhlet con solvente hexano al 99%.	
3.7 Caracterización de superficie del aceite esencial de las partes (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del árbol <i>sapindus saponaria</i> L.	48
3.7.1 Determinación de la tensión superficial del aceite extraído del <i>sapindus saponaria</i> L. por el método de anillo de Du noüy	48
3.7.2 Determinación de la concentración micelar crítica (CMC) del aceite extraído del <i>sapindus saponaria</i> L.	50
3.7.3 Identificación de saponinas en los extractos del aceite extraído del <i>sapindus saponaria</i> L.	50
3.7.3.1 Las reacciones de Salkowski y Rosenthaler	50
3.7.3.2 Reacción de Lieberman-Burchard	50
3.8 Determinación del balance hidrófilo-lipofílico (HLB) del aceite esencial de las partes (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del árbol <i>sapindus saponaria</i> L.	51
3.9 Caracterización biológica del aceite esencial de las partes (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del árbol <i>sapindus saponaria</i> L.	52
3.9.1 Determinación de la concentración letal media (CL ₅₀) del aceite del <i>sapindus saponaria</i> L. en lombrices <i>eisenia foetida</i> (lombriz roja de california).	52
3.9.1.1 Lombrices	52
3.9.1.2 El suelo	53
3.9.1.3 Determinación de humedad del suelo	53
3.9.1.4 Determinación de humedad del suelo usando un higrómetro	55
3.9.1.5 Determinación del pH del suelo	55
3.9.1.6 Determinación de toxicidad	56
3.10 Diseño experimental	59

CAPÍTULO IV. Resultados y discusión	63
4.1 Resultados y discusión	64
4.1.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica del aceite esencial extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por el método extracción supercrítico con CO ₂ .	65
4.1.2 Determinación de la densidad del aceite extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	65
4.1.3 Determinación de ácidos grasos del aceite extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	66

4.2 Identificación de compuestos del aceite esencial extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L.	67
4.2.1 Aceite extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por extracción supercrítico con CO ₂ (SFE).	67
4.2.2 Aceite extraído del fruto del árbol <i>sapindus saponaria</i> L. por extracción soxhlet con hexano al 99%.	69
4.3 Análisis por infrarrojo del aceite extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por el método de extracción por supercrítico con CO ₂ (SFE).	73
4.3.1 Análisis por infrarrojo del aceite esencial extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por el método de extracción por soxhlet con hexano al 99%.	74
4.4 Caracterización de superficie del aceite vegetal extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	76
4.4.1 Determinación de la tensión superficial del aceite esencial extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por el método de anillo de Du noüy	76
4.4.2 Determinación de la concentración micelar crítica (CMC) del aceite vegetal extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	78
4.4.3 Identificación de saponinas en los extractos del aceite vegetal extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	79
4.4.4 Determinación del balance hidrófilo-lipofílico (HLB) del aceite vegetal extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L.	80
4.5 Caracterización biológica del aceite vegetal extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	86
4.5.1 Determinación de humedad del suelo	86
4.5.1.2 Determinación de la concentración letal media (CL50) del aceite vegetal extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. en lombrices <i>eisenia foetida</i>	87
4.6 Determinación del rendimiento del aceite esencial extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L.	93
4.7 Diseño experimental	95
CAPITULO V. Conclusión y recomendaciones	103
5.1 Conclusión	104
5.2 Recomendaciones	105
Referencias bibliográficas	106

ANEXO

	133
A.1 Registro de identificación de la especie <i>Sapindus saponaria</i> L.	133
B.1 Constancia de crianza de lombriz <i>eisenia foetida</i>	134
C.1 Constancia de estancia académica.	135
D.1 Tabla de factores de corrección (F) para el método del anillo.	136
E.1 Tabla de dimensiones nominales, variaciones permitidas para tela de alambre de tamices de prueba estándar (ASTM E11-95).	137
F.1 Partes del árbol <i>sapindus saponaria</i> L.: a) raíz, b) flor, c) hoja, d) tallo y e) fruto	138
G.1 Aceite esencial de las partes del árbol de <i>sapindus saponaria</i> L.: a) raíz, b) flor, c) tallo, d) fruto y e) hoja	139
H.1 Identificación de compuestos del aceite esencial extraído de las diferentes partes del árbol <i>sapindus saponaria</i> L.	140
I.1 Hojas de seguridad de reactivos	145

NOMENCLATURA

Variables	Descripción	Unidades
g	Gravedad	$\frac{cm}{s^2}$
T	Temperatura	°C
T	Temperatura	K
Σ	Tensión superficial	mN/m
CMC	Concentración micelar critica	μM , <u>mM</u>
P	Presión	Psi
γ	Rendimiento	%
Λ	Longitud de onda	cm^{-1}
V	Volumen	mL
M	Masa	G
P	Densidad	kgm^{-3}

LISTA DE TABLAS

No.	Título	Pág.
1	Componentes del aceite esencial de <i>Sapindus saponaria</i> L	18
2	Condiciones para optimizar el proceso de extracción con fluidos supercríticos	26
3	Clasificación de los tensioactivos de acuerdo a su valor en la escala HLB	29
4	Número de grupo HLB para calcular el HLB por el método de Davies (1957)	32
5	Tabla de valores para grupos hidrofílicos y lipofílicos para el método de Davies del ácido oleico	51
6	Unidades experimentales y bioensayos a diferentes concentraciones	56
7	Condiciones establecidas para la prueba CL50 en lombrices <i>eisenia foetida</i>	58
8	Variables de operación	59
9	Variables codificadas para la extracción de aceite esencial de las partes de <i>sapindus saponaria</i> L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto)	60
10	Diseño central compuesto para la extracción del aceite esencial de las partes del <i>sapindus saponaria</i> L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto)	61
11	Datos para determinar densidad vía picnómetro	65
12	Componentes obtenidos del aceite extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por extracción supercrítica con CO ₂ .	68
13	Componentes obtenidos del aceite extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por soxhlet con hexano al 99%.	70
14	Concentración de las muestras aceite-agua para medición de tensión superficial	76
15	Variables y constantes para el cálculo de la tensión superficial.	77
16	Determinación de HLB de cada componente con base en el aceite extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	82
17	Datos de peso constante de cajas petri con suelo.	86
18	Peso inicial y final de lombrices en la prueba de CL ₅₀	89
19	Reporte de muertes al finalizar la prueba CL ₅₀ en lombrices	91

20	Resultados de la prueba de medias TUKEY	92
21	Resultados del análisis ANOVA aplicado a las variables experimentales	93
22	Rendimiento de extracción del aceite esencial extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L.	95
23	Análisis de varianza en el análisis de superficie de respuesta	96
24	Coeficientes codificados del diseño central compuesto para las corridas de extracción de aceite	97
25	Superficie de respuesta del rendimiento. Valor de significancia del modelo.	98
26	Valor de significancia de cada parámetro del modelo	98

LISTA DE FIGURAS

No.	Título	Pág.
1.1	Árbol jaboncillo (<i>Sapindus saponaria</i> L.) con características morfológicas generales.	4
2.1.2	Árbol jaboncillo (<i>Sapindus saponaria</i> L.) con identificación de sus partes (raíz, tallo, hoja, flor y fruto).	15
2.1.4	Estructura general de la saponina	16
2.1.4.1	Estructura de las saponinas triterpénicas (triterpenoide pentacíclico)	17
2.2.1	Esquema del equipo soxhlet	19
2.2.2	Representación de la extracción asistida por ultrasonido (EAU).	20
2.2.3	Representación de la extracción asistida por microondas (EAM).	22
2.2.4	Esquema del método de extracción con líquidos presurizados (PLE)	23
2.2.5	Diagrama general del equipo de extracción supercrítico con CO ₂	24
2.2.5.1	Representación esquemática del equilibrio de fases sólido, líquido y gas	25
2.6	Formación de micelas	33
2.8	Ilustración de tiramiento de anillo para medición de la tensión superficial	35
3.1	Etapas del desarrollo experimental	37
3.2.1	Lugar de recolección. La Chincheta color rojo que aparece en la imagen es la ubicación exacta del <i>sapindus saponaria</i> L.	39
3.2.2	Ubicación y recolección de material vegetativo del árbol <i>Sapindus saponaria</i> L.	40
3.3.1	Lavado y secado de muestras del <i>sapindus saponaria</i> L.	41
3.3.2	Proceso de tamizado de muestras del <i>sapindus saponaria</i> L.	42
3.4.1	Extracción de aceite esencial del árbol de <i>sapindus saponaria</i> L. por el método supercrítico con CO ₂ .	43
3.4.2	Extracción de aceite esencial del árbol de <i>sapindus saponaria</i> L. por el método soxhlet con hexano al 99%.	44
3.5.1	Determinación de la densidad del aceite esencial extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	45
3.5.2	Determinación de ácidos grasos del aceite esencial extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L.	46

3.7.1	Medición de la tensión superficial del aceite extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L.	49
3.9.1.1	Lombrices <i>eisenia foetida</i> .	52
3.9.1.2	Suelo.	53
3.9.1.3	Determinación de humedad del suelo.	54
3.9.1.4	Determinación de humedad del suelo usando un higrómetro.	55
3.9.1.6	Determinación de toxicidad CL ₅₀ en lombrices <i>Eisenia foetida</i> .	57
4.2.1	Cromatograma del aceite extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L. por el método SFE.	67
4.2.2	Cromatograma del aceite del fruto del árbol de <i>sapindus saponaria</i> L. extraído por soxhlet con hexano al 99%.	70
4.3	Espectro FTIR de una muestra de aceite esencial extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por el método SFE.	74
4.3.1	Espectro FTIR de una muestra de aceite esencial extraído del fruto de <i>sapindus saponaria</i> L. por soxhlet con hexano al 99%.	75
4.4.1	Comportamiento de la tensión superficial y composición de la muestra aceite-agua.	78
4.4.3	Identificación de saponinas en los extractos del aceite vegetal extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L.	80
4.4.4	Estructura del ácido oleico para la determinación del balance hidrófilo-lipofílico (HLB) del aceite extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L.	81
4.4.4.1	Escala que muestra la extensión de los valores HLB de diversos tensioactivos	85
4.5.1.2	Determinación de la concentración letal media (CL ₅₀) del aceite extraído del fruto del <i>sapindus saponaria</i> L. en <i>eisenia foetida</i> .	88
4.5.1.2.1	Peso de lombrices en diferentes concentraciones en la prueba CL ₅₀	90
4.5.1.2.1.1	Efecto de la concentración de aceite obtenida del fruto <i>sapindus saponaria</i> L. a 30000, 60000 y 90000 (ppm) sobre el peso de las lombrices <i>eisenia foetida</i> .	92
4.7.1	Análisis de superficie de respuesta del diseño experimental de extracción de aceite	99
4.7.2	Análisis del gráfico de contornos del diseño experimental de extracción de aceite	100
4.7.3	Diagrama de dispersión rendimiento vs presión del diseño experimental de extracción de aceite	101

4.7.4	Diagrama de dispersión rendimiento vs temperatura del diseño experimental de extracción de aceite	102
-------	---	-----

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

RESUMEN

Los biotensioactivos terpénicos son una alternativa natural para reducir la tensión superficial del agua, incrementando así la solubilidad y disponibilidad de compuestos orgánicos. Por otra parte, uno de los problemas ambientales del estado de Tabasco son los siniestros causados por negligencias antropogénicas durante el manejo, transporte o procesamiento del petróleo. Para minimizar el impacto se aplican diversos tensioactivos químicos, lo que ha propiciado la “limpieza de los ecosistemas” así como la mortandad de los factores bióticos. Este estudio propicia la aplicación de un aceite vegetal de baja toxicidad que tenga la capacidad de reducir la tensión superficial, por lo que, se evaluó el aceite del árbol jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.) obtenido a partir de la raíz, tallo, hojas, flor y fruto, por el método soxhlet y supercrítico con CO₂. Los analitos se identificaron en ambos métodos de extracción mediante GC-MS, confirmando que el fruto presentó un rendimiento de aceite significativamente superior al de las demás estructuras del árbol. El componente más representativo del fruto fue ácido oleico con 60.15% obtenido por soxhlet y 53.61% obtenido por supercrítico con CO₂, además de 12 analitos adicionales en el aceite esencial. El balance hidrofílico-lipofílico (HLB) fue determinado por el método de contribución grupal de Davies, el resultado se registró en 5.1236 representando un agente emulgente (w/o). El análisis por FTIR determinó bandas de -OH, -C=O, C-H, y C=C asociados con una estructura triterpénica representativa de las saponinas. La tensión superficial y concentración micelar crítica del aceite esencial del fruto fue de $\sigma = 52.5 \text{ mN/m}$ y $\text{CMC} = 4.55015 \times 10^{-05} \text{ } \mu\text{M}$.

ABSTRACT

Terpene biosurfactants are a natural alternative for reducing the surface tension of water, thereby increasing the solubility and availability of organic compounds. Furthermore, one of the environmental problems in the state of Tabasco is the disasters caused by anthropogenic negligence during the handling, transport, or processing of petroleum. To minimize the impact, various chemical surfactants are applied, which has led to the "cleaning of ecosystems" as well as the death of biotic factors. This study promotes the application of a low-toxicity vegetable oil capable of reducing surface tension. Therefore, the oil from the soapberry tree (*Sapindus saponaria* L.), obtained from the root, stem, leaves, flower, and fruit, was evaluated using soxhlet and supercritical CO₂ extraction methods. The analytes were identified in both extraction methods by GC-MS, confirming that the fruit yielded a significantly higher oil content compared to the other tree structures. The most representative component of the fruit was oleic acid, with 60.15% obtained by soxhlet extraction and 53.61% obtained by supercritical CO₂, in addition to 12 other analytes identified in the essential oil. The hydrophilic-lipophilic equilibrium (HLB) was determined for oleic acid using the Davies group contribution method, yielding a result of 5.1236, indicating a water-in-oil (w/o) emulsifying agent. FTIR analysis compared -OH, -C=O, C-H, and C=C bands associated with a triterpene structure representative of saponins. The surface tension and critical micelle concentration of the soapberry tree fruit essential oil were $\sigma = 52.5$ mN/m and $CMC = 4.55015 \times 10^{-05}$ μ M.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

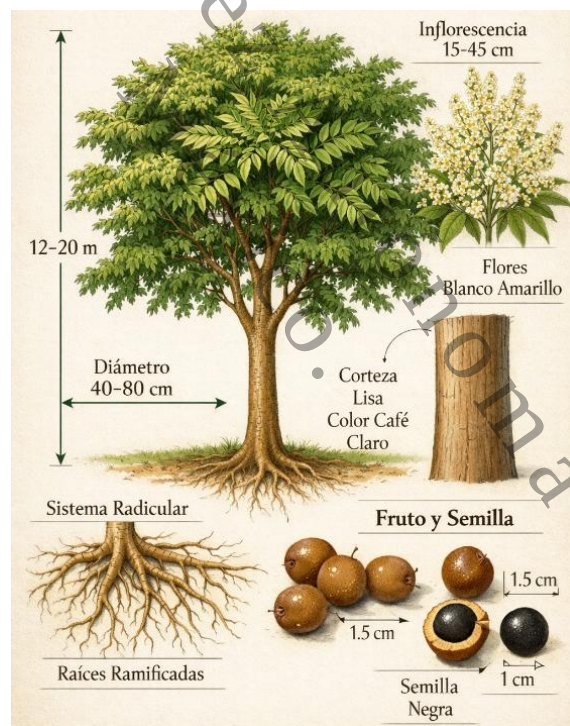
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

1.1 INTRODUCCIÓN

El jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.) tal como se observa en la Figura 1.1, es un árbol con altura de 12 a 20 m aproximadamente y diámetro de 40 a 80 cm. Pertenece a la familia Sapindaceae. La corteza es lisa color café claro. Las hojas son compuestas, alternadas y paripinnadas de color verde de 9 a 12 cm de largo. Las flores son panículas con ramificaciones de 15 a 45 cm de largo con numerosas flores pequeñas con pétalos color blanco amarillo. El fruto es una baya redonda de 1.5 cm de diámetro, color café que contiene una semilla color negro en forma de almendra de 1 cm de diámetro. La raíz es ramificada y alargadas de color café claro (Cuitláhuac, 2017; Barros et al., 2024).

Figura 1.1

*Árbol jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.) con características morfológicas generales.*



Nota: Se representa la organización anatómica de un árbol, destacando los principales tejidos y estructuras que conforman su sistema de soporte y conducción. La ilustración permite visualizar más completo al ejemplar, elementos fundamentales para comprender los procesos fisiológicos de transporte y crecimiento vegetal. Ilustración elaborada con asistencia digital (Copilot, 2026).

En México esta especie se ha establecido esencialmente en la región centro y sur del país, se encuentra también en países de centro y Sudamérica. En Tabasco esta especie se encuentra distribuido en la mayor parte del territorio. Este árbol es de clima cálido húmedo, se encuentra presente en selvas altas perennifolias, medianas subperennifolias y subcaducifolias en el estrato medio y es muy abundante en vegetación secundaria. Se desarrolla tanto en suelos derivados de material calizo como provenientes de material ígneo o aluvial. Su amplitud altitudinal va del nivel del mar 0 hasta 2100 msnm (Blanco et al., 2015; Aldemar et al., 2020).

El aceite esencial de planta es un extracto vegetal natural originado a partir de la raíz, tallo, hojas, flor y fruto, que posee propiedades antimicrobianas, antioxidantes y con presencia de ingredientes activos como saponinas, en particular, *sapindus saponaria* L. destaca por sus propiedades únicas, actuando como agente espumante y emulsionante (Huan et al., 2019). Además, los aceites esenciales son empleados como materia prima industrial para diferentes aplicaciones por ser una fuente de energía renovable y segura para el medio ambiente (Braz et al., 2014; Azevedo et al., 2017).

Los tensioactivos poseen un gran interés industrial debido a sus múltiples aplicaciones en áreas como farmacéutica, alimentaria, cosmética, textil, pinturas, lubricantes, etc. No obstante, su uso se ha ido ampliando gradualmente hacia al área de la ciencia como la biorremediación. Hoy en día, los tensioactivos comerciales utilizados en la industria se derivan principalmente del petróleo (Almeida et al., 2021). El problema de esto es que la contaminación ambiental ocasionada por el petróleo y productos petroquímicos se reconoce como uno de los más graves de la actualidad, sobre todo cuando se asocia a los derrames accidentales a gran escala. Por otra parte, los tensioactivos naturales derivados de microorganismos y plantas, son una alternativa que ha sido ampliamente estudiada debido a sus propiedades como su diversidad estructural, baja toxicidad y biodegradabilidad e incluso aplicada comercialmente por algunas empresas en todo el mundo (Alexandridis et al., 2019).

Por lo que, esta investigación tiene como objetivo obtener biotensioactivos a partir de aceites de origen natural del árbol jaboncillo provenientes de raíz, tallo, hojas, flor y fruto con probable aplicaciones industriales de acuerdo a su balance hidrofílico-lipofílico (HLB).

En el capítulo 1 se aborda la problemática del uso de tensioactivos sintéticos actualmente a nivel mundial y nacional, así como los problemas de contaminación que afectan a la sociedad, económicos y ambientales. Asimismo, la necesidad de integrar una alternativa biodegradable y amigable con el medio ambiente. En este capítulo también se muestran los objetivos y la hipótesis en la que se basó este proyecto.

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos, que pretende dar al lector los conceptos teóricos necesarios para comprender esta investigación y sustentar la parte experimental vista en los capítulos siguientes.

En el capítulo 3 se describe el desarrollo experimental que consta de cuatro etapas. En la primera etapa ubicación y recolección de material vegetativo. En la segunda etapa procesamiento de muestras. En la tercera etapa extracción de aceite de las diferentes partes del árbol (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) *sapindus saponaria* L. por los siguientes métodos: supercrítico con CO₂ y soxhlet. En la cuarta etapa la caracterización fisicoquímica, biológica y de superficie. Posteriormente, en el capítulo 4, se reportan los resultados y discusión, es decir, se presentan y analizan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

Al final de este documento se encuentra un apartado con la bibliografía consultada durante la realización de esta investigación, y en el apartado de anexos se encuentra el análisis de varianza (ANOVA) y la hoja de seguridad de sustancias químicas usadas en esta investigación.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los aceites obtenidos de diversas plantas vegetales endémicas del estado de Tabasco presentan características que son de utilidad en la aplicación de las industrias. Algunos de estos vegetales sintetizan compuestos anfifílicos con características tensioactivas, lo que generan potenciales aplicaciones para solucionar problemas ambientales e inclusive con aplicaciones farmacéutica, petrolera, cosmética, etc. Los tensioactivos son compuestos que reducen la tensión superficial del agua, permitiendo hacer emulsiones o dispersiones de compuestos hidrofóbicos como contaminantes tóxicos. Desde el punto de vista industrial, Tabasco es una zona petrolera. No obstante, debido a los malos manejos del

petróleo durante su explotación, ha ocasionado un sin número de siniestros ambientales en esta región del país. Se han llevado a cabo investigaciones para la obtención de tensioactivos provenientes de microorganismos como: *bacillus*, *methanobacterium*, *phormidium*, *candida*, *halomonas*, *azospirillum*, *pseudomonas*, *saccharomyces* y *sulfolobus* (Miyazaki & Sarti, 2005, Raiger lustman & López, 2009, Gracida et al., 2010, Zaragoza, 2012, Godínez et al., 2013, Datta et al., 2015, Becerra & Horna, 2016, Antolak et al., 2017, Almeida et al., 2018, Alexandridis et al., 2019, Chang et al., 2020, Almeida et al., 2021). Sin embargo, aunque se ha avanzado en este campo, el principal problema son los altos costos de extracción y purificación de los tensioactivos. Además, la mayoría de los microorganismos reportados son catalogados como patógenos. Con base en lo anterior, en esta investigación se pretende generar un reporte de investigación donde se obtenga y caracterice un biotensioactivo terpénico de una planta nativa de Tabasco, y que además permita minimizar el impacto negativo de sustancias como el petróleo, gasolina, diésel u otros contaminantes hidrófobos en ecosistemas de alta importancia ecológica. Los biotensioactivos vegetales, en contraste con los tensioactivos sintéticos, son una buena opción para la industria, debido a su renovabilidad, sostenibilidad, menor costo, estabilidad superior, biocompatibilidad, biodegradabilidad, baja toxicidad ambiental, y alta actividad de superficie (Córdova et al., 2017, Aruna, 2022). Aunado a esto, se propuso al árbol jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.), como materia prima para que mediante la extracción supercrítica (SFE) con CO₂, se obtuvieran aceites a partir de la raíz, tallo, hojas, flor y fruto. Posteriormente, fueran analizados para verificar su potencial aplicación como tensioactivos a través de propiedades como balance hidrófilo-lipofílico (HLB), concentración micelar crítica (CMC) y tensión superficial (σ).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades fisicoquímicas de biotensioactivos obtenidos a partir de aceites vegetales con potenciales aplicaciones industriales.

1.3.2 Objetivos específicos

- Extraer aceites del árbol de jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.) provenientes de raíz, tallo, hojas, flor y fruto.
- Analizar y caracterizar las propiedades fisicoquímicas y de superficie del aceite sintetizado por el árbol *sapindus saponaria* L. para su uso como biotensioactivo.
- Proponer aplicaciones industriales para el aceite obtenido de acuerdo con sus características fisicoquímicas, biológicas y de superficie.

1.4 ANTECEDENTES

Los biotensioactivos son moléculas anfipáticas que reducen la tensión en la interfase, incrementando así la solubilidad en agua y disponibilidad de compuestos orgánicos, son producidos por bacterias, hongos, levaduras y aceites vegetales, los cuales han sido empleados como materia prima para diferentes aplicaciones en la industria como lo reporta Braz et al., 2014, a partir de la extracción de aceite de la semilla de *sapindus saponaria* L. (Sapindaceae) mediante el método soxhlet y la caracterización por cromatografía de gases, acoplada a espectrometría de masas (GCMS). El aceite extraído presentó siete ácidos grasos. De estos, el 57.60% eran insaturados y el 42.40% saturados. El ácido oleico fue el más abundante con 52.45%. Este resultado permitió compararse con la especificación ASTM D6751, donde el biodiésel debe estar compuesto por ésteres de cadenas de hidrocarburos entre C₁₂ y C₂₂, cumpliendo con esta especificación como recurso potencial de ácidos grasos C₁₆ a C₂₂.

Bhattarai et al., 2023, reportaron la caracterización de las saponinas extraídas de las hojas y el tallo de *jatropha curcas* L. donde evaluaron sus propiedades tensioactivas aplicando los siguientes métodos como mediciones de conductividad, tensión superficial y pH. Las mediciones de tensión superficial y conductividad de las saponinas de *jatropha curcas* L. se realizaron a 25 °C (temperatura ambiente). La concentración micelar crítica (CMC) fue de 0.50 g/L para la saponina de la hoja y 0.75 g/L para el tallo. La saponina del tallo redujo la tensión superficial del agua hasta 37.65 mN/m, mientras que la de la hoja alcanzó 49.27 mN/m, mostrando mayor eficiencia como agente tensioactivo. El pH de las soluciones indicó una naturaleza débilmente ácida, ligeramente por debajo del rango óptimo para productos destinados al cuidado del cabello y la piel. Los datos obtenidos determinaron

que la saponina del tallo exhibió mejor capacidad detergente, espumante y estabilidad de espuma que la de la hoja, lo que la posiciona como un potencial sustituto ecológico de los tensioactivos sintéticos.

Adeyemi et al., 2024, investigaron el uso de un tensioactivo derivado del aceite de soya (SODS) como agente activo de superficie en procesos de deliquificación de pozos de gas. El objetivo principal fue evaluar su capacidad para reducir la tensión superficial y mejorar la expulsión de agua acumulada en condiciones de producción de gas. Primero sintetizaron un tensioactivo aniónico a partir de aceite de soya. Después aplicaron la prueba ASTM D-892 modificada para medir propiedades espumantes y de reducción de tensión superficial. Y se evaluaron diferentes concentraciones: 200 ppm, 400 ppm y 600 ppm. El SODS mostró propiedades prometedoras de reducción de la tensión superficial, alterando eficazmente la interfaz gas-líquido. El agua expulsada aumentó proporcionalmente con la concentración: 200 ppm a 17%, 400 ppm a 28% y 600 ppm a 70%. Se evidenció un comportamiento dependiente de la concentración, con mejoras significativas en la eficiencia de desincrustación. El estudio determinó que el tensioactivo derivado del aceite de soya representa una alternativa sostenible frente a tensioactivos sintéticos, con ventajas en biodegradabilidad y costo. Su aplicación en pozos de gas podría contribuir a mejorar la eficiencia de producción y reducir impactos ambientales.

Rangwala & Sarasan, 2024, estudiaron la síntesis de tensioactivos metálicos a partir de aceite de *jatropha*, lo cual permitió conocer los ácidos grasos presentes obtenidos por cromatografía: el 64.2 % de ácido oleico, 17.2 % de ácido palmítico, 3.84 % ácido vaccénico, 0.30 % de ácido esteárico y 0.55% de ácido ricinoleico. Además, el estudio por FT-IR presentó picos correspondientes a ácido linoleico y ácido elaídico (isómero trans del ácido oleico). Las propiedades físicoquímicas fueron las siguientes: índice de saponificación de 195.13 mg/KOH y el índice de yodo del aceite de 97.74 g I₂ por 100 g de aceite. El surfactante de sodio y potasio del aceite de *jatropha* se sintetizó haciendo reaccionar el aceite de *jatropha* con lejía alcalina en medio acuoso. Posteriormente, se determinó la actividad antimicrobiana de todos los tensioactivos en el fitopatógeno *Xanthomonas campestris* lo cual exhiben una actividad antimicrobiana prominente en el rango de 5000 ppm a 10000 ppm. Los tensioactivos metálicos a base de *jatropha* pueden ayudar a fabricar productos agroquímicos biodegradables, lo que podría ayudar a

minimizar el uso de pesticidas a base de organoclorados u organofosforados, que son altamente tóxicos y no biodegradables en la naturaleza.

Hemmati-Sarapardeh et al., 2025, estudiaron dos nuevos tensioactivos aniónicos naturales extraídos de la alcachofa y *prosopis farcta* para mejorar la recuperación de petróleo a partir del comportamiento a diferentes salinidades, se utilizaron dos sales como cloruro de sodio (NaCl) y sulfato de sodio (Na₂SO₄). Los valores de tensión interfacial (IFT) fueron de 26.52 mN/m y 24.24 mN/m a la concentración óptima de 20,000 ppm para NaCl y Na₂SO₄. La IFT inicial entre el agua y el petróleo se midió en 32.96 mN/m. Con la concentración óptima de Na₂SO₄ y su concentración micelar crítica (CMC), la IFT disminuyó a 9.80 mN/m para el surfactante de alcachofa y 13.40 mN/m para *Prosopis farcta*. La tensión superficial en el CMC para los dos tensioactivos, alcachofa y *prosopis farcta*, se midió en 40.89 mN/m y 45.44 mN/m. El tensioactivo de alcachofa demuestra más propiedades hidrofílicas en comparación con *prosopis farcta*. A la concentración óptima de Na₂SO₄, los tensioactivos de alcachofa y *prosopis farcta* redujeron el ángulo de contacto en un 57 % y un 40 %. Posteriormente, ambos tensioactivos demostraron estabilidad en emulsión durante 3 semanas a 75 °C. Las tasas de recuperación de petróleo fueron del 39 % para las inundaciones con agua, del 46 % para *prosopis farcta* y del 54 % para el surfactante de alcachofa.

De acuerdo con la investigación de Gongora et al., 2023, reportan que el aceite esencial obtenido de las diferentes plantas del género *yucca* son ricas en extractos naturales como saponinas particularmente glucósidos esteroideos. Debido a sus propiedades emulsificantes, espumantes, humectantes y de reducción de la tensión superficial, tienen aplicaciones en la industria cosmética, farmacéutica, agrícola y alimentaria. Estas son reconocidas por organismos regulatorios internacionales como aditivo seguro para el consumo humano, además de ser consideradas no tóxicas, ni mutagénicas. Es por esto que los extractos de *yucca* ricos en saponinas tienen un potencial considerable de uso a nivel industrial en formulaciones de bebidas y alimentos.

Borja et al., 2023, evaluaron la actividad antioxidante y citotóxica del aceite esencial de *litsea glaucescens* kunth, especie mexicana en peligro de extinción según la NOM-059-SEMARNAT-2019, la extracción del aceite esencial se llevó a cabo por el método de

destilación utilizando hojas recolectadas de los siguientes estados como Puebla, Hidalgo, Veracruz y muestras comerciales. La Mayor actividad antioxidante se obtuvo en la muestra de Zongolica, Veracruz (10.72–12.89 $\mu\text{mol ET}/\mu\text{L}$). La determinación de citotoxicidad se determinó con bioensayo de *artemia salina* obteniéndose la mayor citotoxicidad en Zongolica, Veracruz (CL50 = 59 $\mu\text{g/mL}$) y muestra comercial Soriana (CL50 = 53.8 $\mu\text{g/mL}$) y la menor en Nopalillo, Hidalgo (CL50 = 451.6 $\mu\text{g/mL}$). El aceite esencial de *litsea glaucescens kunth* presenta alto potencial antioxidante y actividad citotóxica significativa, atribuida a su mezcla de monoterpenos y sesquiterpenos. Estos resultados sugieren aplicaciones farmacológicas y antimicrobianas.

Jaramillo et al., 2007, determinaron la composición química volátil y la toxicidad aguda a *artemia salina* utilizando aceite esencial del *croton malambo*. Los valores obtenidos de CL50 fue de 15.32 $\mu\text{g/mL}$ (24 h) y 3.20 $\mu\text{g/mL}$ (48 h), mostrando alta bioactividad lo que sugiere potencial farmacológico (antimicrobiano, antitumoral). Además, la presencia de compuestos fenólicos y terpenos explica la actividad observada.

De Andrade et al., 2023, analizaron la composición química de los extractos de hojas de *sapindus saponaria* L. y evaluaron su toxicidad frente a larvas de *artemia salina* y *aedes aegypti* donde se prepararon medios en etanólico, acuoso y acetonitrilo obteniendo metabolitos secundarios donde el etanólico obtuvo 9 clases (incluyendo saponinas y heterósidos cardiotónicos), acuoso obtuvo 7 clases y acetonitrilo obtuvo 7 clases. La toxicidad en *aedes aegypti* en el extracto etanólico alcanzó CL90 y produjo 100% de mortalidad larval donde se redujo significativamente el tiempo de desarrollo larval y pupal. La toxicidad en *artemia salina* en los extractos mostraron alta mortalidad (cercana al 100%) en las concentraciones evaluadas (500, 250, 125, 62.5 y 31.2 $\mu\text{g/mL}$). Estos datos determinaron que el *sapindus saponaria* L. presenta alto potencial como fitoinsecticida natural, especialmente contra el mosquito del dengue y la actividad biológica se asocia principalmente a la presencia de saponinas cardiotónicas y heterósidos. Sin embargo, la toxicidad elevada en organismos acuáticos como *artemia salina* indica riesgos ambientales que deben evaluarse antes de aplicaciones prácticas.

1.5 HIPÓTESIS

Los aceites sintetizados por la planta de jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.) poseen propiedades como agentes de superficie.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

2.1 ÁRBOL DE JABONCILLO (*SAPINDUS SAPONARIA* L.)

2.1.1 Generalidades

Esta especie es nativa y se encuentra principalmente en América del sur y América central. En México su distribución es amplia y se registra al menos en 28 estados de la república mexicana como Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Colima, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz, Yucatán, entre otros. La especie se ha introducido en algunos lugares de Asia y África (Pennington & Sarukhán, 2005; Hosney et al., 2025).

El árbol de *sapindus saponaria* L. también es conocido en México como jaboncillo, pipe, michú, chumbimba o jabonera (Aragón et al., 2009; Moteetee et al., 2023).

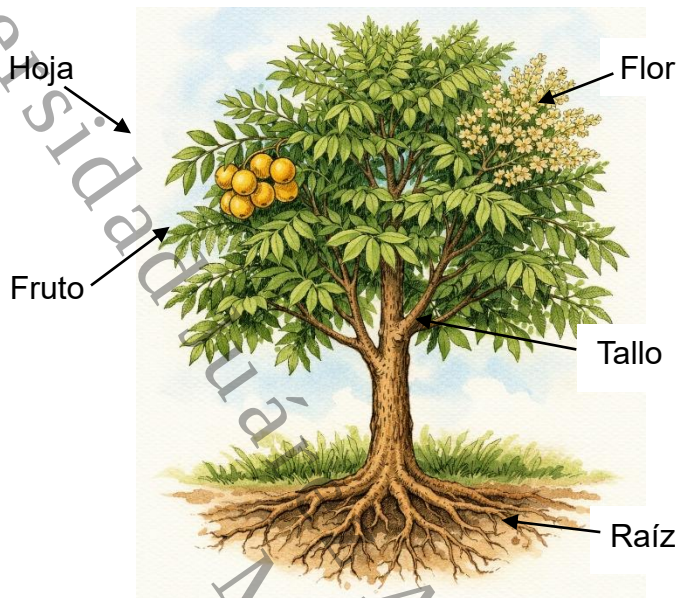
2.1.2 Condiciones de crecimiento y reproducción

El *sapindus saponaria* L. es un árbol perennifolio o subcaducifolio de clima cálido húmedo. Se presenta en bosques y orillas de calles. Su distribución altitudinal es hasta los 2100 msnm, donde se adapta a gran variedad de suelos, desde calizos hasta volcánicos, se desarrolla bien en suelos secos y pobres en materia orgánica. Su vegetación es abundante ya que crece en un ambiente tropical como selvas y bosques (Mahecha & Echeverri 1983; Hosney et al., 2025).

El árbol tiene una altura de 15 a 20 m aproximadamente con diámetro de tronco de 40 a 80 cm. Su copa es densa e irregular. Las flores son pequeñas de alrededor de 0.5 cm de diámetro con pétalos blancos con amarillo que forman parte de un racimo. Los frutos son drupas esféricas de 2 a 3 cm de diámetro, con pericarpio amarillo. Las semillas son negras y redondas. El tallo y corteza es lisa y escamosa de color verde y grisácea. Las hojas son alternas de color verde y tienen forma ovalada con un largo de 10 a 20 cm, como se ilustra en la Figura 2.1.2 (Clément et al., 2008; Calónico, 2019).

Figura 2.1.2

Árbol jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.) con identificación de sus partes (raíz, tallo, hoja, flor y fruto).



Nota: Representación de la estructura del árbol, se muestra el ejemplar de *Sapindus saponaria* L. utilizado en el estudio, con la identificación de sus principales órganos morfológicos: raíz, tallo, hojas, flores y fruto, que constituyen las matrices analizadas en el proceso de extracción y caracterización. Ilustración elaborada con asistencia digital (Copilot, 2026).

2.1.3 Taxonomía y nomenclatura

Nombre científico: *Sapindus saponaria* L.

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Sapindales

Familia: Sapindaceae

Género: *Sapindus* L.

Especie: *S. saponaria* L.

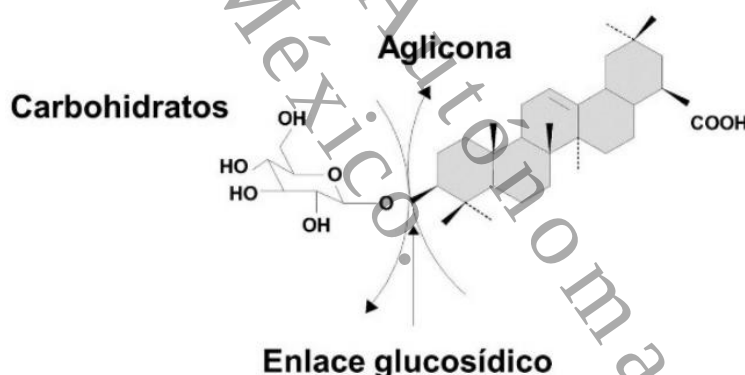
Nombre común: Jaboncillo o chumbimba, chambimbe, chambimba, michú, pepo, parapara, amole, boliche, chocolón, chololote, collotomate, jabonera, palo blanco, palo de cuentas, palo de voladillo, silbato y zapotillo (Braz de Oliveira et al.,2014; Almeida et al., 2016; Azevedo et al., 2017; Alencar et al., 2020; Araújo et al.,2021; Kaczorek et al.,2024).

2.1.4 Composición química y estructural del árbol *Sapindus saponaria* L.

El árbol se compone de celulosa, hemicelulosa y lignina, además de otros compuestos producidos como metabolitos secundarios como saponinas, flavonoides, azúcares reductores y taninos, como se muestra en la Figura 2.1.4 (Chen et al.,2020; Abdulrahman et al.,2023; Kaal et al.,2023).

Figura 2.1.4

Estructura general de la saponina.



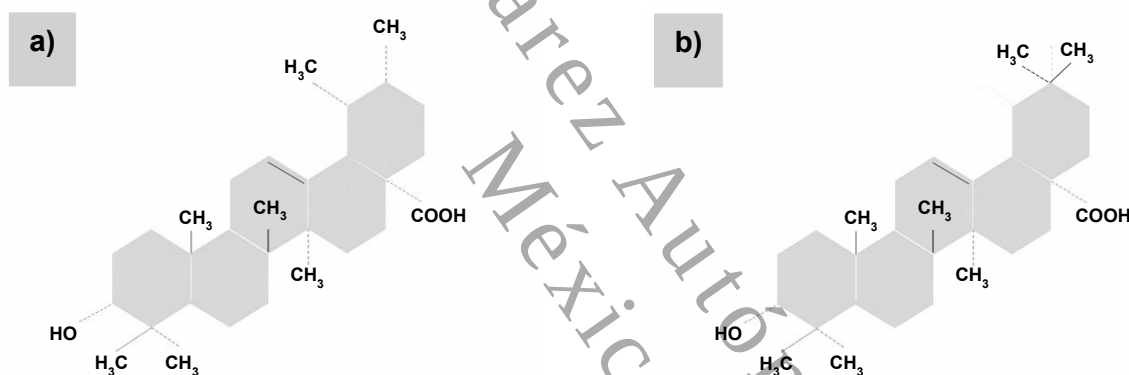
Nota: Se presenta la estructura química representativa de una saponina que se encuentra en partes del árbol, compuesta por un núcleo triterpénico o esteroidal unido a cadenas de azúcares. Esta configuración molecular explica sus propiedades anfipáticas y su relevancia en procesos biológicos y aplicaciones farmacológicas (Kaal et al.,2023).

Las saponinas se encuentran en distintas partes de las plantas como frutos, semillas, cortezas, hojas, tallos y raíces, donde forman parte del sistema de defensa contra patógenos y depredadores. También son llamados como saponinas triterpénicas, están ampliamente distribuidas en el reino vegetal y se presentan en tres estructuras químicas

diferentes con 30 a 45 carbonos como acíclicas como el escualeno, tetracíclicas como el panaxadiol y pentacíclicas como la estallogenina. Estas sustancias pueden presentarse en sus fuentes naturales en forma libre, formando ésteres o como parte de un glicósido (saponina). Además, su nombre se deriva de su capacidad para formar espumas estables en soluciones acuosas. Se caracterizan por una fracción de azúcar que está glucosídicamente unida a una aglicona hidrofóbica llamada sapogenina, que puede ser triterpenoide o esteroides en la naturaleza, tal como se observa en la Figura 2.1.4.1 (Walter, 1925; Popenda & Włodarczyk, 2014; Krause et al, 2024).

Figura 2.1.4.1

Estructura de las saponinas triterpénicas (triterpenoide pentacíclico).



Nota: Se ilustran las estructuras químicas de dos triterpenos pentacíclicos ampliamente distribuidos en especies vegetales: a) el ácido ursólico y b) el ácido oleanólico. Ambos compuestos presentan propiedades bioactivas de interés, incluyendo efectos antiinflamatorios, antioxidantes y potencial farmacológico, lo que justifica su estudio en el marco de la caracterización de metabolitos secundarios (Krause et al, 2024).

Diversos estudios como Aragón et al, 2009; Braz et al, 2014; Blanco et al, 2015; Almeida et al, 2016, reportan los compuestos contenidos en el aceite esencial del fruto del *sapindus saponaria* L., como se muestra en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1

Componentes del aceite esencial de sapindus saponaria L.

Componentes	Concentración (%)
Ácido palmítico	21.23
Ácido linoleico	0.93
Ácido oleico	52.45
Ácido esteárico	6.76
Ácido eicosenoico	4.22
Ácido araquídico	13.32
Ácido behénico	1.09

Nota: La tabla presenta el perfil de ácidos grasos detectados en el aceite esencial extraído de *Sapindus saponaria* L., identificados mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC–MS). Se incluyen los principales compuestos caracterizados, así como su proporción relativa, lo que permite evaluar la composición lipídica y su relevancia en el análisis fisicoquímico del aceite (Aragón et al, 2009; Braz et al, 2014; Blanco et al, 2015; Almeida et al, 2016).

2.2 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL

La extracción de aceite esencial de plantas se realiza por diferentes métodos tradicionales. De acuerdo con lo reportado en literatura, el rendimiento y la calidad del aceite obtenido por los métodos de extracción es un parámetro importante que permite elegir el método apropiado para ser aplicado en diferentes áreas de la industria.

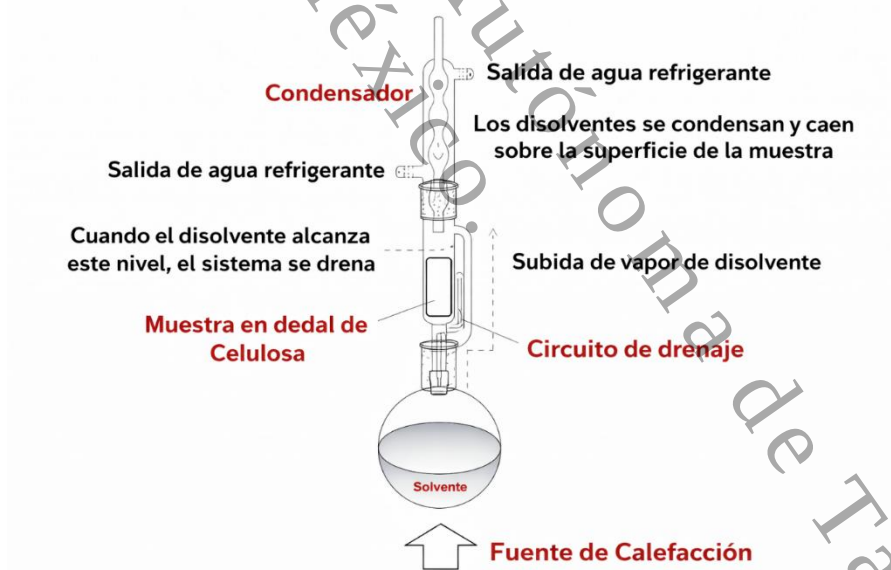
2.2.1 Extracción por soxhlet

La extracción soxhlet es una técnica estándar que se ha utilizado hoy en día. Este método tiene varias ventajas, como extracciones limpias y libres de partículas, equipo simple y facilidad de operación (Bui et al, 2025).

El equipo de extracción soxhlet consta de un condensador, una cámara de extracción, un cartucho de celulosa y un matraz de fondo redondo, tal como se muestra en la Figura 2.2.1. La temperatura de extracción oscila entre 50 °C y 90 °C, y el tiempo de extracción se encuentra entre 5 h y 25 h. El método de extracción soxhlet utiliza disolventes comunes como el etanol, el hexano, el acetato de etilo y el diclorometano. Esta técnica consume una gran cantidad de disolvente, lo que aumenta los costos de extracción. El disolvente ideal debe tener una buena solubilidad hacia el compuesto y un punto de ebullición que permita un ciclado eficiente en el aparato soxhlet. Para facilitar el proceso de extracción, se emplea una parrilla para generar calor y calentar el matraz que contiene el disolvente. Durante la recuperación del disolvente los analitos de la muestra pueden degradarse debido a la exposición prolongada a la temperatura del punto de ebullición del disolvente durante la extracción (Abdeljawad et al, 2024; Bui et al, 2025; Cesaro et al, 2025).

Figura 2.2.1

Esquema del equipo Soxhlet.



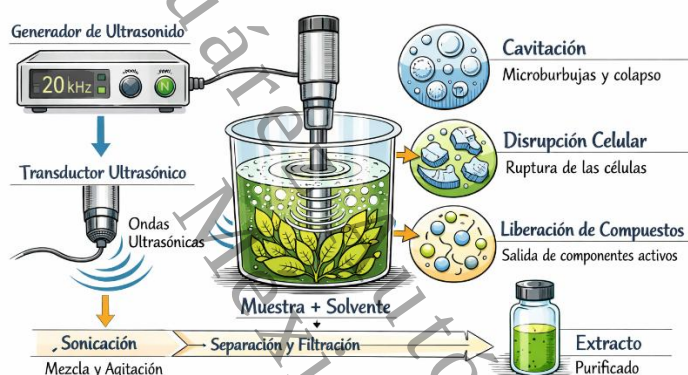
Nota: Se muestra el montaje típico del sistema soxhlet empleado en la extracción de compuestos orgánicos a partir de matrices sólidas. El equipo consta de matraz de destilación, cartucho extractor y condensador, permitiendo la recirculación continua del disolvente hasta lograr una extracción eficiente de los metabolitos presentes en la muestra vegetal (Bui et al, 2025; Cesaro et al, 2025).

2.2.2 Extracción asistida por ultrasonido (EAU)

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) es método tradicional y convencional utilizado en la extracción de compuestos de plantas y frutas. Además, este método permite minimizar el tiempo de extracción y mejora la eficiencia. Tiene tres mecanismos que se encuentran presentes en el proceso de extracción, los cuales son: cavitación, transmisión acústica y calentamiento, tal como se muestra en la Figura 2.2.2. (Aguilar et al, 2020; Barrios et al, 2025).

Figura 2.2.2

Representación de la extracción asistida por ultrasonido (EAU).



Nota: Esquema del proceso de extracción asistida por ultrasonido (EAU), mostrando el generador ultrasónico, la cavitación, la disrupción celular y la liberación de compuestos activos. Ilustración elaborada con asistencia digital (Copilot, 2026).

El método consiste en la propagación de ondas ultrasónicas que van desde 20 kHz a 100 MHz. Esta técnica genera burbujas de cavitación en el disolvente. La formación y el colapso de estas burbujas rompen las paredes celulares, lo que permite que el solvente penetre en la matriz celular de manera más efectiva. El fundamento de este método se basa en la cavitación que se obtiene por la formación, crecimiento y colapso de burbujas de vapor o gas generadas por la acción de las ondas de una frecuencia determinada. La cavitación da paso a una presión negativa a un líquido, las fuerzas intermoleculares de Van der Waals no son lo suficientemente fuertes como para mantener la cohesión y se forman pequeñas cavidades o microburbujas llenas de gas que sufren deformaciones radiales y tangenciales antes de colapsarse de manera adiabática, con un volumen tan

pequeño que la energía del colapso se entrega a un número relativamente pequeño de moléculas. Todos estos fenómenos en conjunto generan una ruptura de la pared celular incrementando la permeabilidad del tejido de las plantas y facilitando la entrada del disolvente al material, provocando el incremento del rendimiento del material que es extraído en un menor tiempo (Aguilar et al, 2024; Ahmad et al, 2024; Jiajia et al, 2025).

La extracción asistida por ultrasonido tiene dos opciones: un sistema de sondas que se sumergen en el sistema líquido-sólido con intensidades muy altas; o bien, indirectamente, con el uso de un baño de agua ultrasónico donde se coloca la muestra en un matraz con el disolvente y las ondas se transfieren a través del agua hasta el material vegetal. A partir de estas técnicas se han logrado obtener polisacáridos como pectinas, aceites esenciales, compuestos bioactivos y proteínas (Aguilar et al, 2020).

2.2.3 Extracción asistida por microondas (EAM)

La extracción por microondas es un método tradicional que se basa en extraer compuestos bioactivos, pigmentos y polisacáridos, entre otros. Una de las ventajas de este método es que requiere de menor tiempo en la extracción, el gasto de disolventes es menor y genera mejor rendimiento en los compuestos de interés. La frecuencia de las microondas oscila entre 300 MHz a 300 GHz, lo que corresponde a longitudes de onda entre 1 metro y 1 milímetro. Algunos organismos de normalización como la International Electrotechnical Commission (IEC) y el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) definen las microondas en un rango más estricto, de 1 GHz a 300 GHz (Hernández et al, 2013; Córdova et al, 2020).

El fundamento de esta técnica se basa en la extracción por disolvente asistida por microondas, en la cual la muestra, cubierta por el disolvente, es irradiada con microondas dentro de un recipiente cerrado, empleando condiciones de alta presión y temperatura para favorecer la liberación de los compuestos de interés. De manera general se conocen tres procesos importantes para la extracción de compuestos por microondas: primero ocurre la separación de solutos mediante temperatura y presión elevada. Segundo, ocurre la difusión del disolvente a través de la muestra y, por último, la liberación de compuestos al disolvente a partir de la muestra evaluada. La generación de ondas electromagnéticas indica el inicio del proceso de extracción permitiendo que las paredes celulares de las

plantas y sus residuos interactúan con las ondas, dando como resultado un calentamiento en la matriz vegetal, lo que ocasiona una hinchazón en sus paredes celulares debido a la presión ejercida, provocando un incremento en la transferencia de masa de los solutos. Por lo tanto, la ruptura de las células es inevitable, liberándose los compuestos hacia el disolvente, tal como se representa en la Figura 2.2.3. (Ortega et al, 2018; Aguilar et al, 2020).

Figura 2.2.3

Representación de la extracción asistida por microondas (EAM).



Nota: Esquema de la extracción asistida por microondas (EAM), mostrando las etapas de calentamiento, agitación y obtención del extracto a partir de muestras vegetales. Ilustración elaborada con asistencia digital (Copilot, 2026).

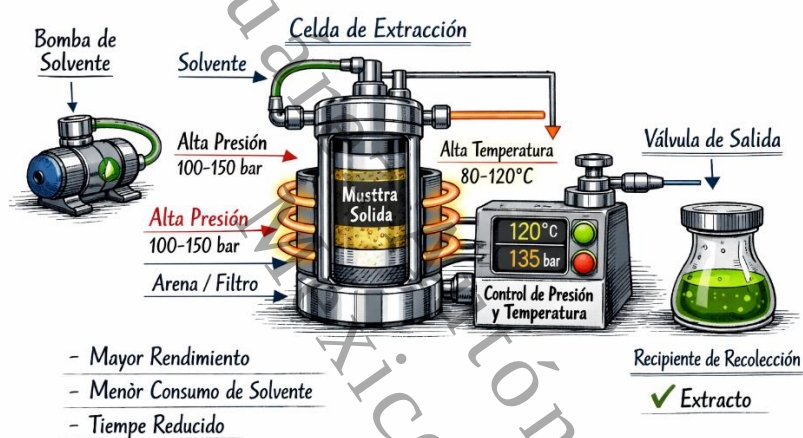
2.2.4 Extracción con líquidos presurizados (PLE)

El PLE es un método de preparación de muestras líquidas o sólidas que se han puesto en forma líquida por disolución o extracción. La temperatura, la presión y el disolvente son parámetros importantes para realizar extracciones eficientes, como se observa en la Figura 2.2.4. Además, los rangos de temperaturas se encuentran de 50 a 200 °C y presión de 30 a 200 bar, lo que permite extracciones con menor tiempo y el uso de cantidades más pequeñas de solventes. Las temperaturas más altas disminuyen la viscosidad del solvente, lo que permite la penetración profunda y sin esfuerzo del solvente en la matriz. El uso de alta presión facilita la entrada del solvente en la matriz y, por lo tanto, contribuye

a un mayor rendimiento de extracción. La selección del disolvente depende del objetivo particular del proceso de extracción; por tanto, el disolvente más adecuado debe elegirse teniendo en cuenta la naturaleza y características de los analitos objetivo. El etanol por su parte es un disolvente ampliamente utilizado en la extracción de flavonoides de distintas matrices vegetales debido a la afinidad que presenta con los flavonoides. Además, una ventaja importante es que los solventes presurizados permanecen en estado líquido, incluso por encima de sus puntos de ebullición (Eraso et al, 2019; Caldas et al, 2025).

Figura 2.2.4

Esquema del método de extracción con líquidos presurizados (PLE).



Nota: La figura muestra los componentes principales del sistema: bomba de solvente, celda de extracción, control de presión y temperatura, válvula de salida y recipiente de recolección. Ilustración elaborada con asistencia digital (Copilot, 2026).

2.2.5 Extracción con CO₂ en estado supercríticos (SFE)

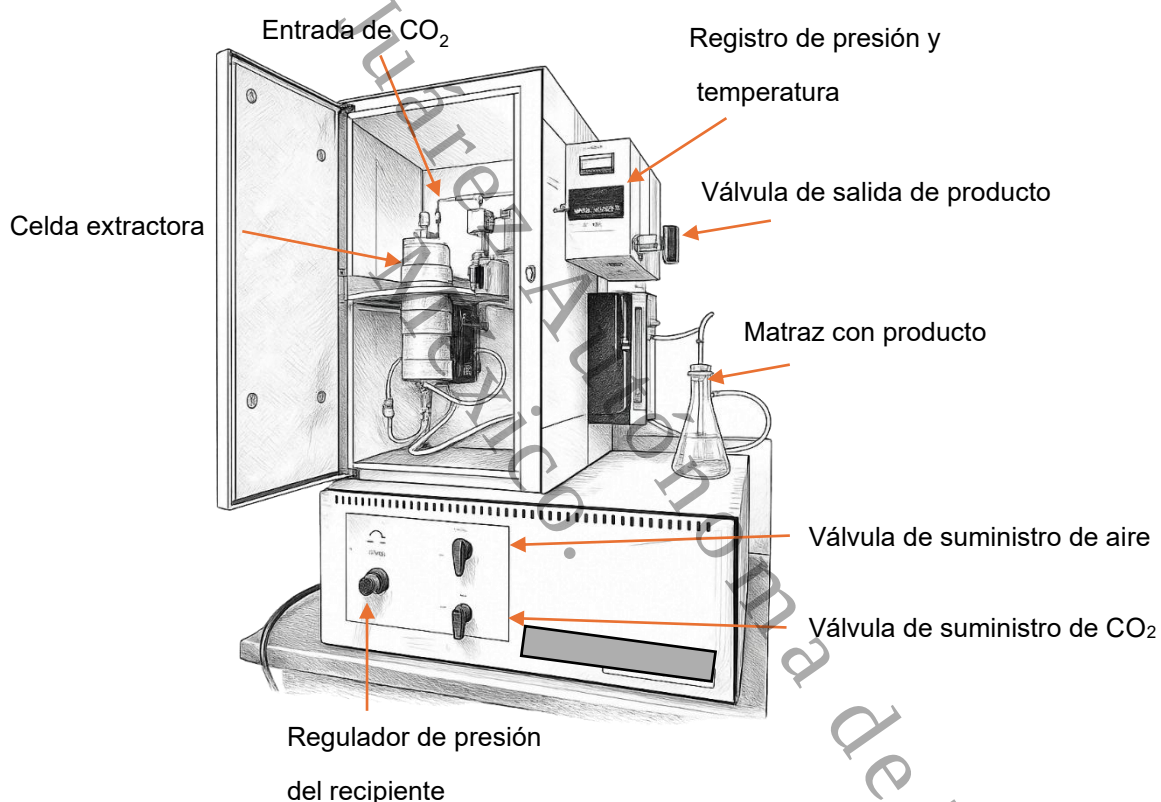
La extracción de fluidos basados en dióxido de carbono supercrítico (SFE), se encuentra ampliamente utilizado en la industria. La SFE es una tecnología amigable con el medio ambiente la cual presenta ventajas sobre otras técnicas de separación, como una separación más rápida, una menor viscosidad y una mayor difusividad en comparación con la extracción orgánica convencional (Su et al 2023; Limtrakarn & Obchoei, 2024).

El equipo de extracción supercrítica con CO₂ consiste en la extracción y separación de la materia con ayuda del disolvente CO₂ supercrítico el cual fluye a través del sólido y disuelve los componentes extraíbles. El disolvente cargado con el extracto se evacúa del

extractor y se alimenta al separador, donde se reduce la presión de manera que el soluto no es soluble y precipita. Además, el soluto se puede separar del disolvente supercrítico por adsorción, absorción o con una membrana. Asimismo, este método permite separar componentes termolábiles a temperaturas más bajas, lo que ayuda a prevenir la degradación térmica de compuestos, tal como se observa en la Figura 2.2.5. (Muangrat, et al, 2024; Kaikonjanat & Muangrat, 2025; Anagha et al, 2025; Bañares et al; 2025).

Figura 2.2.5

Diagrama general del equipo de extracción supercrítica con CO₂.



Nota: Representación esquemática del proceso de extracción supercrítica con CO₂, mostrando las etapas de suministro, presurización, extracción y separación (Kaikonjanat & Muangrat, 2025).

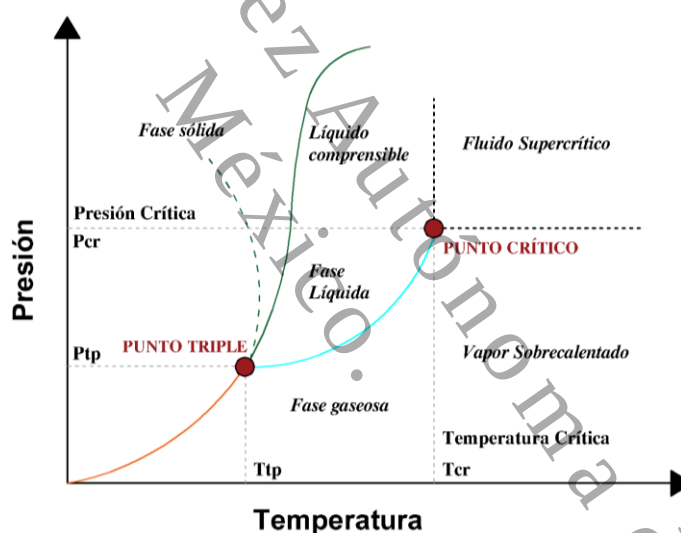
El dióxido de carbono (CO₂) como disolvente inerte es empleado para extraer hasta el 90% de los lípidos, que requiere de parámetros aproximados, por ejemplo, temperatura crítica de 30.95 °C (304.1 K) y presión crítica de 1070.37 psi (7.38 MPa). Además, este método

evita el uso de disolventes nocivos, lo que permite obtener un aceite puro y sin disolventes (Ayala et al, 2016; Bañares et al; 2025).

Un fluido en estado supercrítico (FS) es una sustancia que está por encima de su temperatura crítica (T_c) y presión crítica (P_c), condiciones bajo las cuales no se condensa (al disminuir la temperatura isobáricamente o al aumentar la presión isotérmicamente) ni se evapora (al aumentar la temperatura isobáricamente o al disminuir la presión isotérmicamente), por lo que presenta comportamientos y propiedades físicas diferentes de aquellas de los estados sólido, líquido o gas, como se observa en la Figura 2.2.5.1. (Rojas et al, 2006, Espinoza et al, 2017).

Figura 2.2.5.1

Representación esquemática del equilibrio de fases sólido, líquido y gas.



Nota: Diagrama de fases de una sustancia, mostrando las regiones de estado sólido, líquido y gaseoso, así como las condiciones de fluido supercrítico. Se señalan el punto triple (T_{tp} , P_{tp}), donde coexisten las tres fases, y el punto crítico (T_{cr} , P_{cr}), que marca la transición hacia el estado supercrítico (Espinoza et al, 2017).

El diagrama de fases presenta la zona de presión y temperatura donde la sustancia se encuentra sólida, líquida o gaseosa. La temperatura y presión del punto crítico (C), al final de la curva de presión de vapor, limitan inferiormente la zona supercrítica. Por encima del punto crítico de una sustancia pura no puede existir equilibrio líquido-vapor.

La optimización en la extracción de aceite por el método SFE se debe a los siguientes parámetros, como se observa en la Tabla 2 (Castillo et al, 2010):

Tabla 2.

Condiciones para optimizar el proceso de extracción con fluidos supercríticos.

Condición del material vegetal	Condición de operación
Humedad	Temperatura
Tamaño de partícula	Presión
	Relación del solvente- materia vegetal
	Flujo del solvente
	Tiempo

Nota: Las condiciones en el proceso de extracción permite controlar tanto la eficiencia de extracción como la calidad del producto final (Castillo et al, 2010).

La adición del cosolvente provoca cambios en las propiedades del fluido supercrítico, presentando cierta polaridad, lo que permitirá aumentar su capacidad disolvente. Los cosolventes más empleados son: etanol, metanol, agua, diclorometano, n-hexano y aceites vegetales (Cardona et al., 2016).

2.3 ACEITE ESENCIAL

Los aceites esenciales y los volátiles naturales obtenidos de partes de plantas como semilla, hoja, flor, fruto, corteza y raíz han sido usado como materia prima para ser aplicados en diferentes áreas de la industria como petrolera, alimentaria, farmacéutica, cosmética, entre otros. El perfil químico de un aceite esencial depende del método de extracción como maceración, destilación, extracción por medios mecánicos, extracción

con solventes, extracción asistida por microondas, entre otros (Hzounda et al, 2020; Padilla et al, 2022; Khan et al; 2023).

Los componentes del aceite esencial se clasifican químicamente de acuerdo con cuatro condiciones: origen biosintético primario, tamaño de la molécula o número de átomos de carbono, columna vertebral y carácter de oxidación por átomos electronegativos. Un aceite esencial puede contener de 50 a 300 compuestos químicos, los cuales pertenecen a diversas familias de hidrocarburos como terpenos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos, éteres, ésteres, compuestos fenólicos, entre otros. Además, los aceites esenciales son clasificados por el tipo de sustancias que contienen como monoterpenoides, sesquiterpenoides y fenilpropanoides (Díaz et al, 2015; Aracava et al, 2016; Padilla et al, 2022).

Los aceites esenciales tienen propiedades características como el olor, color, densidad, viscosidad, pH, índice de acidez, entre otros, que determinan la calidad y la aplicación para ser usados en diferentes áreas de la industria. Además de ser usados como antimicrobianos, antiinflamatorios, antioxidantes, antiproliferativos, actividades anticancerígenas, antivirales y hepatoprotectoras (Khan et al; 2023).

2.4 TENSIOACTIVO

La estructura química de los tensioactivos y el mecanismo de su acción permite identificar la elección de los tensioactivos y las condiciones de aplicación requeridas para los diversos campos de estudio como las industrias farmacéuticas, petrolera, de polímeros, cosmética, así como para la biotecnología y la nanomedicina; es decir la emulsificación, la detergencia, la administración de fármacos, los nanomateriales, los cosméticos, el tratamiento de aguas residuales, el procesamiento de alimentos, la recuperación mejorada de petróleo, la solubilización y la purificación química (Magaril & Magaril, 2017; Kang et al, 2020; Khan & Mujeeb, 2025).

Los tensioactivos también llamados surfactantes son compuestos químicos con naturaleza anfifílica con fracciones tanto hidrofílicas como lipofílicas que les permiten adsorberse en las interfaces sólido-vapor, sólido-líquido, sólido-sólido, líquido-vapor y líquido-líquido, formando una monocapa que reduce la tensión superficial o interfacial entre dos o más

fases. La eficacia de los tensioactivos como agentes espumantes está relacionada con su capacidad para reducir la tensión superficial del líquido, la velocidad a la que pueden adsorberse en la interfase y su capacidad para formar películas interfaciales estables y flexibles. Desde luego, el límite para el efecto reductor de la tensión superficial e interfacial del tensioactivo se presenta cuando se inicia con la formación de micelas de una solución (Ahmed et al; 2024, Chen et al; 2025).

Los tensioactivos se clasifican de acuerdo con la carga neta que llevan en sus cabezas hidrofílicas: aniónico (cargado negativamente), catiónico (cargado positivamente), no iónico (sin cargas) y anfótero (cargas negativas y positivas). Los tensioactivos que poseen grupos polares como carboxilato, fosfato, sulfonato y sulfato se clasifican como aniónicos. En soluciones acuosas, la parte hidrofílica de estos compuestos se disocia liberando aniones, lo que les confiere su carácter y comportamiento característico. El detergente es el tensioactivo de mayor producción debido a su amplia aplicación en la sociedad. El tensioactivo catiónico se disocia en cationes. El tensioactivo no iónico tiene como grupo polar una unidad de poliéter o polihidroxilo, además son utilizados en los campos petroleros debido a su capacidad de limpieza. El tensioactivo anfótero se disocia en aniones y cationes a menudo dependiendo del pH (Holmberg et al, 2014; Kang et al, 2020; Chen et al, 2025).

2.4.1 Biotensioactivos

Los tensioactivos producidos a partir de vegetales y microorganismos incluyendo bacterias, hongos y levaduras se denominan biotensioactivos y son menos tóxicos, biodegradables y mejoran el proceso de biodegradación de los contaminantes hidrofóbicos. Los biotensioactivos reducen la tensión superficial e incrementan la disponibilidad de estos líquidos inmiscibles, mejorando así su disponibilidad y eficiencia de biodegradación. Los biotensioactivos se describen como compuestos químicos anfipáticos cuyas moléculas contienen fracciones hidrofóbicas e hidrofílicas. Los biotensioactivos también poseen la capacidad de formar micelas, lo que aumenta el alcance de su aplicación en las industrias agrícola, industrial, alimentaria, médica y cosmética. Además, están compuestos de carbohidratos, lípidos y algunas proteínas. En

función de su composición se clasifica en fosfolípidos, glicolípidos, lipopéptidos y ácidos grasos (Gracida et al, 2010; Kang et al, 2020; Aboel-Ainin et al, 2025; Gayathri et al; 2025).

Los biotensioactivos se han convertido en productos microbianos atractivos en la industria biotecnológica emergente debido a sus ventajas sobre los tensioactivos sintéticos en términos de sostenibilidad ambiental, salud pública mundial y la preocupación de las industrias por producir bienes respetuosos con el medio ambiente (Balderas et al, 2010; Bello et al, 2025).

2.5 BALANCE HIDROFÍLICO-LIPOFÍLICO (HLB)

El balance hidrofílico-lipofílico (HLB) es el equilibrio del tamaño y la fuerza de las fracciones hidrofílicas y lipofílicas de una molécula tensioactiva. La escala HLB es una escala numérica arbitraria entre 0 y 20. Los tensioactivos que son adecuados para su uso en emulsiones agua-aceite (w/o) están en un intervalo de la escala HLB entre 3.5 y 6. Los tensioactivos con valores de HLB en el rango de 8 a 18 son utilizados en emulsiones aceite-agua (o/w), como se muestra en la Tabla 3. (Balderas et al, 2010; Guo et al, 2015; Algethami et al, 2023; Aregbe et al, 2024).

Tabla 3.

Clasificación de los tensioactivos de acuerdo a su valor en la escala HLB.

Rango HLB	Aplicación
4-6	Emulsionantes W/O (agua en aceite)
7-9	Agentes humectantes
8-18	Emulsionantes O/W (aceite en agua)
13-15	Detergentes
10-18	Solubilizantes

Nota: El criterio numérico presentado permite establecer comparaciones objetivas entre distintos tensioactivos, facilitando la evaluación de sus propiedades y su aplicabilidad en procesos industriales (Gadhavé, 2014).

En 1940 William Griffin, propuso el método más conocido para seleccionar un tensioactivo adecuado para una aplicación. Este método asigna al tensioactivo un número de HLB de acuerdo con la estructura química. Los emulsionantes tienen una cabeza hidrofílica que está compuesta por un grupo funcional soluble en agua y una cola lipofílica compuesta de un ácido graso o alcohol graso. Los valores de HLB pueden calcularse teóricamente o determinarse experimentalmente. Las fórmulas para calcular los valores de HLB pueden basarse en datos analíticos o de composición (Genot et al, 2013; Gadhavé, 2014; Jimtaisong & Saengsorn, 2017).

Ecuación para determinar HLB por número de saponificación de un tensioactivo (Genot et al, 2013):

$$HLB = 20 \left(1 - \frac{S}{A}\right) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

S = Masa molecular de la parte lipofílica de la molécula (la fracción apolar, generalmente cadenas hidrocarbonadas).

A = Masa molecular total del surfactante.

El factor 20 corresponde al límite superior de la escala HLB propuesta por Davies (1957), que normaliza el balance hidrofílico-lipofílico en un rango de 0 a 20, siendo un parámetro adimensional.

Las variables S (parte lipofílica) y A (parte total de la molécula) se expresan como proporciones o fracciones moleculares. El resultado es un valor numérico sin unidades, útil para clasificar tensioactivos.

Ecuación para determinar HLB por composición:

$$HLB = \frac{E+P}{5} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

E = Porcentaje en peso de la fracción hidrofílica de la molécula.

P = Porcentaje en peso de la fracción lipofílica

En el método de Griffin (1954), las variables de E y P representan los porcentajes en peso de las fracciones hidrofílica y lipofílica de la molécula, respectivamente. Al tratarse de proporciones relativas, no poseen unidades, y el resultado es un número adimensional en la escala de 0 a 20.

El número HLB ha sido ampliamente utilizado para identificar el comportamiento de las moléculas polares en emulsiones. El valor de HLB se puede determinar por diferentes métodos experimentales, entre ellos se encuentra el método de la resonancia magnética, la ecuación que contiene la suma de los valores de las señales de los hidrógenos de los grupos hidrofílicos y la suma de los valores de las señales de los hidrógenos de los grupos hidrofóbicos. El método de cromatografía de gases, que utiliza el concepto de índice de polaridad (IP) definido por la fórmula teniendo en cuenta el número de carbono (C), es decir, el valor correspondiente al lugar donde aparece el pico de metanol en el cromatograma bajo la influencia de alguna otra sustancia. En el caso de algunos tensioactivos, el HLB se determina en función de la relación entre el contenido de óxido de etileno (E) y el contenido de otros grupos hidrofílicos (P), o la relación entre el número de saponificación (S) de los tensioactivos probados y el número de neutralización de los ácidos grasos (A) (Guo et al, 2006; Bregni et al, 2009; Musiał & Zapolski, 2024).

En 1957, Davies introdujo un método basado en la relación entre los números de HLB y la solubilidad de los agentes emulsionantes en las fases de aceite o agua. Propuso que los valores de HLB de los agentes tensioactivos podrían calcularse a partir de fórmulas químicas utilizando el concepto de contribución de grupos (Jia et al, 2019).

Ecuación por el método de Davies:

$HLB = 7 + \text{contribución de grupos hidrofílicos} - \text{contribución de grupos lipofílicos}$

Ec. 3

Donde las contribuciones de los grupos hidrofílicos y lipofílicos corresponden a la siguiente Tabla 4.

Tabla 4.

Número de grupo HLB para calcular el HLB por el método de Davies (1957).

Grupos hidrófilos	Número de grupo
-SO ₄ Na	38.7
-COOK	21.1
-COONa	19.1
-N (amina terciaria)	9.4
-Ester (sorbitán)	6.8
-(CH ₂ -CH ₂ -O)-	0.33
Ester libre	2.4
-COOH	2.1
-OH libre	1.9
-O-	1.3
-OH (sorbitán)	0.5
-CH ₂ -CH(CH ₃)-O-	0.15
Grupos lipofílicos	
-CH-	0.475
-CH ₂ -	0.475
CH ₃ -	0.475
=CH-	0.475

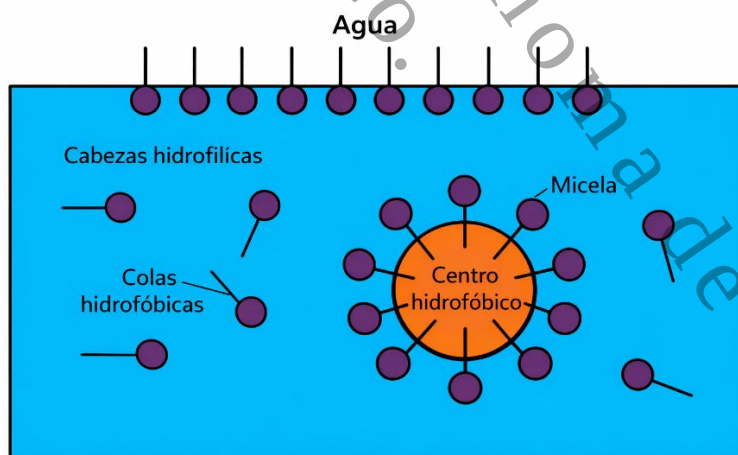
Nota: El número HLB como parámetro adimensional refleja el balance hidrofílico–lipofílico de un tensioactivo, se calcula a partir de la contribución de los grupos funcionales presentes en la molécula, asignando valores específicos a las fracciones hidrofílicas y lipofílicas (Jia et al, 2019).

2.6 CONCENTRACIÓN MICELAR CRÍTICA (CMC)

La concentración micelar crítica (CMC) es una propiedad específica de cada tensioactivo. La CMC es la concentración de tensioactivo en agua, por encima de la cual las micelas comienzan a formarse espontáneamente. Las micelas son agregados de monómeros surfactantes con sus cabezas hidrofóbicas dispuestas en la periferia exterior y las colas hidrofílicas colocadas en el centro, tal como se observa en la Figura 2.6. Los valores de CMC y la adición de más surfactante no afecta en la reducción de la tensión superficial, ya que tensioactivos con un CMC baja se consideran ventajosos en comparación con aquellos con valores de CMC más altos (Balderas et al, 2010; Sarubbo et al, 2022; Carmona et al, 2024).

Figura 2.6.

Formación de micelas



Nota: Las micelas se forman cuando la concentración de un tensioactivo en agua supera la concentración micelar crítica (CMC). En ese punto, las moléculas se organizan donde las cabezas hidrofílicas quedan orientadas hacia el agua y las colas hidrofóbicas se

agrupan en el interior, creando estructuras esféricas que permiten solubilizar compuestos lipofílicos (Sarubbo et al, 2022 & Carmona et al, 2024).

La CMC de los tensioactivos en disolución acuosa varía con su estructura, la temperatura de la solución, la presencia de compuestos orgánicos o electrolitos entre otros (Andersson et al, 2022).

2.7 Tensión Superficial

La tensión superficial (σ) es la tensión interfacial entre una fase sólida o líquida y su propio vapor. La tensión superficial es la tensión de la película superficial de un líquido causada por la atracción de las partículas en la capa superficial por la mayor parte del líquido. Las fuerzas de atracción que actúan entre moléculas del mismo tipo se denominan fuerzas cohesivas, mientras que las que actúan entre moléculas de diferentes tipos se denominan fuerzas adhesivas. Asimismo, la tensión superficial depende de las fuerzas intermoleculares en un líquido. La tensión superficial es importante en fenómenos naturales y en aplicaciones industriales. Las fuerzas desequilibradas de las moléculas en la interfaz dan como resultado la fuerza de tensión superficial. La fuerza de tensión superficial es uno de los factores más importantes que determinan el comportamiento de las gotas y las burbujas de un líquido. La tensión superficial puede determinarse mediante métodos experimentales, simulación y procedimientos teóricos (Cen et al, 2024; Hassanizadeh, 2024; Khordad, 2025).

La tensión superficial aumenta a medida que aumenta la atracción intermolecular y disminuye el tamaño molecular. Los aceites esenciales tienen una tensión superficial de $\sigma=20$ dinas/cm hasta 62 dinas/cm aproximadamente. El agua de $\sigma=70$ dinas/cm y tensiones superficiales más altas para metales líquidos. La tensión superficial (σ) tiene unidades de fuerza/longitud o energía/área, por lo que puede considerarse como una presión superficial negativa. La importancia de la tensión superficial en relación con la gravedad y las tensiones viscosas está prescrita por las magnitudes relativas de los números de Weber, Froude y Reynolds. Los métodos para determinar la tensión superficial se clasifican en métodos para sólidos y líquidos. La tensión superficial de los líquidos se determinan por el método del anillo de Du Noüy y placa de Wilhelmy. Los métodos de ángulo de contacto se utilizan para medir la tensión superficial de los sólidos, ya que no

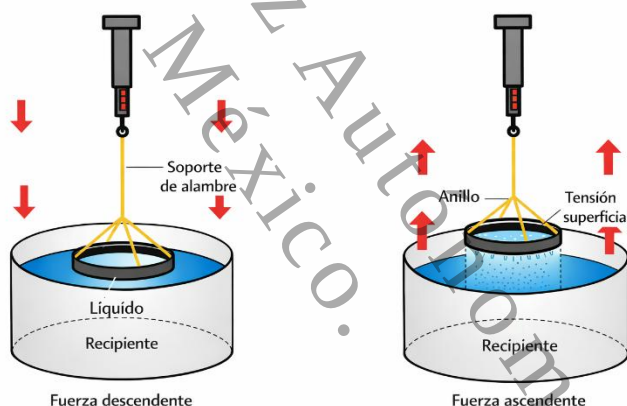
se pueden medir directamente (Direktor et al, 2010; Ebnesajjad, 2011; Esmaeili & Hashemipour, 2018).

2.8 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL MEDIANTE EL ANILLO DE PLATINO DU NOÜY

El método de anillo de platino Du Noüy es una técnica utilizada para medir la tensión superficial en líquidos. Este método se basa en tirar de un objeto con una geometría definida de la superficie de los líquidos y medir la fuerza de tracción, tal como se observa en la Figura 2.8. Esta técnica se conoce como método de fuerza de tracción (Chan et al, 2012; Ebnesajjad, 2014; Leneweit et al, 2020).

Figura 2.8

Ilustración de tiramiento de anillo para medición de la tensión superficial.



Nota: La ilustración muestra el principio de medición de la tensión superficial, determinada a partir de la fuerza máxima ejercida sobre la película líquida antes de su ruptura. Este parámetro refleja la cohesión molecular en la interfase y constituye un indicador fundamental de las propiedades físicoquímicas del sistema (Leneweit et al, 2020).

La medición de la tensión superficial se realiza por un tiramiento lineal que se encuentra sujeto a un anillo que se sumerge en un líquido mediante una balanza. Cuando el anillo o placa es humedecido por el líquido, el líquido se adhiere y como resultado de las fuerzas capilares, se eleva en su superficie aumentando el área de interfase. Esta fuerza está directamente relacionada con la tensión superficial y se puede medir mediante una

balanza. La balanza se utiliza para medir el peso que un líquido fuerza sobre el anillo Du Noüy al sacarlo del medio líquido. La tensión superficial se define como la fuerza que actúa en ángulo recto con respecto a cualquier línea de unidad de longitud en la superficie del líquido (Subba & Zettlemyer, 1969; Lunkenheimer & Wantke, 1978; Fal et al, 2021).

La tensión superficial se determina mediante siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{mg}{4\pi R} f$$

Ec.4

Donde:

m = masa del líquido elevado por encima de la superficie libre del líquido (es la masa máxima tirado, g).

R = Radio del anillo medido desde el centro del anillo hasta el centro del alambre.

f = Este dato se obtiene de tablas en relación con R^3/V y el factor r/R del anillo de platino Du Noüy (Harkins & Jordan, 1930).

g = Es la gravedad local en este caso Ciudad de México ya que en esta localidad se realizó la actividad experimental (cm/s^2).

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

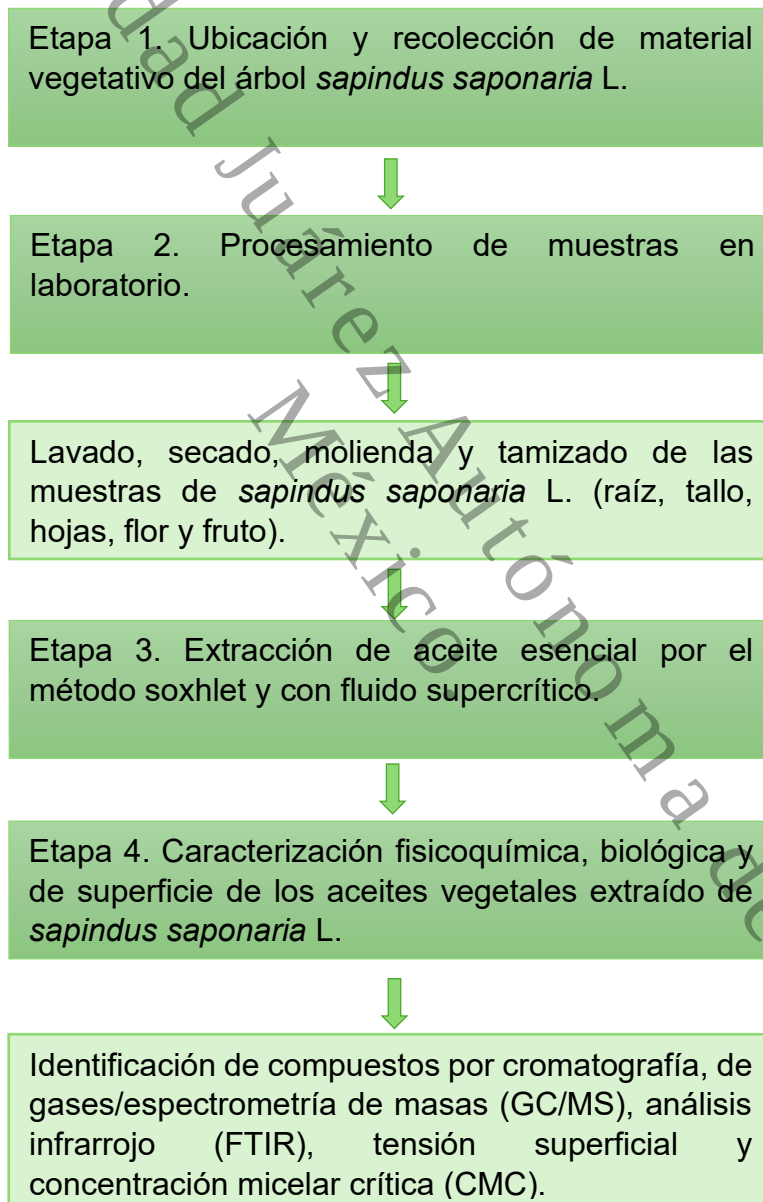
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

3.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para cumplir con el objetivo planteado, esta investigación se desarrolló en 4 etapas como se muestra en la figura 3.1.

Figura 3.1.

Etapas del desarrollo experimental.



3.2 ETAPA 1. UBICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE MATERIAL VEGETAL DEL ÁRBOL *SAPINDUS SAPONARIA* L. (RAÍZ, TALLO, HOJAS, FLOR Y FRUTO)

3.2.1 Descripción del sitio

El muestreo del material vegetal del árbol *sapindus saponaria* L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) se realizó a orillas de la carretera donde se encontraba el árbol en el Ejido San Hipólito del municipio de Jalpa de Méndez, Tabasco. Las coordenadas geográficas son: 18°07'13.6"N 93°07'17.1"W, como se muestra en la Figura 3.2.1.

Figura 3.2.1

Lugar de recolección



Nota: La Chincheta color rojo que aparece en la imagen es la ubicación exacta del *sapindus saponaria* L. Google. (s.f.). [Ubicación del árbol *sapindus saponaria* L.]. Consultado el 10 de octubre de 2022 en <https://maps.app.goo.gl/SUQAvLk2ysD21Wa47>

3.2.2 Recolección del material vegetal del árbol *sapindus saponaria* L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto)

Las muestras recolectadas se trasladaron al laboratorio de biotecnología de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco en una nevera y envueltas en bolsas de papel estraza para

evitar su rotura o deterioro, de acuerdo con la norma MX-0-310399-52-03- 13-12-24 (SAGARPA, 2012). Con respecto a las raíces, se recolectó también el suelo que la acompaña. El tejido vegetal no requirió ser lavado ni se adicionó ninguna sustancia para su conservación, como se observa en la Figura 3.2.2. (SAGARPA, 2022).

Figura 3.2.2

Ubicación y recolección de material vegetativo del árbol Sapindus saponaria L.



Nota: Proceso de colección de material vegetal: a) Ubicación del *sapindus saponaria* L., b) Recolección de muestras. y c) Fruto del *sapindus saponaria* L.

3.3 ETAPA 2. PROCESAMIENTO DE MUESTRAS DE LAS DIFERENTES PARTES DEL ÁRBOL SAPINDUS SAPONARIA L. EN EL LABORATORIO

3.3.1 Lavado y secado de material vegetal

La raíz, tallo, hojas, flor y fruto del árbol *sapindus saponaria* L. se limpiaron con agua de grifo hasta retirar impurezas. Posteriormente, las muestras se deshidrataron en un horno (NOVATECH NOT-HS35-AID) a 50 °C durante 48 h, tal como se observa en la Figura 3.3.1.

Figura 3.3.1

Lavado y secado de muestras del sapindus saponaria L.



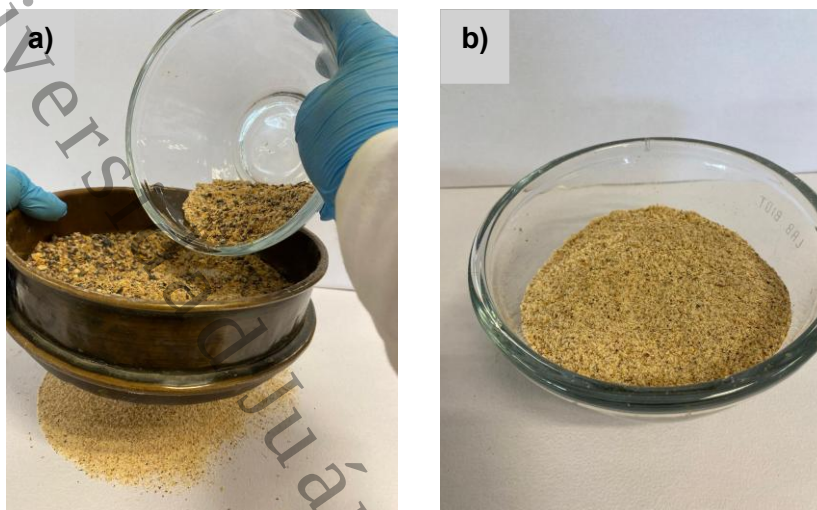
Nota: Proceso del material vegetal: a) Retiro de impurezas. b) Secado de material vegetal.

3.3.2 Molienda y tamizado del material vegetal

Las partes del árbol *sapindus saponaria* L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) por separado se sometieron a un proceso manual de reducción de tamaño por molienda en un molino de discos. Posteriormente, las partículas fueron tamizadas a través de diversos números de tamices: No. 20 (0.84 mm), No. 10 (2 mm) y No. 4 (4.75 mm), tal como se muestra en la Figura 3.3.2. La reducción de tamaño de las partículas se realizó con la finalidad de incrementar el área superficial y obtener un mayor rendimiento en el proceso de extracción del aceite esencial (Almeida et al., 2021).

Figura 3.3.2

Proceso de tamizado de muestras del sapindus saponaria L.



Nota: Proceso de reducción de partículas del material vegetal: a) y b) Tamizado del material vegetal.

3.4 ETAPA 3. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE LAS PARTES (RAÍZ, TALLO, HOJAS, FLOR Y FRUTO) DEL ÁRBOL *SAPINDUS SAPONARIA* L.

3.4.1 Extracción de aceite esencial del *sapindus saponaria* L. por el método de extracción supercrítico con CO₂.

La extracción del aceite esencial (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) se realizó de acuerdo con el diseño experimental establecido. Las variables del proceso se eligieron en un intervalo de 37 a 52 °C como temperatura de operación y 3792 a 5207 psi como presión de operación a partir del punto crítico del solvente (CO₂). Estas condiciones de operación fueron establecidas con base en publicaciones (Deng et al., 2023; Favén et al., 2023; Goud & Moges, 2023; Kittl et al., 2023; Ali et al., 2022; Amat et al., 2022; Meniai et al., 2022 y Amat et al., 2021).

Una muestra de 30 g de material triturado de la raíz, tallo, hojas, flor y fruto (por separado) fue empacada en el extractor de alta presión (SFT-150 SFE SYSTEM), con un flujo de solvente que osciló entre 1.0 - 1.5 L/min. Se manejaron dos tipos de extracción, dinámica

y estática. Las variables del proceso de extracción fueron: temperatura (35 a 55 °C) y presión (3000 a 5000 psi). El aceite obtenido se guardó en un recipiente para su conservación en refrigeración a 4 ± 1 °C hasta su caracterización, como se observa en la Figura 3.4.1 (Daood et al., 2008, Bombardelli et al., 2018, Carrera, 2019).

Para determinar el rendimiento en la extracción se aplicó la ecuación (ec. 5):

$$\gamma = \frac{M_{extracto}}{M_{muestra}} \times 100 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

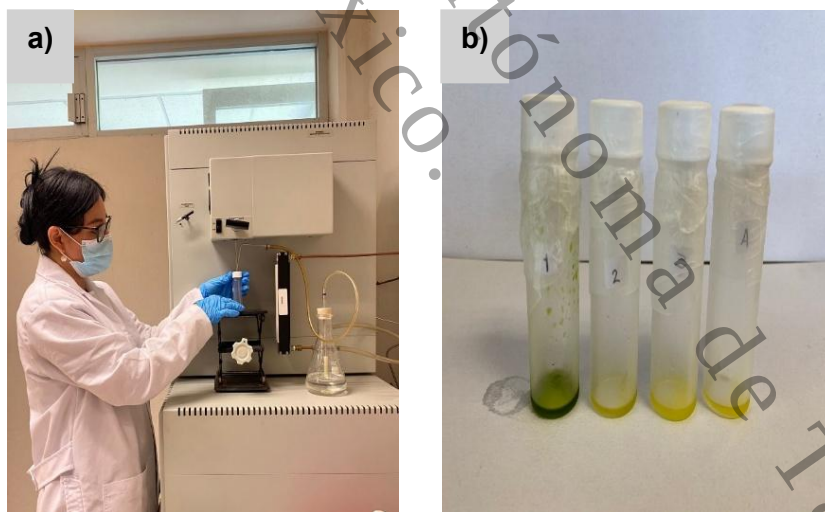
γ = Rendimiento de la extracción en %

$M_{extracto}$ = Cantidad de extracto obtenido en g

$M_{muestra}$ = Cantidad de muestra inicial en g

Figura 3.4.1

*Extracción de aceite esencial del árbol de *sapindus saponaria* L. por el método supercrítico con CO₂.*



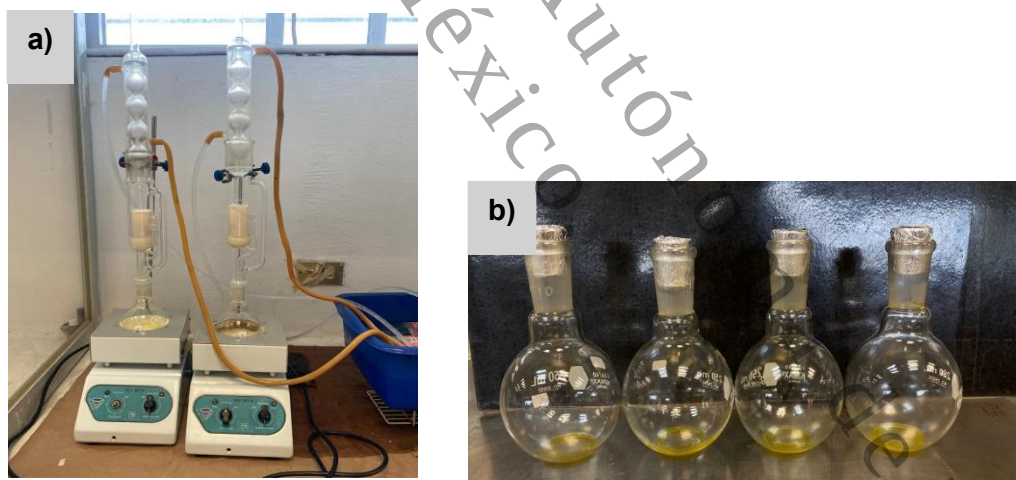
Nota: Se observa el equipo empleado para la extracción: a) Obtención de aceite esencial del *sapindus saponaria* L. en el equipo supercrítico con CO₂ y b) Muestras de aceite esencial de las diferentes partes del *sapindus saponaria* L.

3.4.2 Extracción de aceite esencial del *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%

La extracción del aceite esencial del material vegetal de *sapindus saponaria* L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto, por separado) se realizó por el método soxhlet utilizando una masa de 30 g de muestra y 200 mL de hexano al 99 % (marca meyer) como solvente. La variable del proceso de extracción fue la temperatura a 68 °C. Asimismo, para recuperar el solvente se utilizó un rotavapor (modelo R52) a una temperatura de 55 °C conectada a una bomba de vacío a 200 mm Hg. El proceso de eliminación de solvente se mantuvo hasta que el aceite quedó libre del mismo; el aceite recuperado se guardó en un recipiente para su conservación en refrigeración a 4 ± 1 °C hasta su caracterización, tal como se ilustra en la Figura 3.4.2.

Figura 3.4.2

Extracción de aceite esencial del árbol de sapindus saponaria L. por el método soxhlet con hexano al 99%.



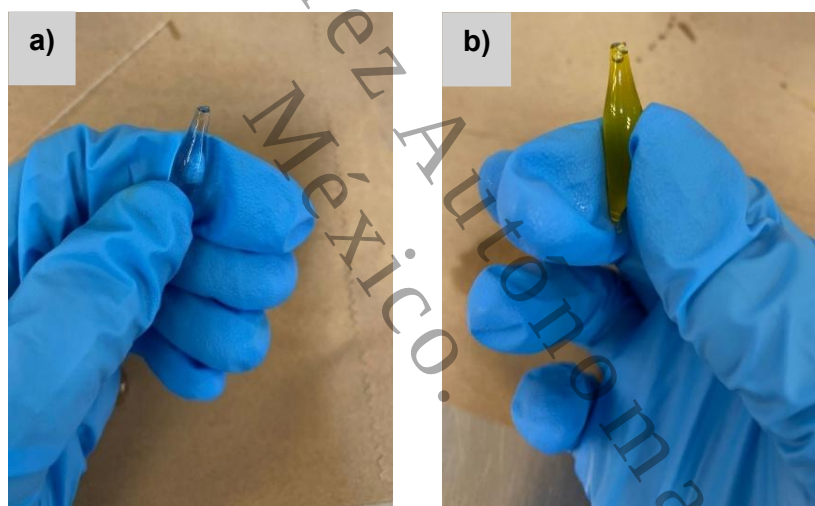
Nota: Extracción de aceite: a) Proceso de extracción de aceite esencial de *sapindus saponaria* L. en equipo soxhlet y b) Aceite esencial extraído de las diferentes partes de *sapindus saponaria* L. por soxhlet con hexano al 99%.

3.5 ETAPA 4. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE ACEITE ESENCIAL DE LAS PARTES (RAÍZ, TALLO, HOJAS, FLOR Y FRUTO) DEL ÁRBOL *SAPINDUS SAPONARIA* L.

3.5.1 Determinación de la densidad del aceite extraído del *sapindus saponaria* L.

La densidad del aceite extraído (raíz, tallo, hojas, flor y fruto, por separado) fue determinada con base en la norma NMX-F-075-SCFI-2012 “Alimentos aceites y grasas vegetales o animales, determinación de la densidad relativa-método de prueba” (cancela a la NMX-F-075-SCFI-2006), aplicando el método del picnómetro, como se observa en la Figura 3.5.1. (Cardona et al., 2016).

Figura 3.5.1 Determinación de la densidad del aceite esencial extraído de *sapindus saponaria* L.



Nota: Procedimiento cuantitativo: a) Micropicnómetro con agua. b) Micropicnómetro con aceite.

Una vez realizadas las mediciones correspondientes, la densidad se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{\text{líquido de interés}} = \frac{m_{\text{picnómetro+líquido}} - m_{\text{picnómetro vacío}}}{m_{\text{picnómetro+agua}} - m_{\text{picnómetro vacío}}} \times \rho_{\text{agua}} \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

$m_{\text{picnómetro+líquido}}$ = Masa en g del picnómetro más el aceite esencial

$m_{\text{picnómetro vacío}}$ = Masa en g del picnómetro vacío

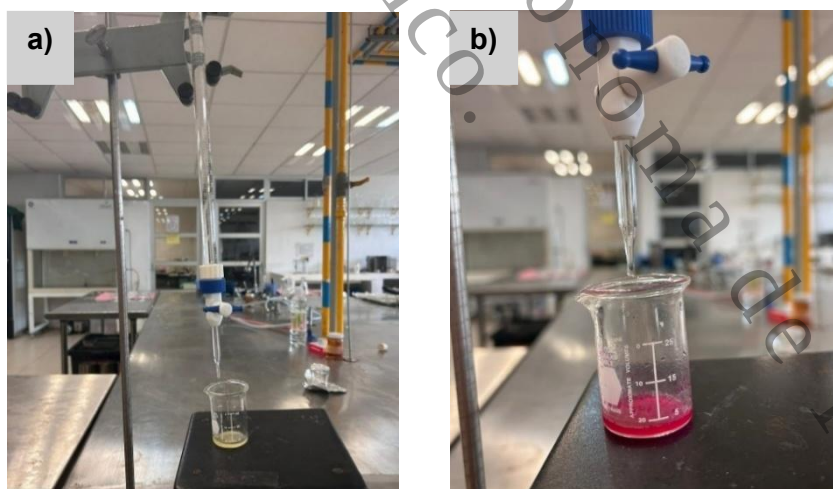
$m_{\text{picnómetro+agua}}$ = Masa en g del picnómetro con agua destilada

ρ_{agua} = Densidad del agua en g/cm³

3.5.2. Determinación de ácidos grasos del aceite del *sapindus saponaria* L.

En un vaso de precipitado de 50 mL se colocaron 0.315 g de aceite extraído (raíz, tallo, hojas, flor y fruto por separado) de *sapindus saponaria* L., 0.625 mL de etanol al 99%, 3 gotas de fenolftaleína y se agitó para garantizar la solubilidad de todos los ácidos grasos libres. Después, en una bureta de 25 mL se colocó una solución 0.1 N de NaOH. La determinación de ácidos grasos se realizó por titulación de la solución contenida en la bureta y agitando continuamente el vaso de precipitado hasta alcanzar un color rosa permanente. En ese momento se cierra la llave de la bureta y se miden el volumen de NaOH consumido, tal como se observa en la Figura 3.5.2. (Miranda et al.; 2016; Góngora et al.; 2023).

Figura 3.5.2 Determinación de ácidos grasos del aceite esencial extraído del *sapindus saponaria* L.



Nota: Ilustración del proceso: a) Método de titulación. b) Resultado final de la titulación.

La medición y cálculo se realizaron de acuerdo con la norma NMX-F-101-SCFI-2012, ALIMENTOS-ACEITES Y GRASAS VEGETALES O ANIMALES– DETERMINACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS LIBRES - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-F-101-SCFI-2006).

El % de ácidos grasos libres como ácido oleico se expresa normalmente con el factor 28.2 (cuando se usa KOH). Si se usa NaOH, el factor debe ajustarse por la relación de pesos moleculares, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Factor NaOH} = 28.2 \times \frac{pm \text{ NaOH}}{pm \text{ KOH}}$$

La siguiente ecuación permitió el cálculo del % de ácidos grasos:

$$\text{Ácidos grasos libres como oleico, en \%} = \frac{V \times N \times \text{Factor NaOH}}{Pm} \quad \text{Ec. 7}$$

En donde:

N = Es la normalidad de la solución de hidróxido de sodio (NaOH).

V = mL de solución valorada de hidróxido de sodio (NaOH) gastados en la titulación de la muestra.

Pm = Es la masa de la muestra en g.

De acuerdo a la norma mencionada anteriormente, los ácidos grasos libres son expresados frecuentemente en términos de valor ácido o índice de acidez, en vez de porcentaje de ácidos grasos libres. El valor ácido es definido como el número de miligramos de NaOH necesario para neutralizar un gramo de muestra.

3.6 IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS DEL ACEITE ESENCIAL DE LAS PARTES (RAÍZ, TALLO, HOJAS, FLOR Y FRUTO) DEL ÁRBOL *SAPINDUS SAPONARIA* L.

3.6.1 Análisis por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GCMS) del aceite extraído del *sapindus saponaria* L. por los siguientes métodos: extracción con CO₂ en estado supercrítico (SFE) y soxhlet con hexano al 99%.

Los componentes del aceite extraído (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del *sapindus saponaria* L. se identificaron mediante un cromatógrafo de gases/espectrómetro de masas (marca SHIMADZU, modelo GCMS-QP2010 Ultra). Para el análisis de cada muestra se preparó en un vial 0.1 g de aceite y se aforó a 1.5 mL con alcohol etílico grado HPLC al 99%.

Asimismo, en la separación de los compuestos se utilizó una columna SH-Rxi-5Sil MS de 30 m de largo x 0.25 mm de diámetro, recubierta con una película de 0.25 μm de 5% fenil y 95% dimetil polisiloxano. Las condiciones de análisis fueron las siguientes: helio como gas portador a un caudal de 1.58 mL/min, 250 °C como temperatura del inyector, volumen de inyección de 1 μL , relación de división 20:1 (se refiere a la inyección a 20 partes que va a la purga y 1 parte a la columna), temperatura programada a partir de 70 °C aumentando a 10 °C/min hasta alcanzar una temperatura de 300 °C. La energía de ionización fue de 0.96 kV. El rango de masa de barrido fue de 35-600 m/z (Carrera, 2019).

3.6.2 Análisis por infrarrojo del aceite extraído del *sapindus saponaria* L. por los siguientes métodos: extracción supercrítico con CO₂ (SFE) y soxhlet con hexano al 99%.

La muestra de aceite extraído (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del *sapindus saponaria* L. se analizó en el equipo NICOLET iS50 FT-IR mediante técnica ATR, con un intervalo de longitud de onda de 4000 a 400 cm^{-1} , 32 barridos y 8 de resolución. Para identificar los grupos funcionales presentes en la muestra el KBr (Sigma Aldrich 99 %) se mezcló con 10 μL de aceite, de acuerdo con las rutinas analíticas de la ASTM E1252-98. Los datos obtenidos se procesaron en el software IR Solution (Del ángel et al., 2018).

3.7 CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIE DEL ACEITE ESENCIAL DE LAS PARTES (RAÍZ, TALLO, HOJAS, FLOR Y FRUTO) DEL ÁRBOL *SAPINDUS SAPONARIA* L.

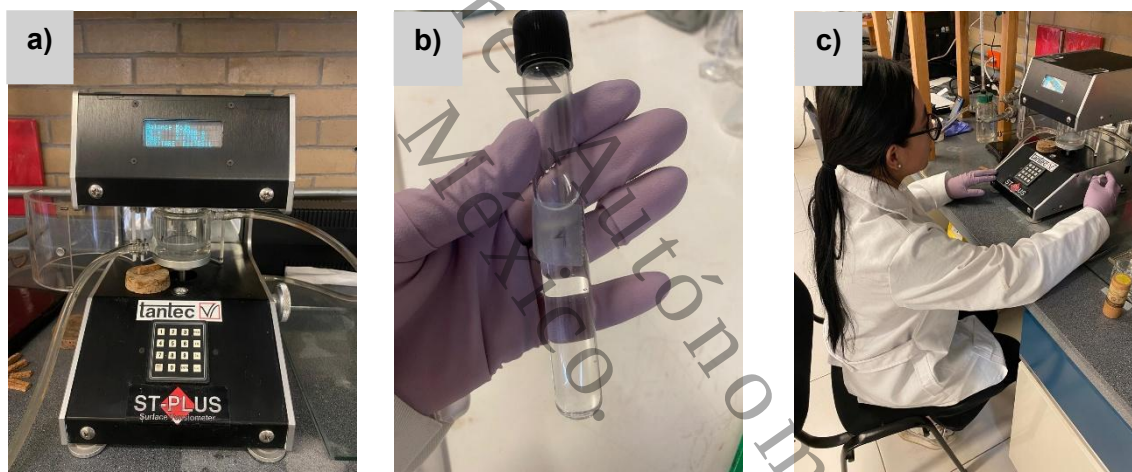
3.7.1 Determinación de la tensión superficial del aceite extraído del *sapindus saponaria* L. por el método de anillo de Du noüy

Para la medición se prepararon soluciones con diferentes concentraciones de aceite esencial extraído (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) del *sapindus saponaria* L. y agua desionizada para ver a que concentración es soluble el aceite y obtener la curva de tensión superficial en función de la concentración. Las condiciones para el manejo del equipo tantec (ST-PLUS) Surface tensiometer son las siguientes: El baño de control de temperatura (recirculador de agua) LAUDA (ALPHA RA 8) a una temperatura del agua a 25.4 °C. en agua bidestilada y el anillo de platino Du Noüy (SC SCIENTIFIC COMPANY

INC.) (perímetro de la circunferencia 5.992 cm, factor r/R 53.6, material aleación de platino/iridio). En el equipo tantec (ST-PLUS) Surface tensiometer, se colocó una celda que contenía la muestra a analizar aceite-agua a la cual se le determinó tensión superficial, el anillo de platino Du Noüy se montó en un gancho debajo del equipo el cual quedó colgando para realizar la medición. Después de haber introducido el anillo por arriba de la superficie de la muestra que se encuentra en la celda se espera 1 h hasta llegar al equilibrio térmico. La medición se realizó cuando se empieza a descender o deformar el líquido con el anillo Du Noüy, obteniendo la masa máxima, tal como se observa en la Figura 3.7.1.

Figura 3.7.1

Medición de la tensión superficial del aceite extraído del sapindus saponaria L.



Nota: Proceso para la determinación de la tensión superficial: a) Equipo tantec (ST-PLUS) Surface tensiometer. b) Preparación de muestra aceite-agua. c) Proceso de medición de la tensión superficial de la muestra aceite-agua.

La tensión superficial se determinó mediante siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{mg}{4\pi R} f$$

Ec. 8

Donde:

m es el peso máximo tirado, g es la gravedad local (977.94 cm/s^2), R es el radio del anillo y f es un factor de corrección para ajustar las diferencias derivadas de las dimensiones del anillo (R^3/V ; donde V es el volumen máximo tirado por el anillo) obtenido de tablas (Harkins & Jordan, 1930) (Anexo D.1). Se registraron los datos de tensión superficial (Abascal & Gracia, 2009).

3.7.2 Determinación de la concentración micelar crítica (CMC) del aceite extraído del *sapindus saponaria* L.

La CMC se determinó con los datos obtenidos de la tensión superficial. Las mediciones de las tensiones superficiales se realizaron a diferentes diluciones del aceite en agua hasta obtener valores constantes en masa (Bregni & Pasquali, 2006; Durval et al., 2018).

3.7.3 Identificación de saponinas en los extractos del aceite extraído del *sapindus saponaria* L.

La identificación de saponinas en el aceite se determinó mediante reacciones químicas que generan productos coloreados, lo cual permite identificar metabolitos. Así mismo, las reacciones de identificación son:

3.7.3.1 Las reacciones de Salkowski

En un tubo de ensayo se agregó 1 mL de aceite extraído y se le añadió 2 mL de cloroformo (99%). Se agitó lentamente hasta disolver y se añadió 2 mL de H_2SO_4 (99%) por la pared del tubo. La aparición de coloración rojizo indica un resultado positivo, asociada a la presencia de compuestos esteroidales, en especial esteroides como colesterol y fitosteroides en una muestra (Cuyos et al.; 2005; Usiña, 2017; Góngora-Chi et al.; 2023).

3.7.3.2 Reacción de Lieberman-Burchard

En un tubo de ensayo se agregó 1 mL de aceite extraído y se le añadió 2 mL de cloroformo (99%). Se agitó suavemente y se añadió 2 mL de anhídrido acético (99%). Y se añadió lentamente 2 mL de H_2SO_4 (99%). La aparición de un color anaranjado indicó la presencia de saponinas y triterpenos oxidados (Cuyos et al.; 2005; Usiña, 2017; Góngora-Chi et al.; 2023).

3.8 DETERMINACIÓN DEL BALANCE HIDRÓFILO-LIPOFÍLICO (HLB) DEL ACEITE ESENCIAL DE LAS PARTES (RAÍZ, TALLO, HOJAS, FLOR Y FRUTO) DEL ÁRBOL *SAPINDUS SAPONARIA* L.

El método de contribución grupal de Davies determina el valor de equilibrio hidrófilo-lipófilo (HLB) y se calcula mediante el resultado con mayor porcentaje en concentración de la muestra o por los componentes presentes en la mezcla identificado por cromatografía del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L., como se muestra en la Tabla 5. (Guo et al.; 2006; Bregni & Pasquali; 2006; Jia et al.; 2019; Huan et al.; 2019).

De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$HLB_{mezcla} = \sum f_i \times HLB_i \quad \text{Ec. 9}$$

$$HLB = HLB_1/HLB (It) \quad \text{Ec.10}$$

Donde:

f_i = Representa la fracción másica de cada compuesto.

HLB_i = Es el valor individual, con base en el método de contribución grupal de Davies.

Tabla 5.

Tabla de valores para grupos hidrofílicos y lipofílicos para el método de Davies del ácido oleico (Davies, 1957, p. 440).

Grupo	Número de grupo HLB
Lipofílicos	
-CH-	0.475
=CH-	0.475
CH ₃ -	0.475
Hidrófilos	
-COOH	2.1

Nota: Los siguientes valores de grupo HLB se obtienen por la estructura del ácido oleico.

3.9 CARACTERIZACIÓN BIOLÓGICA DEL ACEITE ESENCIAL DE LAS PARTES (RAÍZ, TALLO, HOJAS, FLOR Y FRUTO) DEL ÁRBOL *SAPINDUS SAPONARIA* L.

3.9.1 Determinación de la concentración letal media (CL₅₀) del aceite del *sapindus saponaria* L. en lombrices *eisenia foetida* (lombriz roja de california).

3.9.1.1 Lombrices

Los bioensayos con lombrices son ampliamente reconocidos como prueba para evaluar la toxicidad de suelos contaminados (Fragoso, 2002; Dorn et al. 2002; Wilson et al. 2002; Ramírez & Mendoza, 2008; Mena, 2014; Arriola et al. 2016). Para este análisis se adquirió la cantidad de 130 lombrices adultas (cliteladas) con un peso promedio de $0.28 \text{ g} \pm 0.05 \text{ g}$ cada una, como se evidencia en la Figura 3.9.1.1. (Cuevas et al., 2012). Esta especie se adquirió de un vivero ubicado en la carretera a Morelos km 1, ranchería la Piedra 2da sec. Cunduacán, Tabasco.

Figura 3.9.1.1

Lombrices eisenia foetida.



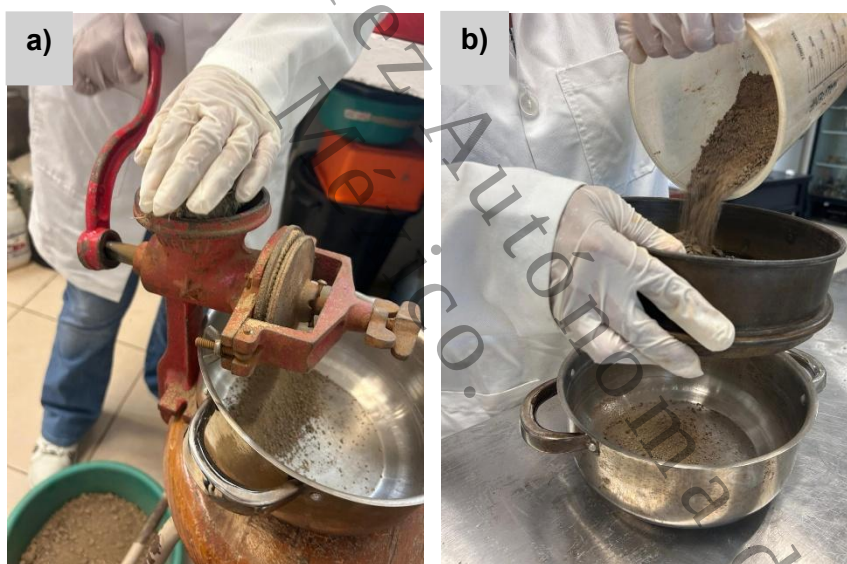
Nota: Proceso de obtención de lombrices: a) Vivero de lombrices. b) Recolección de lombrices adultas.

3.9.1.2 El suelo

Se recolectó 2600 g de suelo y se sometió a un molino de discos para ser triturado. Posteriormente se realizó un tamizado para separar las partículas con diámetro de 0.84 mm (tamiz No. 20, marca Fabricantes de equipos para suelos, concretos, asfaltos, pavimentos, agrícola, química al servicio técnico de la ingeniería), como se observa en la Figura 3.9.1.2. (Cuevas et al., 2012). Asimismo, se determinó el pH del suelo de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

Figura 3.9.1.2

Suelo



Nota: Proceso de obtención del suelo: a) Trituración del suelo. b) Tamizado del suelo.

3.9.1.3 Determinación de humedad del suelo

La determinación de humedad del suelo se realizó usando 3 cajas de petri de vidrio que se sometieron a peso constante. Se pesó 25 g de suelo incluyendo el peso de las cajas petri. Posteriormente, las cajas petri se colocaron en un horno a una temperatura de 103°C durante 24 h, después se colocó en un desecador para enfriar y se pesó nuevamente, así sucesivamente hasta tener un margen de error de ± 0.0005 , esto de acuerdo con la Norma

Oficial Mexicana PROY-NOM-211-SSA1-2002, Productos y servicios, tal como se observa en la Figura 3.9.1.3. Métodos de prueba fisicoquímicos. Determinación de humedad y sólidos totales en alimentos por secado en estufa. Al final se realizaron los siguientes cálculos de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Cuevas et al., 2012).

$$Hs = \frac{[P_i - P_f]}{[M - (P_i - P_f)]} \times 100 \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

Hs = Humedad del suelo (%).

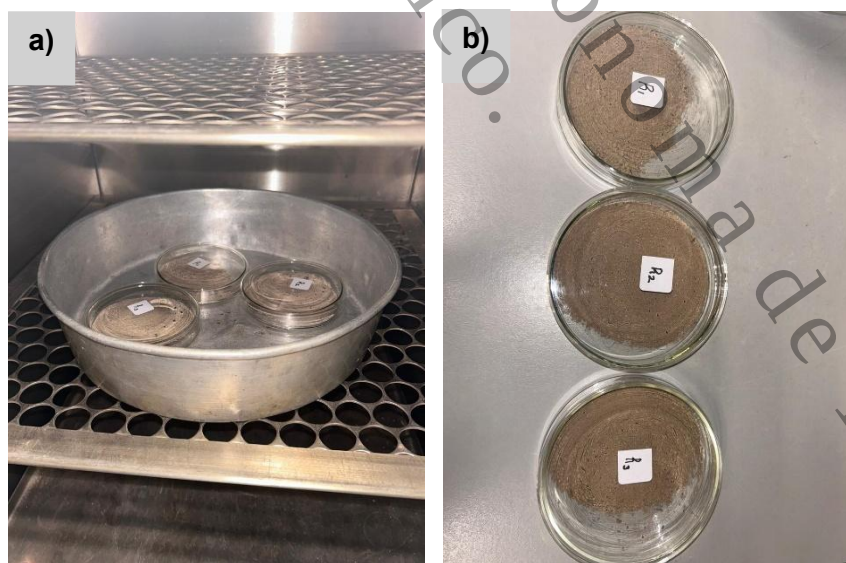
P_i = Peso inicial (peso de la muestra + peso constante de la caja petri, en g).

P_f = Peso final después de secar (peso de la muestra seca + peso constante de la caja petri, en g).

M = Peso inicial de la muestra utilizada (25 g).

Figura 3.9.1.3

Determinación de humedad del suelo.



Nota: Etapas de la eliminación de agua en el suelo: a) Proceso de secado. b) Tres réplicas de muestra de suelo.

3.9.1.4 Determinación de humedad del suelo usando un higrómetro

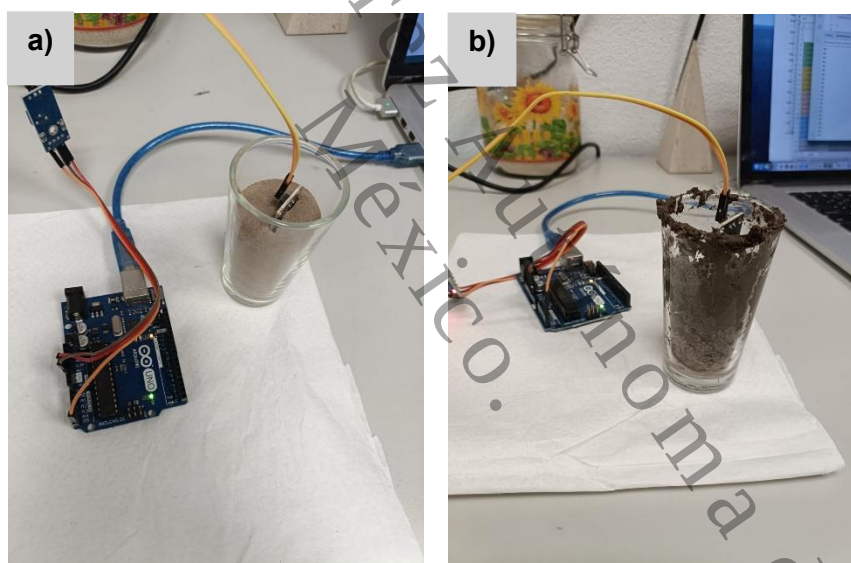
La determinación de humedad se realizó de la siguiente manera, Figura 3.9.1.4:

1. La humedad inicial del suelo se midió con un higrómetro colocando 50 g de suelo en un vaso de vidrio.
2. La humedad final del suelo se midió colocando 50 g de suelo y 10 mL de agua en un vaso de cristal.

Los resultados de las mediciones con el higrómetro se procesaron con el software Arduino IDE 2.3.4 (Butale et al., 2018; Furkhan et al., 2016).

Figura 3.9.1.4

Determinación de humedad del suelo usando un higrómetro.



Nota: Cuantificación de la humedad del suelo mediante higrómetro a) Medición de suelo inicial. b) Medición de suelo final.

3.9.1.5 Determinación del pH del suelo

El análisis se realizó de acuerdo con la norma oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. La determinación del pH del suelo medido en agua se realizó a través del método AS-02, donde se pesaron 10 g de suelo y se vertió en un vaso

erlenmeyer de 100 mL, se adicionó 20 mL de agua destilada en el mismo vaso erlenmeyer. Después se agitó durante 30 minutos hasta obtener una mezcla uniforme. Se dejó reposar la mezcla durante 15 minutos. La medición del pH se determinó con un PHmetro.

3.9.1.6 Determinación de toxicidad

La concentración letal media se evaluó con un bioensayo de 14 días de exposición, utilizando la lombriz roja de California (*Eisenia foetida*), de acuerdo con el diseño experimental mostrado en la Tabla 6. En este bioensayo se colocaron 10 lombrices en cada recipiente de 500 mL con 200 g de suelo. Posteriormente, se utilizaron tres concentraciones (mg/kg) del biotensioactivo obtenido que es aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. con 30000, 60000, 90000 ppm con 4 réplicas cada uno y un blanco que fue el control, esto para comprobar la sensibilidad de las lombrices (Cuevas et al., 2012).

Tabla 6.

Unidades experimentales y bioensayos a diferentes concentraciones (Mendoza & Ramírez, 2008).

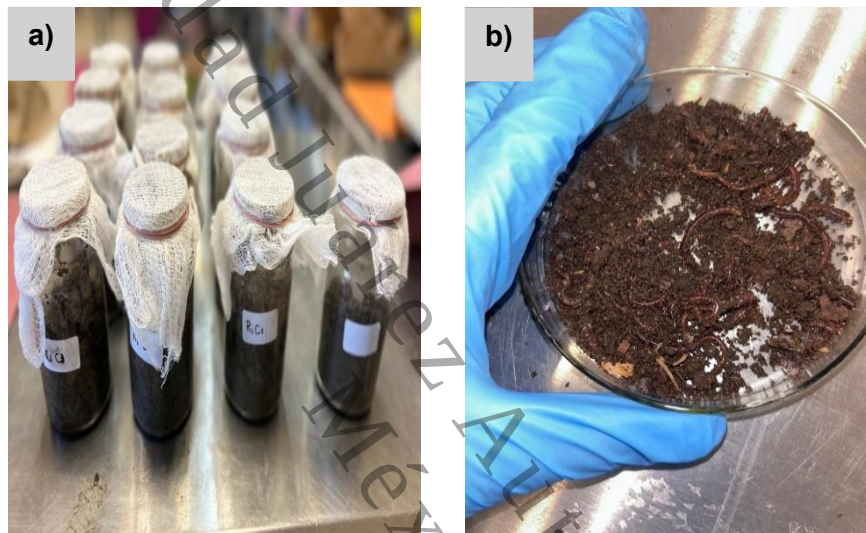
Concentraciones (ppm)	Repeticiones			
C1(30000)	C1R1	C1R2	C1R3	C1R4
C2(60000)	C2R1	C2R2	C2R3	C2R4
C3(90000)	C3R1	C3R2	C3R3	C3R4

Nota: La concentración letal media (CL₅₀) se calculó a partir de bioensayos con lombrices (*Eisenia foetida*) expuestas a diferentes concentraciones del compuesto en estudio.

La mortalidad de las lombrices se determinó al terminar los 14 días de la prueba. Asimismo, las lombrices que no respondieron a los estímulos del tacto se consideraron como muertas, Figura 3.9.1.6, Tabla 7. (Fernández et al., 2018, Arriola, 2019, Pinto & Valbuena., 2020, Amin et al., 2021).

Figura 3.9.1.6

Determinación de toxicidad CL_{50} en lombrices eisenia foetida.



Nota: Medición de toxicidad: a) Recipientes de prueba cubiertos con tela. b) Conteo de lombrices.

Tabla 7.

Condiciones establecidas para la prueba CL₅₀ en lombrices eisenia foetida (Mendoza & Ramírez, 2008, Pinto & Valbuena, 2020, Amin et al., 2021).

Datos	Recomendaciones
Duración de la prueba	14 días
Temperatura	25 °C
Humedad del suelo	45 %
pH del suelo	7
Cantidad total del suelo requerido por réplica	50 g
Especie	<i>Eisenia foetida</i> (Lombriz roja californiana)
Número de especie por réplica	10
Número de réplicas	4
Régimen	Sin alimento
Respuesta a medir	Supervivencia
Control	Suelo no contaminado

Nota: Es importante la aplicación de estas condiciones para tener un resultado favorable.

La prueba evaluó la toxicidad CL₅₀ midiendo el peso ganado o perdido por las lombrices durante el tiempo de exposición. Asimismo, se calculó la concentración letal media (CL₅₀) por el método de Probit o Spearman-Kärber recortado, incluyendo el control y las réplicas. Los resultados se analizaron utilizando el software Probit y un ANOVA empleando el software RStudio® 2024.04.2.

3.10 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para evaluar el rendimiento del proceso de extracción del aceite esencial extraído de las partes del *sapindus saponaria* L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) por el método de extracción supercrítica con CO₂, se estableció como variables del proceso la temperatura de 40 °C a 50 °C y presión de 4000 a 5000 psi, Tabla 8.

Tabla 8.

Variables de operación (Shahedi et al., 2021).

Variables	Bajo	Alto
Temperatura	40 °C	50 °C
Presión	4000 psi	5000 psi

Nota: Variables operativas empleadas en el equipo de extracción con fluidos supercríticos (SFE) para la obtención de aceite esencial de *Sapindus saponaria* L. Se detallan parámetros como presión, temperatura, tiempo de extracción y caudal de CO₂, los cuales determinan la eficiencia del proceso y la calidad del producto obtenido.

Los parámetros fueron registrados en un diseño central compuesto de 2 factores (2^K), con 2 niveles cada uno, 4 puntos al cubo, 5 puntos centrales y 4 puntos axiales, lo cual generó un diseño con 13 corridas experimentales (Kuehl, 2001, De la vara & Gutiérrez, 2012; Jiménez, 2015, Melo et al., 2020; Shahedi, 2021).

El modelo cuadrático o de segundo orden se representa por la siguiente expresión:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad \text{Ec. 12}$$

Donde ε representa el ruido o error observado en la respuesta Y , x_i son factores cuantitativos observados.

Para un diseño central compuesto los niveles codificados de los factores de un diseño factorial 2^k se obtiene de la siguiente manera:

$$x_i = 2(A_i - \bar{A})/R_i \quad \text{Ec. 13}$$

Donde A_i es el i – ésimo nivel del factor A , $\bar{A}$ es el nivel promedio del factor A y R_i es el rango entre el valor más alto y el valor más bajo del factor A . Con este procedimiento, se asigna valores ± 1 a las variables asociadas al arreglo 2^k .

Las coordenadas de los puntos axiales de los ejes del factor codificado son $(\mp\alpha, 0, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, \pm\alpha)$, y los puntos centrales son de la forma $(0, 0, 0, \dots, 0)$. Se considera solamente una propiedad deseable en estos diseños consistentes en que la varianza de los valores estimados sea constante en puntos equidistantes del centro del diseño. Esta propiedad llamada rotabilidad se logra estableciendo $\alpha = 1.414$ (Jiménez, 2015).

Los datos de los factores fueron registrados de la siguiente manera: temperatura (A) y presión (B), los cuales fueron codificados y sustituidos por los valores reales, Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9.

Variables codificadas para la extracción de aceite esencial de las partes de sapindus saponaria L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) (Jiménez, 2015).

Orden de corrida	A	B
1	0	1.41421
2	0	0
3	1.41421	0
4	-1	-1
5	1	-1
6	1	1
7	0	0
8	0	0

9	0	0
10	-1.41421	0
11	-1	1
12	0	-1.41421
13	0	0

Nota: Los datos correspondientes A y B fueron obtenidos a partir de un diseño central compuesto con dos factores, lo que permitió evaluar de manera sistemática la influencia de las variables experimentales en el proceso.

Tabla 10.

Diseño central compuesto para la extracción del aceite esencial de las partes del sapindus saponaria L. (raíz, tallo, hojas, flor y fruto) (Jiménez, 2015, Amat et al., 2022, Deng et al., 2023).

Corrida	Temperatura (°C)	Presión de CO ₂ (Psi)
1	45	5207.11
2	45	4500
3	52.0711	4500
4	40	4000
5	50	4000
6	50	5000
7	45	4500
8	45	4500

9	45	4500
10	37.9289	4500
11	40	5000
12	45	3792.89
13	45	4500

Nota: Las mediciones de temperatura y presión se obtuvieron mediante la implementación de un diseño central compuesto de dos factores, lo que permitió evaluar de manera precisa la interacción de las variables en el proceso de extracción.

Para analizar el efecto de los factores en las variables de respuesta se realizó un análisis de varianza (ANOVA) empleando el software RStudio® 2024.04.2., con un índice de confianza del 95%.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de las partes del árbol (raíz, tallo, hoja, flor y fruto) de *sapindus saponaria* L. se presenta en el anexo H.1 Identificación de compuestos del aceite esencial extraído de las diferentes partes del árbol *sapindus saponaria* L. donde los análisis determinados por cromatografía de gases (GC) y la espectrometría de masas (MS) detectaron cantidades mínimas de ácidos grasos, mientras que el fruto mostró una mayor concentración y diversidad de compuestos, lo que justifica su elección como matriz principal de estudio. Asimismo, esta selección contribuye a la optimización del proceso analítico, al reducir el consumo de reactivos y mejorar la eficiencia experimental. Además, los ácidos grasos identificados tienen propiedades anfifílicas que les permiten actuar como agentes tensioactivos, favoreciendo la reducción de la tensión superficial y la formación de emulsiones estables. Este hallazgo confirma su potencial como biotensioactivo de origen natural.

Este apartado se encuentra organizado de la siguiente manera: el 4.1.1 se aborda la caracterización fisicoquímica del aceite esencial extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por el método extracción supercrítica con CO₂. Asimismo, el 4.2 identificación de compuestos del aceite esencial extraído del fruto del *sapindus saponaria* L. El 4.3 análisis por infrarrojo del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por el método de extracción por CO₂ supercrítico (SFE). El 4.4 caracterización de superficie del aceite vegetal extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. El 4.5 caracterización biológica del aceite vegetal extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. El 4.6 determinación del rendimiento del aceite esencial extraído del fruto del *sapindus saponaria* L. El 4.7 diseño experimental. Además de la comparación de los métodos de extracción, lo que permitió valorar las ventajas y limitaciones de cada técnica en función de la composición química, el rendimiento y las propiedades del aceite obtenido, justificando así la elección del método supercrítico. Además de la comparación de los métodos de extracción de aceite, lo que permitió valorar las ventajas y limitaciones de cada técnica en función de la composición química, el rendimiento y las propiedades del aceite obtenido, justificando así la elección del método supercrítico.

4.1.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL ACEITE ESENCIAL EXTRAÍDO DEL FRUTO DE *SAPINDUS SAPONARIA* L. POR EL MÉTODO EXTRACCIÓN SUPERCRÍTICA CON CO₂.

4.1.2 Determinación de la densidad del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L.

La densidad del aceite esencial extraído del fruto del *sapindus saponaria* L. se determinó utilizando un picnómetro lo que favorece principalmente en mantener un volumen fijo al colocar diferentes líquidos en su interior, Tabla 11. Esto permite comparar las densidades de dos líquidos, pesando el picnómetro con cada líquido por separado y comparando sus masas, la densidad se determinó de acuerdo con la norma NMX-F-075-SCFI-2012 “Alimentos, aceites y grasas vegetales o animales”.

Tabla 11.

Datos para determinar densidad vía picnómetro.

Peso del picnómetro vacío (g)	Peso del picnómetro con agua (g)	Peso del picnómetro con aceite (g)
0.4774	0.9242	0.8809

Nota: De acuerdo con la tabla A-3 (Çengel & Boles, 2015) “propiedades de líquidos y alimentos comunes”, la densidad del agua a 25 °C es 997 kg/m³.

Conversión:

$$997 \frac{kg}{m^3} = 0.997 \frac{g}{cm^3}$$

Sustituyendo datos en la ec. 6, queda de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{0.8809 g - 0.4774 g}{0.9242 g - 0.4774 g} \times 0.997 \frac{g}{cm^3} = 0.9003 \frac{g}{cm^3}$$

La densidad de aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. es 0.9003 g/cm³.

La densidad de un material es una propiedad física importante para su caracterización. Asimismo, es una cualidad que define la calidad de pureza de una sustancia pura, es decir cuanto más denso es, mayor concentración de aceite puro. De acuerdo con diversos artículos (Abdul et al., 2017, Giakoumis, 2018, Amalia et al., 2022, Collins et al., 2024) la densidad de los aceites vegetales se encuentra entre 0.80 y 0.96 g/cm³.

4.1.3 Determinación de ácidos grasos del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L.

Los cálculos se realizaron de acuerdo con la norma NMX-F-101-SCFI-2012, para determinar ácidos grasos libres en aceites y grasas vegetales o animales.

El porcentaje de ácidos grasos libres en la mayoría de las grasas y aceites vegetales son calculados como ácido oleico, esto de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Factor NaOH} = 28.2 \times \frac{40}{56.1} \approx 20.1$$
$$\% \text{ Ácidos Grasos Libres como Oleico} = \frac{0.6 \text{ mL} \times 0.1 \times 20.1}{0.315 \text{ g}}$$
$$\% \text{ Ácidos Grasos Libres como Oleico} = 3.82 \%$$

Con respecto al resultado obtenido se requieren 0.6 mL de NaOH para neutralizar la acidez libre presente en la muestra. El resultado de 3.82% de ácido graso libre en la muestra, indica que es elevado, esto de acuerdo con lo reportado en literatura (Campo et al., 2023; Lafont et al., 2011; Diaz et al., 2017; Aragón et al., 2009) el % de ácidos graso libres como ácido oleico en diferentes aceites de plantas se encuentra entre 0.2 y 0.8% utilizando una masa de 5 g de muestra y un gasto de NaOH de 1.5 a 2 mL aplicado principalmente a la industria alimentaria. Sin embargo, los valores >3% de acidez limita su aplicación a la industria alimentaria y se enfoca a la aplicación industrial (Andrada et al., 2024).

4.2 IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS DEL ACEITE ESENCIAL EXTRAÍDO DEL FRUTO DEL *SAPINDUS SAPONARIA* L.

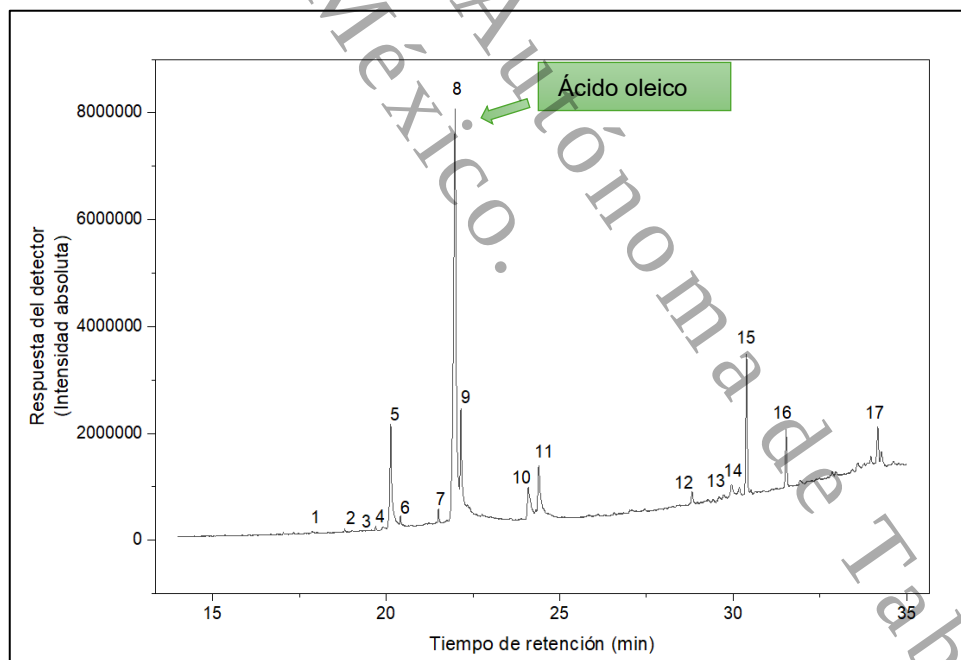
4.2.1 Aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por extracción supercrítica con CO₂ (SFE).

De acuerdo con el método analítico descrito previamente, se realizó el análisis cromatográfico del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por extracción supercrítica con CO₂. En la figura 4.2.1 se muestra el cromatograma obtenido donde se destaca la señal correspondiente al ácido oleico, el cual es un ácido monocarboxílico presente en la muestra del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L.

Los compuestos principales detectados en el análisis se muestran en la tabla 12.

Figura 4.2.1.

Cromatograma del aceite extraído del fruto del sapindus saponaria L. por el método SFE.



Nota: El cromatograma obtenido mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC–MS) muestra la identificación de 17 compuestos químicos presentes en el aceite esencial de *Sapindus saponaria* L. Cada pico corresponde a un

metabolito caracterizado, lo que permite establecer el perfil químico de la muestra y evaluar su relevancia en el análisis fisicoquímico.

Tabla 12.

*Componentes obtenidos del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por extracción supercrítica con CO₂.*

No.	Tiempo de retención	Área	Concentración (%)	Componentes identificados
1	17.335	74077	0.11	Ácido 9-octadecenoico (Z)-, éster de hexilo
2	18.33	42248	0.07	Ácido octanoico, 7-oxo- (Ácido caprílico)
3	18.802	100277	0.16	Ácido carbónico, pentadecilo prop-1-en-2-il éster (Ácido oxácido)
4	19.7	145259	0.22	Ácido tetradecanoico, 12-metil-, éster metílico, (S)- (Ácido mirístico)
5	20.13	6609633	10.23	Ácido n-hexadecanoico (Ácido palmítico)
6	20.411	245942	0.38	Ácido hexadecanoico, éster etílico (Ácido palmítico)
7	21.507	420530	0.65	Ácido 6-octadecenoico, éster metílico, (Z)- (Ácido táririco)
8	21.981	34634744	53.61	Ácido oleico
9	22.154	3432511	5.31	Ácido heptadecanoico, éster de heptadecilo (ácido margárico)
10	24.096	2027373	3.14	Ácido cis-11-eicosenoico

11	24.392	2627751	4.07	Ácido eicosanoico (Ácido araquídico)
12	28.817	509060	0.79	Ácido carbónico, éster de vinilo eicosil (Ácido oxácido)
13	29.952	794513	1.23	Ácido oleico, éster 3- (octadeciloxi)propílico
14	30.182	465248	0.72	Ácido hexadecanoico, éster de (3- bromoprop-2-inilo) (Ácido palmítico)
15	30.388	7509768	11.63	Escualeno
16	31.529	2993867	4.63	2-Metilhexacosano
17	34.169	1966934	3.04	2-metiltetracosano

Nota: La tabla presenta la identificación de 17 compuestos químicos detectados en el aceite esencial de *Sapindus saponaria* L., entre los cuales se incluyen diversos ácidos grasos. Los resultados, obtenidos mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC–MS), permiten establecer el perfil químico de la muestra y evaluar la relevancia de estos metabolitos en el análisis fisicoquímico y su potencial aplicación industrial.

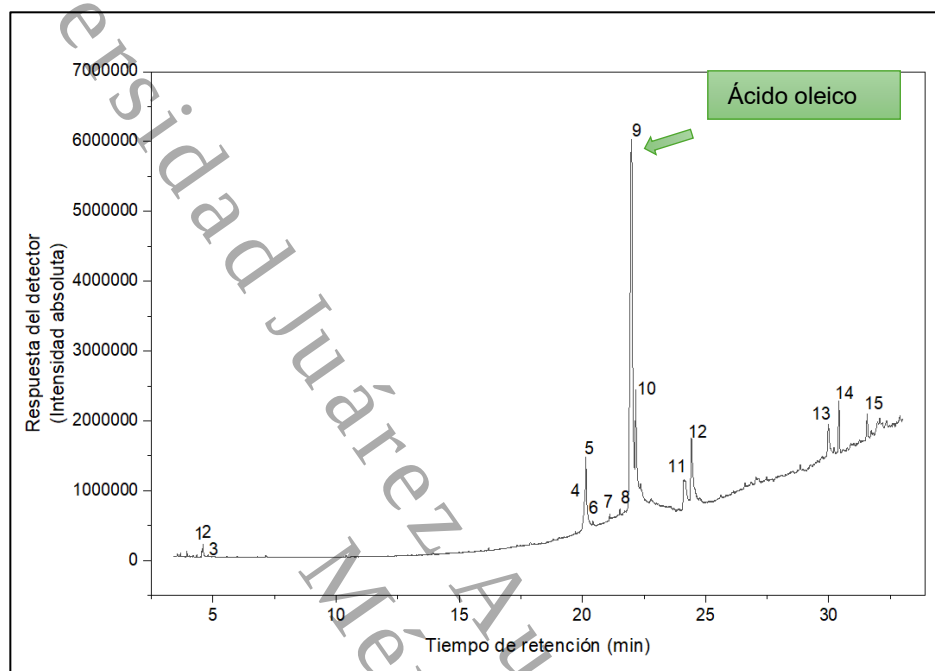
4.2.2 Aceite extraído del fruto del árbol *sapindus saponaria* L. por extracción soxhlet con hexano al 99%.

Se realizó el análisis cromatográfico del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por extracción soxhlet. En la figura 4.2.2 se muestra el cromatograma obtenido donde se destaca la señal correspondiente al ácido oleico, el cual es un ácido monocarboxílico presente en la muestra del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L.

Los compuestos principales detectados en el análisis se muestran en la tabla 13.

Figura 4.2.2.

Cromatograma del aceite del fruto del árbol de sapindus saponaria L. extraído por soxhlet con hexano al 99%.



Nota: El cromatograma obtenido mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC–MS) muestra la identificación de 15 compuestos químicos presentes en el aceite esencial de *Sapindus saponaria* L. Cada pico corresponde a un metabolito caracterizado, lo que permite establecer el perfil químico de la muestra y evaluar su relevancia en el análisis fisicoquímico.

Tabla 13.

Componentes obtenidos del aceite extraído del fruto de sapindus saponaria L. por soxhlet con hexano al 99%.

No.	Tiempo de retención	Área	Concentración (%)	Componentes identificados
1	4.206	34327	0.07	Ácido oxálico, éster de hexilo propílico

2	4.558	204890	0.39	Ácido propanóico, 2-hidroxi-, éster etílico, (L)-
3	4.807	34919	0.07	Ácido propanodioico, propil- (Ácido malónico)
4	20.088	1710068	3.25	Ácido pentadecanoico (Ácido pentadecílico)
5	20.14	3251138	6.17	Ácido n-hexadecanoico (Ácido palmítico)
6	20.425	92885	0.18	Ácido hexadecanoico, éster de 1-(hidroximetil)-1,2-etanodilo (Ácido palmítico)
7	21.108	99848	0.19	Ácido hexadecanoico, éster de (3-bromoprop-2-inoil) (Ácido palmítico)
8	21.52	158625	0.3	Ácido oleico, éster 3-(octadeciloxi)propílico (Ácido oleico)
9	21.98	31670207	60.15	Ácido oleico
10	22.163	2684682	5.1	Ácido octadecanoico (Ácido esteárico)
11	24.125	4044153	7.68	Ácido cis-11-eicosenoico
12	24.421	3777110	7.17	Ácido eicosanoico (Ácido araquídico)
13	29.987	1732690	3.29	Ácido undec-10-ynoico, éster de tetradecilo (Ácido undecilénico)
14	30.41	2134017	4.05	Escualeno
15	31.557	1026328	1.95	Ácido sulfuroso, éster octadecilo 2-propílico

Nota: La tabla presenta la identificación de 15 compuestos químicos detectados en el aceite esencial de *Sapindus saponaria* L., entre los cuales se incluyen diversos ácidos grasos. Los resultados, obtenidos mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), permiten establecer el perfil químico de la muestra y evaluar la relevancia de estos metabolitos en el análisis fisicoquímico y su potencial aplicación industrial.

Mediante los métodos de extracción por fluidos supercríticos con CO₂ y por Soxhlet utilizando hexano al 99%, se lograron detectar e identificar trece ácidos grasos mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS). Los ácidos obtenidos corresponden a las estructuras de ácido oleico, ácido palmítico, ácido esteárico, ácido caprílico, ácido mirístico, ácido margárico, ácido araquídico, ácido oxácido, ácido tarírico, ácido propanóico, ácido malónico, ácido undecilénico, ácido pentadecílico, entre otros, como se muestra en las Tablas 12 y 13.

Comparando los resultados con lo reportado en literatura por diversas investigaciones (Azevedo et al., 2017, Aragón et al., 2009), se identificaron los siguientes ácidos grasos obtenidos del fruto y la semilla del árbol de jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.), los cuales son ácido oleico y uno de sus isómeros, isómero del ácido linoléico, ácido linoléico, un isómero del ácido linolénico, ácido behénico, ácido araquidónico, ácido esteárico, ácido palmitoléico, ácido palmítico, ácido mirístico y ácido láurico. Sin embargo, el ácido oleico es el ácido graso monoinsaturado más abundante en los tejidos vegetales, comprendiendo del 20 al 80% de los aceites de semillas comerciales (Lovato et al., 2014). Asimismo, los ácidos grasos monoinsaturados (como el ácido oleico, el ácido erúico, el ácido nervónico y el ácido ricinoleico) producen tensioactivos con mayores propiedades tensioactivas y biodegradabilidad que los ácidos grasos poliinsaturados y saturados. Los ácidos grasos saturados confieren estabilidad térmica al tensioactivo sintetizado. Por otro lado, las altas concentraciones de ácidos grasos poliinsaturados en los aceites vegetales son indeseables debido a su inestabilidad oxidativa (Mohammed & Ikiensikimama, 2023). Además, comparando los métodos de extracción, el supercrítico indicó una mejor calidad en el aceite, no tóxico y menos tiempo de extracción.

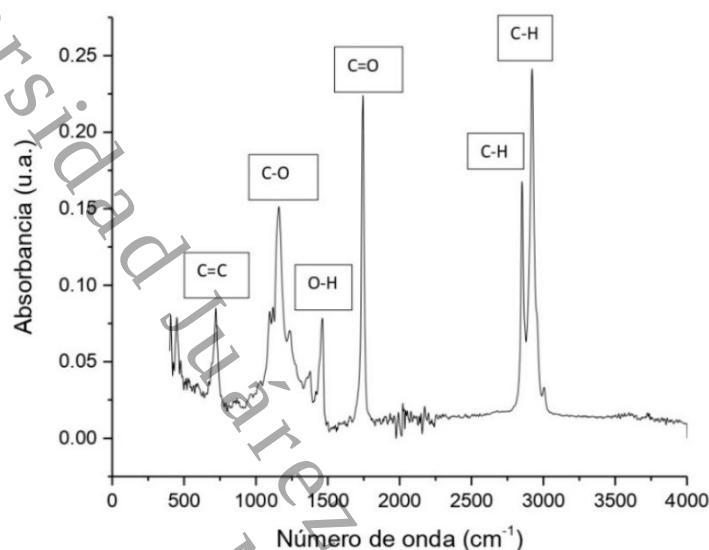
4.3 ANÁLISIS POR INFRARROJO DEL ACEITE EXTRAÍDO DEL FRUTO DE *SAPINDUS SAPONARIA* L. POR EL MÉTODO DE EXTRACCIÓN POR CO₂ SUPERCRÍTICO (SFE).

El espectro infrarrojo que se presenta en la figura 4.3, permitió identificar la presencia de grupos funcionales característicos, entre ellos enlaces C–H de aldehídos ($2695\text{--}2830\text{ cm}^{-1}$), C–H de alcanos ($2840\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$), C=O de ésteres ($1735\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$), O–H de ácidos carboxílicos ($1395\text{--}1440\text{ cm}^{-1}$), C–O de alquil-aril-éteres ($1200\text{--}1275\text{ cm}^{-1}$) y C=C de alquenos ($665\text{--}730\text{ cm}^{-1}$). La intensidad de cada banda refleja la magnitud de absorbancia de los enlaces frente a la radiación IR, confirmando la presencia de compuestos en la muestra analizada. La identificación de los grupos funcionales se consultó en el libro de Spectrometric Identification of Organic Compounds (Silverstein et al; 1991).

La caracterización IR permitió identificar grupos funcionales que coincide con lo reportado en la literatura (Pavia et al., 2015; Silverstein et al., 1991; Wade, 2013; Stuart, 2021). La presencia de bandas de C=O ($1735\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$) y O–H ($1395\text{--}1440\text{ cm}^{-1}$), confirma la existencia de carbonilos y ácidos carboxílicos, mientras que las señales de C–H y C=C evidencian cadenas alifáticas e insaturaciones. Este resultado indica un aporte científico relevante, al validar la composición molecular del extracto y su potencial aplicación en la caracterización de compuestos biotensioactivos.

Figura 4.3.

*Espectro FTIR de una muestra de aceite esencial extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por el método SFE.*



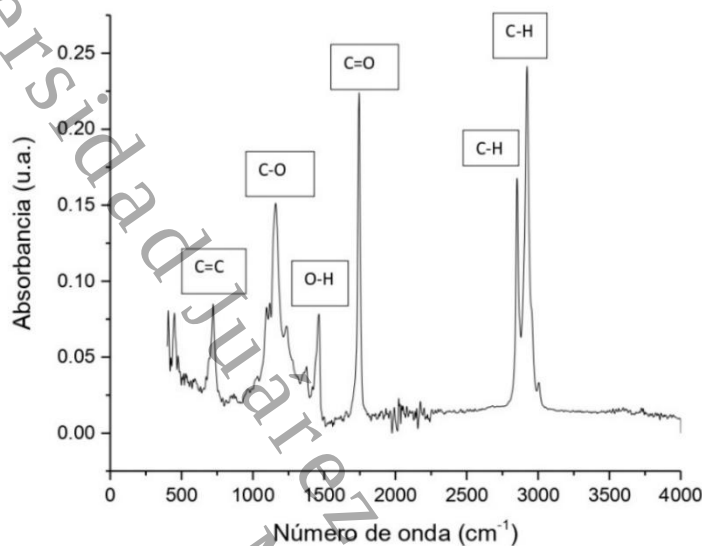
Nota: La caracterización IR permitió confirmar la presencia de 6 grupos funcionales asociados a la naturaleza química del extracto, aportando evidencia experimental sobre su composición.

4.3.1 Análisis por infrarrojo del aceite esencial extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por el método de extracción por soxhlet con hexano al 99%.

La figura 4.3.1 presenta grupos funcionales específicos de tensiones en regiones comunes del espectro: C-H en la región 2695-2830 cm^{-1} aldehído, C-H en la región 2840-3000 cm^{-1} alcano, C=O en la región 1735-1750 cm^{-1} éster, O-H en la región 1395-1440 cm^{-1} ácido carboxílico, C-O en la región 1200-1275 cm^{-1} alquil-aril-éter y C=C en la región 665-730 cm^{-1} alqueno. La identificación de los grupos funcionales se consultaron en el libro de Spectrometric Identification of Organic Compounds (Silverstein et al.; 1991).

Figura 4.3.1.

*Espectro FTIR de una muestra de aceite esencial extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por soxhlet con hexano al 99%.*



Nota: La caracterización IR permitió confirmar la presencia de 6 grupos funcionales asociados a la naturaleza química del extracto, aportando evidencia experimental sobre su composición.

En investigaciones recientes (Archila et al., 2022; Baesso et al., 2021; Almeida et al., 2016), analizaron por FTIR el aceite esencial del fruto del árbol *sapindus saponaria* L. identificando grupos funcionales como alcanos, ácidos carboxílicos, ésteres, aldehídos, en general, las bandas de -OH, -C=O, C-H, y C=C, asociados con una estructura triterpénica representativa de las saponinas. Asimismo, los análisis cromatográficos validan la interpretación de las propiedades fisicoquímicas del material y respalda su potencial aplicación en procesos de extracción y aprovechamiento de metabolitos secundarios.

4.4 CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIE DEL ACEITE VEGETAL EXTRAÍDO DEL FRUTO DE *SAPINDUS SAPONARIA* L.

4.4.1 Determinación de la tensión superficial del aceite esencial extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. por el método de anillo de Du noüy

La Tabla 14 presenta los datos obtenidos en masa de las diferentes diluciones que se prepararon para determinar la tensión superficial.

Tabla 14.

Concentración de las muestras aceite-agua para medición de tensión superficial

m_{aceite} (g)	m_{agua} (g)	w_{aceite}	$\text{LN}(w_{\text{aceite}})$
0.0215	9.9785	0.00215	-6.14178
0.0061	9.9939	0.00061	-7.40205
0.0022	9.9978	0.00022	-8.44436
0.0012	9.9988	0.00012	-9.02802
0.0009	9.9991	0.00009	-9.36065
0.0007	9.9993	0.00007	-9.54297

Nota: La tabla muestra las proporciones de aceite y agua empleadas en las diluciones, indicando la relación experimental entre la composición de la mezcla y el comportamiento de la tensión superficial.

La Tabla 15 presenta los datos para determinar la tensión superficial de acuerdo con el método de anillo de Du noüy.

Tabla 15

Variables y constantes para el cálculo de la tensión superficial.

m (g)	ρ ($\frac{g}{cm^3}$)	R^3/V	f	g ($\frac{cm}{s^2}$)	P (cm)	R	R/r	σ (mN/m)
0.5947	0.997	1.45	0.910	977.8	5.992	0.953	53.6	44.1
0.6258	0.997	1.38	0.913	977.8	5.992	0.953	53.6	46.6
0.6080	0.997	1.42	0.913	977.8	5.992	0.953	53.6	45.3
0.6627	0.997	1.30	0.917	977.8	5.992	0.953	53.6	49.6
0.6699	0.997	1.29	0.917	977.8	5.992	0.953	53.6	50.1
0.6994	0.997	1.23	0.920	977.8	5.992	0.953	53.6	52.5

Nota: De acuerdo con la tabla, se observa el cálculo de la tensión superficial por cada dilución a 25 °C.

Las saponinas obtenidas del aceite esencial extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. redujo la tensión superficial del agua de 72 mN/m a 52.5 mN/m.

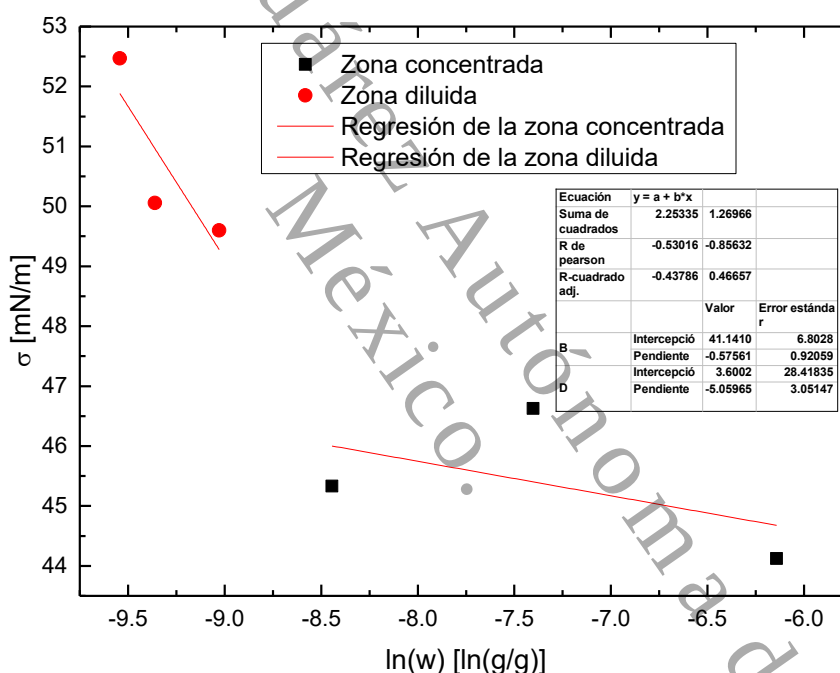
Comparando los resultados de tensión superficial de la emulsión, tabla 15, y lo encontrado en literatura acerca de la tensión superficial de biotensioactivos derivados de microorganismos y aceites vegetales, como la surfactina que es un biotensioactivo producido por *Bacillus subtilis* que en concentraciones menores del 0.005 % (p/v) reduce la tensión superficial del agua de 72 a 27.9 mN/m (Gracida et al., 2010). Las saponinas extraídas de la yuca redujeron la tensión superficial del agua hasta 37.9 ± 0.2 mN/m (Góngora et al.; 2023). Muestras de proteínas obtenidas a partir de la ozoflotación de microalgas lavadas, reducen la tensión superficial del agua hasta 42.73 mN/m y 50.04 mN/m (Gracia et al.; 2010). Estos valores demostraron ser similares a valores obtenidos para emulsificantes sintéticos utilizados en la industrial (Ralla et al., 2018).

4.4.2 Determinación de la concentración micelar crítica (CMC) del aceite vegetal extraído del fruto de *sapindus saponaria* L.

La CMC se determinó a partir de los datos de tensión superficial graficados con respecto a la concentración, obteniendo la pendiente ordenada al origen de la zona concentrada y la pendiente ordenada al origen de la zona diluida. La figura 4.4.1 indica que a menor cantidad de aceite y mayor cantidad de agua en la dilución se obtiene una tensión superficial optima.

Figura 4.4.1.

Comportamiento de la tensión superficial y composición de la muestra aceite-agua.



Nota: Se observa que una mayor proporción de agua en la mezcla favorece la disminución de la tensión superficial, mientras que un incremento en la fracción de aceite mantiene valores más elevados, evidenciando la influencia de la composición en las propiedades interfaciales.

El cálculo de la CMC se obtuvo de la siguiente manera, aplicando dos ecuaciones, la pendiente ordenada al origen de la zona diluida y zona concentrada.

Pendiente ordenada al origen de la zona concentrada:

$$y = -0.5756x + 41.141 \quad \text{Ec. 14}$$

Pendiente ordenada al origen de la zona diluida:

$$y = -5.0596x + 3.6002 \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

$$W_{CMC} = \text{Exp} \left(\frac{-3.6-41.141}{5.05-0.575} \right) = 4.55015 \times 10^{-05} \quad \text{Ec. 16}$$

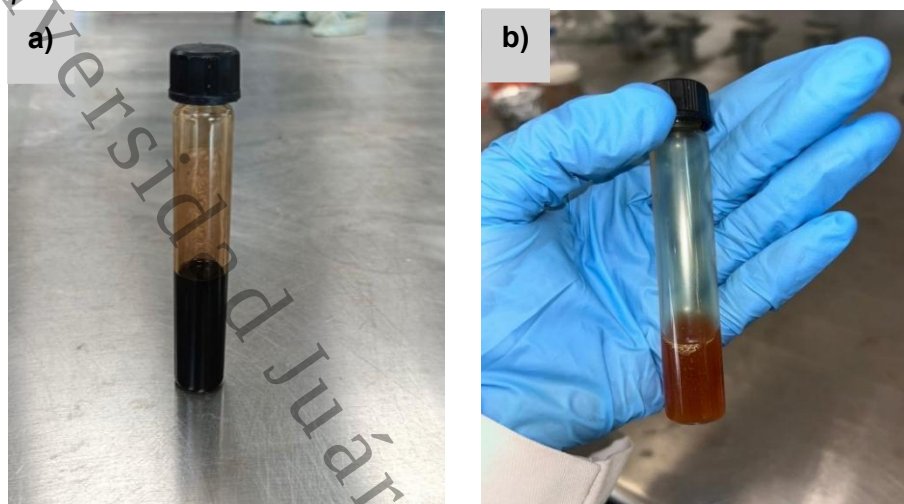
El resultado obtenido de CMC del aceite esencial extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. es de $W_{CMC} = 4.55 \times 10^{-05} \mu\text{M}$, comparando este dato con lo que se reporta en literatura de tensioactivos sintéticos como el bromuro de cetiltrimetilamonio en agua (CTAB) es de $9.59 \times 10^{-04} \text{ M}$ a 25°C (Carrera et al.; 2013). El dodecil sulfato sódico en agua es de $8.1 \times 10^{-3} \text{ M}$ a 25°C (Cáceres, 2021). La formación de micelas depende del pH, la concentración del tensioactivo y la temperatura. Los biotensioactivos presentan una concentración micelar crítica (CMC); en solución acuosa, el ácido oleico y el ácido linoleico muestran valores de 6 y 13 μM , respectivamente (Berg et al.; 2019; Freeman et al.; 2021). El resultado obtenido se encuentra en los intervalos de CMC de biotensioactivos de ácidos grasos. El valor de CMC aumenta con el incremento de temperatura, confirmando así que el aumento de la temperatura provoca una desorganización de las moléculas de agua-grupo apolar y esto disminuye la tendencia a formar micelas.

4.4.3 Identificación de saponinas en los extractos del aceite vegetal extraído del fruto de *sapindus saponaria* L.

La identificación de saponinas en el aceite vegetal extraído del fruto del *sapindus saponaria* L. por el método Lieberman-Burchard y Salkowsky resultó positivo, lo que indica la presencia de estructuras triterpenoides y esteroides propias de estos metabolitos secundarios, Figura 4.4.3. Estos compuestos químicos se encuentran presentes en muchas plantas y que tiene la propiedad de reducir la tensión superficial y crear espuma.

Figura 4.4.3

Identificación de saponinas en los extractos del aceite vegetal extraído del fruto del *sapindus saponaria* L.



Nota: Se observa una respuesta positiva en las pruebas cualitativas (Liebermann-Burchard y Salkowski), confirmando la presencia de núcleos triterpenoides y esteroides característicos de las saponinas: a) Resultado del método Lieberman-Burchard. b) Resultado del método Salkowsky.

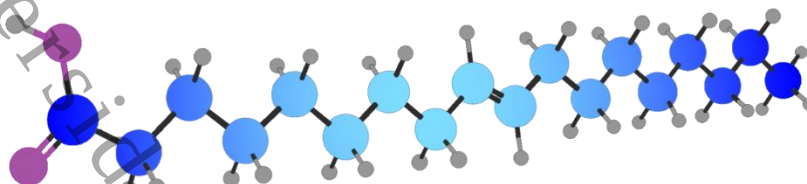
4.4.4 Determinación del balance hidrófilo-lipofílico (HLB) del aceite vegetal extraído del fruto del *sapindus saponaria* L.

De acuerdo con la Tabla 12, el resultado evidencia una mezcla de moléculas con propiedades tensioactivas, cuyo balance hidrofílico-lipofílico (HLB) de cada componente fue determinado mediante el método de contribución grupal de Davies.

La estructura química del ácido oleico, el cual fue el más representativo, indicó el tipo y número de grupos funcionales presentes para realizar la estimación del HLB de acuerdo con la ecuación 10, Figura 4.4.4.

Figura 4.4.4.

*Estructura del ácido oleico para la determinación del balance hidrófilo-lipofílico (HLB) del aceite extraído del fruto del *sapindus saponaria* L.*



Nota: El análisis evidencia su carácter predominantemente lipofílico, lo que explica su comportamiento como componente mayoritario en aceites vegetales y su influencia en propiedades emulsionantes.

Los valores de grupos hidrofílicos y grupos lipofílicos se obtienen de la tabla 4 reportada anteriormente. La Tabla 16 presenta el cálculo de HLB de los componentes identificados por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GCMS) del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L (tabla 12) (Centro Nacional de Información Biotecnológica, 2024).

Tabla 16.

Determinación de HLB de cada componente con base en el aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L.

No.	Componentes identificados	Concentración (%)	HLB
1	Ácido 9-octadecenoico (Z)-, éster de hexilo	0.11	4.4
2	Ácido octanoico, 7-oxo- (Ácido caprílico)	0.07	12.42
3	Ácido tetradecanoico, 12-metil-, éster metílico, (S)- (Ácido mirístico)	0.22	15.27
4	Ácido n-hexadecanoico (Ácido palmítico)	10.23	16.22
5	Ácido hexadecanoico, éster etílico (Ácido palmítico)	0.38	0.84
6	Ácido 6-octadecenoico, éster metílico, (Z)- (Ácido tártrico)	0.65	2.47
7	Ácido oleico	53.61	1.7
8	Ácido heptadecanoico, éster de heptadecilo (ácido margárico)	5.31	1.5
9	Ácido cis-11-eicosenoico	3.14	0.55
10	Ácido eicosanoico (Ácido araquídico)	4.07	0.075
11	Éster 3-(octadecilo) propílico	1.23	0.25
12	Ácido hexadecanoico, éster de (3-bromoprop-2-vinilo)	0.72	0.84
	Suma total	79.74	56.535

Nota: Esta tabla muestra los resultados obtenidos de HLB de cada compuesto con base en el método de contribución grupal de Davies. Así como, la concentración obtenida por el cromatógrafo de gases y el espectrómetro de masas.

Con base en la tabla 16, el HLB total de la mezcla del aceite extraído del fruto de *sapindus saponaria* L., se determinó calculando el promedio ponderado. Este cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$HLB_{mezcla} = \sum f_i \times HLB_i$$

Donde:

f_i = Representa la fracción másica de cada compuesto.

HLBi = Es el valor individual, con base en el método de contribución grupal de Davies.

Cálculos:

$$HLB = HLB1/HLB (It)$$

$$HLB 1 = 4.4/56.53 = 0.07$$

$$HLB 2 = 12.42/56.53 = 0.21$$

$$HLB 3 = 15.27/56.53 = 0.27$$

$$HLB 4 = 16.22/56.53 = 0.28$$

$$HLB 5 = 0.84/56.53 = 0.01$$

$$HLB 6 = 2.47/56.53 = 0.04$$

$$HLB 7 = 1.7/56.53 = 0.03$$

$$HLB 8 = 1.5/56.53 = 0.02$$

$$HLB 9 = 0.55/56.53 = 0.009$$

$$HLB 10 = 0.075/56.53 = 0.001$$

$$HLB 11 = 0.25/56.53 = 0.004$$

$$HLB 12 = 0.84/56.53 = 0.014$$

Cálculos:

$$HLB = \text{Concentración total (concentración del cromatograma)} * HLB1$$

$$HLB 1 = 0.11 * 0.07 = 0.0077$$

$$HLB 2 = 0.07 * 0.21 = 0.0147$$

$$HLB 3 = 0.22 * 0.27 = 0.0594$$

$$HLB 4 = 10.23 * 0.28 = 2.8644$$

$$HLB 5 = 0.38 * 0.01 = 0.39$$

$$HLB 6 = 0.65 * 0.04 = 0.026$$

$$HLB\ 7 = 53.61 * 0.03 = 1.6083$$

$$HLB\ 8 = 5.31 * 0.02 = 0.1062$$

$$HLB\ 9 = 3.14 * 0.009 = 0.028$$

$$HLB\ 10 = 4.07 * 0.001 = 0.004$$

$$HLB\ 11 = 1.23 * 0.004 = 0.0049$$

$$HLB\ 12 = 0.72 * 0.014 = 0.010$$

Cálculos:

$$HLB_{(Total)} = HLB\ 1 + HLB\ 2 + HLB\ 3 + \dots$$

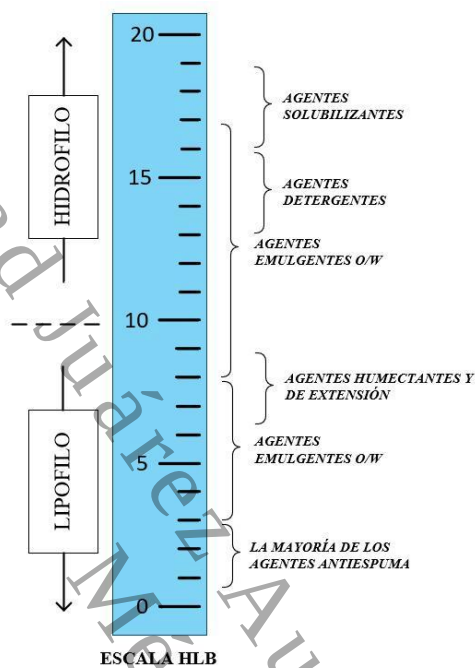
$$HLB_{(Total)} = 5.1236$$

El HLB total, es el promedio ponderado de los HLB individuales de cada componente, donde la ponderación se determina por la fracción de masa de cada uno en la mezcla (Griffin, 1949).

De acuerdo con la Figura 4.4.4.1, la escala de valores HLB indica que el resultado de HLB (total) de 5.1236 es de tipo agente emulgente w/o (agua en aceite).

Figura 4.4.4.1.

Escala que muestra la extensión de los valores HLB de diversos tensioactivos (Caenn et al., 2017).



Nota: La escala permite visualizar la clasificación de los tensioactivos según su valor HLB, diferenciando aplicaciones específicas como emulgentes w/o, solubilizantes y detergentes, lo que facilita la selección adecuada en sistemas de emulsión.

Comparando el resultado con lo que se reporta en diversas investigaciones como Gracida et al.; 2010; Fernandes et al.; 2013; el biotensioactivo oleil soforolípido posee un valor de HLB entre 7 y 8, lo cual ha mostrado ser un excelente humectante de piel. El ácido oleico presenta un HLB de 1 y oleato de sodio un valor HBL de 20. Los valores de HLB de los aceites esenciales de *R. officinalis* (romero) es de 16.5 y *I. verum* (anis) de 16.7. Los tensioactivos sintéticos como el tween 20 presenta un HLB de 20 y el estearato de sacarosa (SP 70) tiene un HLB de 15 (Alfaro et al.; 2018; Hong et al.; 2018). El tensioactivo de tipo emulgente es aplicado en área de la cosmética, productos del hogar, alimentos y bebida, y limpieza en el uso de detergentes. Algunos de los emulgentes empleados actualmente es la lecitina de soja, el estearoil lactilato de sodio, los fosfatos de sodio y el éster diacetil tartárico de monoglicéridos.

4.5 CARACTERIZACIÓN BIOLÓGICA DEL ACEITE VEGETAL EXTRAÍDO DEL FRUTO DE *SAPINDUS SAPONARIA* L.

4.5.1 Determinación de humedad del suelo

Para la determinación de humedad se pesó 25 g de suelo inicial para cada caja petri.

Donde:

Peso inicial (R1) = 126.5321 g

Peso inicial (R2) = 123.8289 g

Peso inicial (R3) = 130.0261 g

En la Tabla 17 se presenta la masa de cada caja petri con suelo utilizado en el proceso de secado.

Tabla 17.

Datos de peso constante de cajas petri con suelo.

Medición	Peso (g)		
	R1	R2	R3
1	125.3843	122.6884	128.9035
2	125.3846	122.6880	128.9033
3	125.3849	122.6886	128.9036
4	125.3844	122.6889	128.9037
5	125.3845	122.6890	128.9036
6	125.3847	122.6891	128.9038
7	125.3850	122.6891	128.9040
8	125.3855	122.6894	128.9040

9	125.3855	122.6894	128.9045
10	125.3855	122.6894	128.9045

Nota: Los registros de peso evidencian la estabilización de la masa del suelo tras el secado, confirmando la condición de peso constante. Este resultado asegura la confiabilidad en la determinación de humedad gravimétrica y la caracterización fisicoquímica del material.

De acuerdo con la ec. 11 se realizó los siguientes cálculos:

Cálculo para R1:

$$Hs = \frac{[126.5321 \text{ g} - 125.3855]}{[25 \text{ g} - (126.5321 \text{ g} - 125.3855)]} \times 100 = 4.80$$

Cálculo para R2:

$$Hs = \frac{[123.8289 \text{ g} - 122.6894 \text{ g}]}{[25 \text{ g} - (123.8289 \text{ g} - 122.6894 \text{ g})]} \times 100 = 4.77$$

Cálculo para R3:

$$Hs = \frac{[130.0261 \text{ g} - 128.9045 \text{ g}]}{[25 \text{ g} - (130.0261 \text{ g} - 128.9045 \text{ g})]} \times 100 = 4.69$$

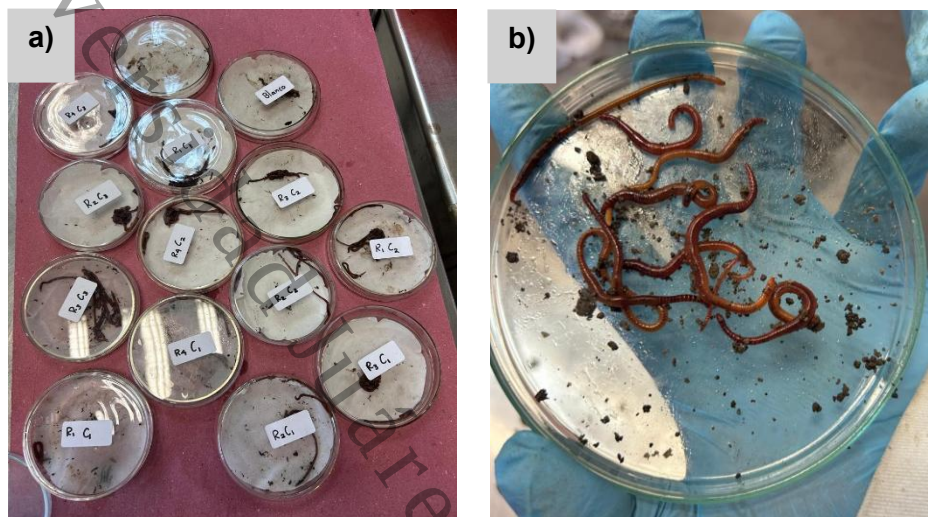
El resultado obtenido indica la humedad inicial del suelo, la cual se ajustó a 45 % de humedad empleando un higrómetro.

4.5.1.2 Determinación de la concentración letal media (CL₅₀) del aceite vegetal extraído del fruto de *sapindus saponaria* L. en lombrices *eisenia foetida*.

El resultado experimental obtenido no indica un dato representativo para determinar la concentración letal media (CL₅₀) por el método de Probit o Spearman-Kärber recortado, ya que no hubo muerte significativa que puede determinar el método anteriormente mencionado, Figura 4.5.1.2.

Figura 4.5.1.2

Determinación de la concentración letal media (CL₅₀) del aceite extraído del fruto del sapindus saponaria L. en eisenia foetida.



Nota: Etapas de la medición de la toxicidad: a) Aislamiento de lombrices. b) Revisión de lombrices.

La Tabla 18 presenta el peso inicial y final de las lombrices durante los 14 días de prueba.

Tabla 18.

Peso inicial y final de lombrices en la prueba de CL₅₀.

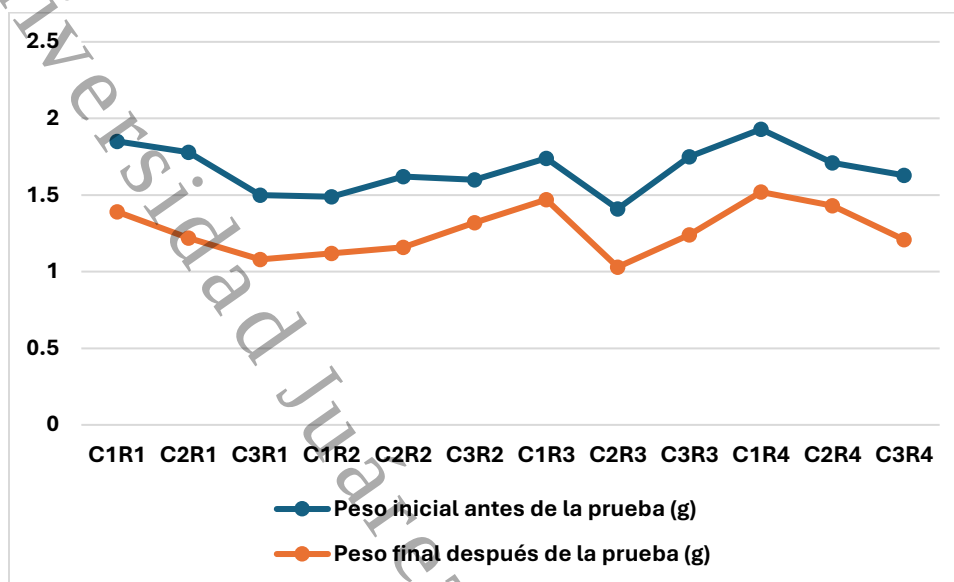
Réplica	Peso inicial antes de la prueba (g)	Peso final después de la prueba (g)
C1R1	1.85	1.39
C2R1	1.78	1.22
C3R1	1.50	1.08
C1R2	1.49	1.12
C2R2	1.62	1.16
C3R2	1.60	1.32
C1R3	1.74	1.47
C2R3	1.41	1.03
C3R3	1.75	1.24
C1R4	1.93	1.52
C2R4	1.71	1.43
C3R4	1.63	1.21

Nota: Los datos reflejan la disminución del peso en las réplicas tras la exposición experimental en las diferentes concentraciones. Asimismo, se tiene dato del peso inicial del blanco = 2.18 g y peso final del blanco = 1.71 g.

La figura 4.5.1.2.1. indica que durante los 14 días de prueba no hubo pérdida de peso significativa en las lombrices.

Figura 4.5.1.2.1.

Peso de lombrices en diferentes concentraciones en la prueba CL₅₀.



Nota: Los resultados evidencian cambios en la biomasa de *eisenia foetida* en función de la concentración del aceite vegetal aplicado. La disminución del peso en concentraciones altas sugiere un efecto tóxico sobre el metabolismo y la supervivencia de los organismos, aportando un parámetro complementario al cálculo de la CL₅₀.

En la Tabla 19 presenta que no hubo muerte de lombrices significativa durante los 14 días de prueba.

Tabla 19.

Reporte de muertes al finalizar la prueba CL_{50} en lombrices.

Replica	Muerte por replica
C1R1	0
C2R1	0
C3R1	0
C1R2	0
C2R2	0
C3R2	0
C1R3	0
C2R3	1
C3R3	0
C1R4	0
C2R4	1
C3R4	0

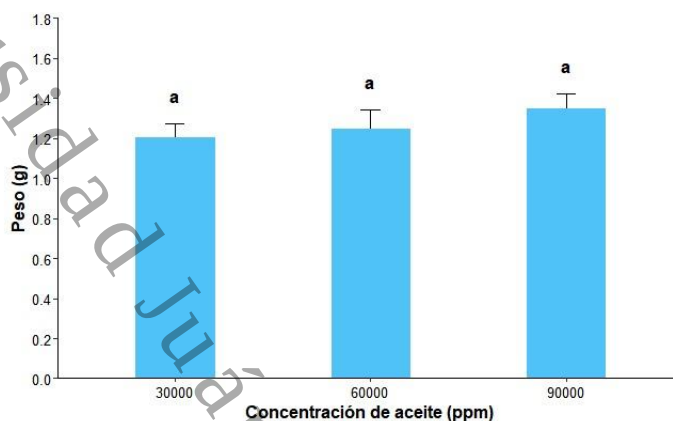
Nota: En la prueba de toxicidad aguda (CL_{50}) se registró únicamente la muerte de una lombriz, lo que evidencia una baja mortalidad en las condiciones evaluadas y sugiere una limitada toxicidad del extracto en el rango de concentración analizado.

Los datos obtenidos de la prueba determinaron un ANOVA para evaluar la diferencia significativa entre el peso a diferentes concentraciones.

En la Figura 4.5.1.2.1.1. se observa que las diferentes concentraciones en cada medición por réplica no afectó significativamente la pérdida de peso en las lombrices, Tabla 20 y 21.

Figura 4.5.1.2.1.1.

Efecto de la concentración de aceite obtenida del fruto sapindus saponaria L. a 30000, 60000 y 90000 (ppm) sobre el peso de las lombrices eisenia foetida.



Nota: En el ensayo realizado no se evidenció un efecto significativo bajo las condiciones experimentales evaluadas, lo que indica que las diferencias observadas carecen de relevancia estadística y no afectan la interpretación de los resultados.

Tabla 20.

Resultados de la prueba de medias TUKEY

Concentración (PPM)	Peso (g)	SD	SE	Grupo
30000	1.2025	0.1381726	0.06908630	A
60000	1.2450	0.1912241	0.09561206	A
90000	1.3500	0.1494434	0.07472171	A

Nota: Los resultados indican que las concentraciones evaluadas no presentan diferencias significativas en el peso de los organismos, según la prueba de Tukey ($p > 0.05$). Los grupos con la misma letra comparten estadísticamente el mismo nivel de respuesta.

Tabla 21.

Resultados del análisis ANOVA aplicado a las variables experimentales.

Fuente	DF	Suma cuadrática	Media cuadrática	Valor F	Pr (>F)
Concentración	1	0.04351	0.04351	1.839	0.205
Residuos	10	0.23658	0.02366		

Nota: El análisis de varianza indicó que la concentración no produjo diferencias estadísticamente significativas en la variable de respuesta ($p = 0.205 > 0.05$).

El análisis de varianza mostró que no hay diferencias significativas entre tratamientos con concentraciones diferentes de aceite. La prueba de medias de Tukey obtuvo solo una agrupación de medias ya que no hay diferencias significativas entre las concentraciones.

4.6 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ACEITE ESENCIAL EXTRAÍDO DEL FRUTO DEL *SAPINDUS SAPONARIA* L.

Para el cálculo del rendimiento en la extracción se aplicó la ec. 5 mencionado anteriormente:

Donde:

$$\gamma = \frac{0.625 \text{ g}}{30 \text{ g}} \times 100 = 2.083 \%$$

Este cálculo se realizó para cada corrida como se muestra en la Tabla 22.

En la Tabla 22, se muestra el resultado de la variable de respuesta del diseño de experimentos, es decir, el rendimiento. Se observa que el mayor rendimiento se obtiene a una presión de 5207.11 psi y una temperatura de 45 °C. De acuerdo con investigaciones (Temelli, 2009., De Aguiar & Martínez, 2015, Catchpole et al., 2018, Núñez, 2020), el

rendimiento de extracción aumenta con la presión debido a un aumento en la solubilidad de los lípidos en SC-CO₂ basado en un aumento en la densidad de CO₂. Además, se observó que al mantener la presión en el punto central de 4500 psi y 45 °C no presentó cambios significativos con respecto al rendimiento.

Reportes recientes como Reyes, 2020 obtuvo un rendimiento de aceite de hoja de maguey de 1.63% a una presión de 5414 psi y temperatura de 57 °C por el método de extracción supercrítica con CO₂. Dorado et al., 2016, obtuvieron un mayor rendimiento en aceite de semilla de guanábana de 12.95% a 38.1 MPa y 323 K, el cual es superior al obtenido mediante extracción etanólica con un 6.15% en rendimiento. Chaudhary et al., 2025, optimizaron los parámetros de extracción con fluidos supercríticos de CO₂, obteniéndose un rendimiento máximo de aceite de *zingiber officinale* Roscoe del 2.78% bajo condiciones óptimas de 60 °C y 294.54 bar. De acuerdo con los reportes mencionados anteriormente, los parámetros de presión y temperatura por el método de extracción supercrítica con CO₂ indican que a mayor presión se obtiene un mayor rendimiento. Además, la temperatura de extracción de compuestos termolábiles como los que comprenden a los aceites esenciales, los valores deben establecerse en el rango de 35-50 °C para evitar degradación de los compuestos.

Tabla 22.

*Rendimiento de extracción del aceite esencial extraído del fruto del *sapindus saponaria* L.*

Corrida	Cantidad de extracto obtenido (g)	γ
1	0.625	2.083
2	0.372	1.24
3	0.486	1.62
4	0.347	1.156
5	0.312	1.04
6	0.566	1.886
7	0.351	1.17
8	0.381	1.27
9	0.366	1.22
10	0.571	1.903
11	0.553	1.843
12	0.362	1.206
13	0.368	1.226

Nota: Los resultados muestran la variabilidad en la cantidad de extracto obtenido entre corridas. Estos datos permiten evaluar la consistencia del proceso de extracción y comparar la eficiencia entre repeticiones.

4.7 DISEÑO EXPERIMENTAL

Las condiciones de extracción de aceite esencial extraído del fruto del *sapindus saponaria* L. por el método SFE con CO₂ determinaron el rendimiento del aceite. La interacción de

presión y temperatura presentaron un efecto estadísticamente significativo ($p < 0.05$) sobre el rendimiento en la extracción del aceite del fruto de *sapindus saponaria* L.

El análisis de varianza presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) en los factores de presión y temperatura. Además, los términos cuadráticos y de interacción no mostraron efectos significativos en la respuesta (rendimiento). El análisis presentó una R^2 de 85.88 %. Asimismo, las variables óptimas de operación para un mejor rendimiento de aceite se obtuvieron como punto estacionario en unidades originales: temperatura de 46.23519 °C y presión de 3922.10127 psi, Tabla 23.

Tabla 23.

Análisis de varianza en el análisis de superficie de respuesta.

Fuente	DF	Suma cuadrada	Media cuadrada	Valor F	Pr (>F)
F0 (x1, x2)	2	0.98937	0.49468	27.1080	0.0005056
TWI (x1, x2)	1	0.00632	0.00632	0.3463	0.5746811
PQ (x1, x2)	2	0.42795	0.21398	11.7256	0.0058242
Residual	7	0.12774	0.01825		
Falta de ajuste	3	0.12244	0.04081	30.7978	0.0031837
Puro error	4	0.00530	0.00133		

Nota: La tabla muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para el modelo, incluyendo los grados de libertad (DF), las sumas y medias cuadradas, el estadístico F y el valor de probabilidad ($Pr > F$) asociados a cada fuente de variación.

Los coeficientes codificados representan el diseño central compuesto donde indica 4 puntos al cubo, 5 puntos centrales y 4 puntos axiales, lo cual genera un diseño con 13 corridas experimentales, Tabla 24.

Tabla 24.

Coeficientes codificados del diseño central compuesto para las corridas de extracción de aceite.

Temperatura (x1)	Presión (x2)	Rendimiento
-1.00000	1.41422	2.083
-1.00000	0.00000	1.240
0.41422	-0.00000	1.620
-2.00000	-1.00000	1.156
0.00000	-1.00000	1.040
0.00000	1.00000	1.886
-1.00000	0.00000	1.170
-1.00000	0.00000	1.270
-1.00000	0.00000	1.220
-2.41422	0.00000	1.903
-2.00000	1.00000	1.843
-1.00000	-1.41422	1.206
-1.00000	0.00000	1.226

Nota: Los coeficientes codificados permiten comparar los efectos relativos de la temperatura (x1) y la presión (x2) sobre el rendimiento del proceso. Los resultados muestran la variabilidad en la respuesta, evidenciando las condiciones que favorecen una mayor extracción.

Tabla 25.

Superficie de respuesta del rendimiento. Valor de significancia del modelo.

Min	1Q	Mediana	3Q	Max
-0.188369	-0.055199	0.000801	0.053028	0.168718

Nota: Los resultados muestran que la distribución de los datos se concentra alrededor de la mediana (0.0008), con valores que oscilan entre -0.188 y 0.169. Los cuartiles permiten identificar la dispersión y el rango intercuartílico, útil para evaluar la variabilidad del conjunto.

Tabla 26.

Valor de significancia de cada parámetro del modelo.

	Estimar	Error	Valor t	Pr (> t)
(Interceptar)	3.158e+01	8.284e+00	3.812	0.00661**
Temperatura	-8.491e-01	2.211e-01	-3.841	0.00636**
Presión	-5.574e-03	2.211e-03	-2.521	0.03973*
I (Temperatura^2)	8.508e-03	2.049e-03	4.153	0.00428**
I (Presión^2)	6.169e-07	2.049e-07	3.011	0.01964*
Temperatura: Presión	1.590e-05	2.702e-05	0.589	0.57468

Nota: Los resultados muestran que la temperatura, la presión y los términos cuadráticos (Temperatura² y Presión²) tienen efectos estadísticamente significativos sobre la variable

de respuesta ($p < 0.05$), mientras que la interacción Temperatura: Presión no resultó significativa ($p = 0.575$). Esto sugiere que los efectos principales y cuadráticos son relevantes en el modelo, pero la interacción no contribuye de manera significativa.

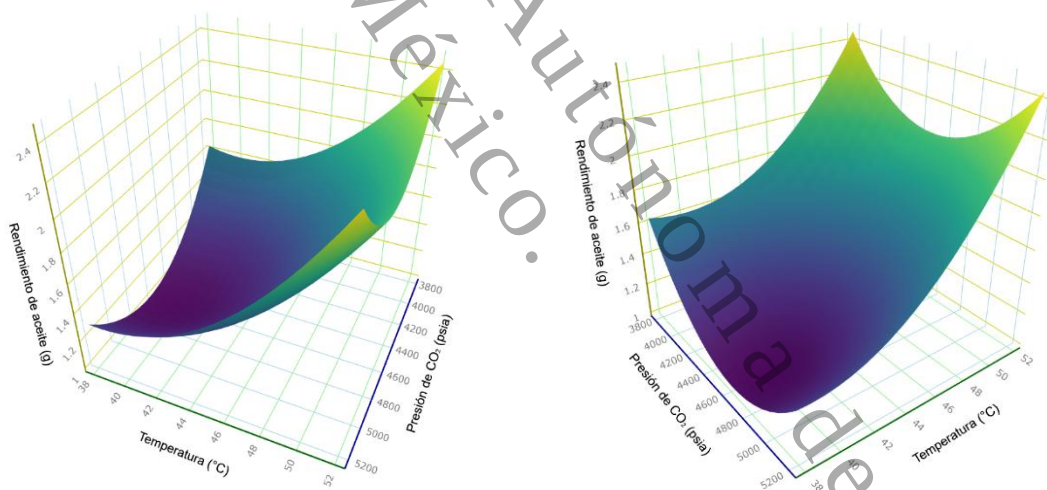
En el análisis se obtuvo una R cuadrada ajustado de 85.86%. Además, todos los parámetros mostraron significancia estadística excepto la intersección temperatura y presión.

Modelo:

$$Y = 31.58 - 0.8491(x_1) - 0.005574(x_2) + 0.0000159(x_1)(x_2) + 0.008508(x_1^2) + 0.0000006169(x_2^2)$$

Figura 4.7.1.

Análisis de superficie de respuesta del diseño experimental de extracción de aceite

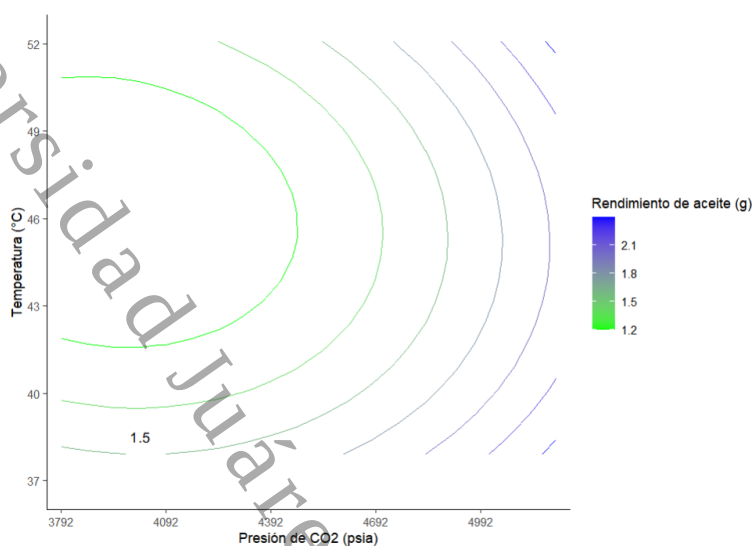


Nota: La Figura 4.7.1, ilustra el comportamiento de los dos factores empleados en el diseño experimental (presión y temperatura) construyó un diagrama de dispersión para cada factor.

En el diagrama de rendimiento vs presión se puede observar, que se obtuvo un buen rendimiento en valores óptimos de temperatura a 46.23519 °C y presión de 3922.10127 psi.

Figura 4.7.2.

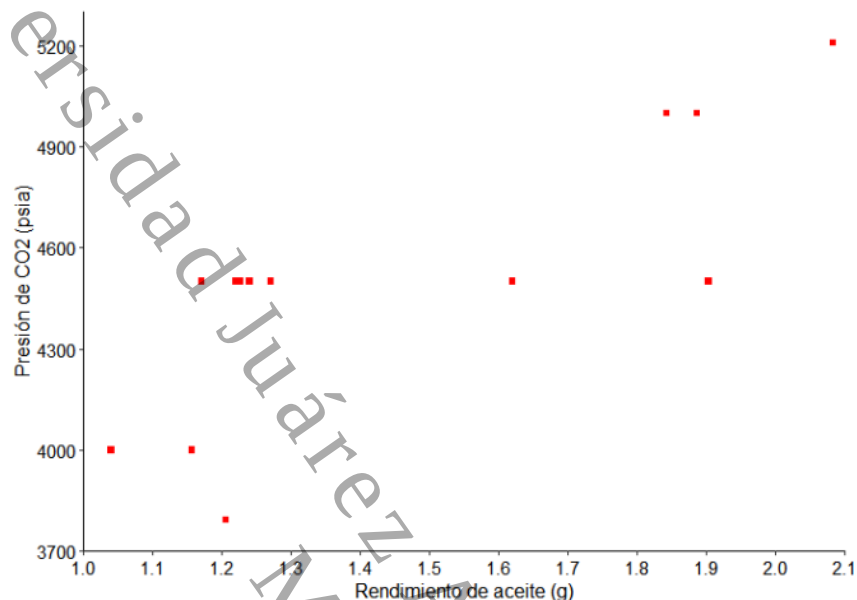
Análisis del gráfico de contornos del diseño experimental de extracción de aceite



Nota: En la Figura 4.7.2 se observa un gráfico de contorno que permite seleccionar el mejor parámetro de rendimiento en la extracción de aceite para las variables de temperatura y presión. Puede apreciarse que el valor óptimo se encuentra en 2.1.

Figura 4.7.3

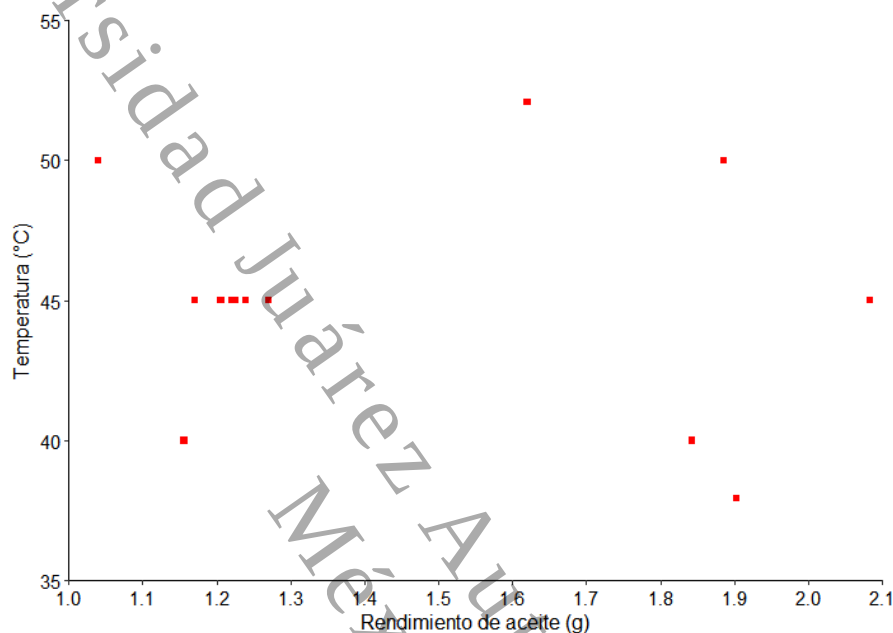
Diagrama de dispersión rendimiento vs presión del diseño experimental de extracción de aceite



Nota: El diagrama de dispersión muestra la relación entre el rendimiento de extracción y la presión aplicada en el diseño experimental. La tendencia observada permite identificar el efecto de la variable presión sobre la eficiencia del proceso, aportando evidencia cuantitativa para la optimización de las condiciones operativas en la obtención de aceite esencial.

Figura 4.7.4.

Diagrama de dispersión rendimiento vs temperatura del diseño experimental de extracción de aceite



Nota: El diagrama de dispersión representa la relación entre el rendimiento de extracción y la temperatura aplicada en el diseño experimental. La distribución de los puntos permite visualizar la tendencia del comportamiento del sistema, evidenciando el efecto de la variable temperatura sobre la eficiencia del proceso y aportando información clave para la optimización de las condiciones operativas.

En las Figuras 4.7.3 y 4.7.4 los diagramas de dispersión muestran puntos dispersos que no se concentra en una sola zona. Los puntos separados indican una relación débil entre las variables. El coeficiente de correlación de -1 y 1 que existe entre la relación de dos variables como es presión con CO₂ y rendimiento de aceite o temperatura y rendimiento de aceite indica una correlación positiva o negativa.

CAPITULO 5. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

5.1 CONCLUSIÓN

El uso de aceite vegetal obtenido del fruto del *sapindus saponaria* L. podría ser una alternativa para sustituir los tensioactivos sintéticos debido a los altos porcentajes de ácidos grasos que tienen propiedades tensioactivas, mitigando en parte el problema de la contaminación ambiental por causa de la industria petrolera.

Los resultados cromatográficos mostraron que la extracción realizada a partir de raíz, tallo, hojas, flores y frutos de *sapindus saponaria* L. mediante el método soxhlet presentó altas concentraciones de etanol y bajas concentraciones de ácidos grasos. En comparación, la extracción con fluidos supercríticos de CO₂ (SFE) resultó más viable, al ser libre de residuos de disolventes como el hexano y requerir menor tiempo de operación. Además, permitió identificar 12 compuestos con propiedades tensioactivas presentes en el fruto.

Además, el estudio del proceso de extracción de aceite del fruto de *sapindus saponaria* L. mediante fluidos supercríticos de CO₂ (SFE) permitió obtener un modelo cuadrático de segundo orden que predice el rendimiento en función de los factores significativos. Este modelo determinó condiciones óptimas de operación a una temperatura de 46.23519 °C y una presión mínima de 3922.10127 psi. Asimismo, se obtuvo un mayor rendimiento de 2.083% a una presión de 5207.11 psi y una temperatura de 45 °C

El balance hidrofílico-lipofílico (HLB) obtenido fue de 5.1236, clasificándose como un agente emulgente de tipo agua en aceite (w/o), por lo que se podría tener aplicación en las industrias farmacéuticas, cosmética, alimentos y entre otros. Asimismo, se observó una reducción en la tensión superficial del agua de 72 mN/m a 52.5 mN/m y la concentración micelar crítica (CMC) determinada fue de 4.55015×10^{-05} .

5.2 RECOMENDACIONES

La extracción de aceite vegetal por SFE con CO₂ se debe realizar a valores óptimos a la mínima de presión y temperatura (3500 - 4000 psi y 40 ± °C) como se reporta en el apartado de resultado con el modelo matemático, al igual se debe cuidar las condiciones externas donde se ubique el cilindro de CO₂.

El tamaño de partícula del material vegetal es importante con la finalidad de incrementar el área superficial y obtener un mayor rendimiento en el proceso de extracción del aceite esencial, lo cuál se recomienda que sea menor de 2 mm.

La determinación de la concentración letal media (CL50) se sugiere realizar con 10 concentraciones diferentes para obtener resultados que se puedan representar por el método de Probit.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

Almeida Raquel M., Barbosa Luiz C.A., Demuner Antonio J., De Fujiwara Ricardo T., Rodríguez-Hernández Diego & Ferreira Sebastião R. 2016. Highly potent anti-leishmanial derivatives of hederagenin, a triperpenoid from *Sapindus saponaria* L. *European Journal of Medicinal Chemistry*. Volume 124. Pages 153-159. ISSN 0223-5234. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2016.08.030>

Alencar, M. L. 2020. Distribución, bioecología y provisión de bienes y servicios ecosistémicos de *Prosopis alba* en Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 119(2), 1–11. <https://doi.org/10.24215/16699513e050>

Araújo-Lima Carlos Fernando, Bocayuva Tavares Gustavo Duarte, Carrão Dantas Eduardo Kennedy, Fortes Aiub Claudia Alessandra, Felzenszwalb Israel & Siqueira Júnior César Luis. 2021. In vitro biochemical characterization and genotoxicity assessment of *Sapindus saponaria* seed extract. *Journal of Ethnopharmacology*. Volume 276. 114170. ISSN 0378-8741. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2021.114170>

Ahood Khalid, Anees Ahmed Khalil, Gulzar Ahmad Nayik, Khursheed Tara, Muhammad Nadeem Akhtar, Muhammad Rizwan Tariq, Mugabi Robert & Tawfiq Alsulami. 2024. Ultrasound-assisted solvent extraction of phenolics, flavonoids, and major triterpenoids from *Centella asiatica* leaves: A comparative study. *Ultrasonics Sonochemistry*. Volume 111. 107091. ISSN 1350-4177. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107091>

Ahmad, R., Khan, S., & Ali, M. 2024. Advances in solvent penetration and plant tissue permeability for enhanced extraction processes. *Industrial Crops and Products*, 195, 116345.

Aguilar-Galvez Ana, Campos David, Chirinos Rosana, Contardo Ingrid, Guzmán Fanny, Figueroa-Merma Andrés, Rodríguez-Díaz Jamerccy, Scharff-Salinas Romina & Pedreschi Romina. 2024. Conventional and ultrasound-assisted extractions of protein from *sacha inchi* (*Plukenetia volubilis*) and their impact on the physicochemical and structural characteristics. *Applied Food Research*. Volume 4. Issue 2. 100545. ISSN 2772-5022. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100545>

Aldemar Gasca Cristian, Dassoler Marline, Dotto Brand Guilherme, De Medeiros Nóbrega Yanna Karla, De Oliveira Magalhães Pérola, Gomes Sueli Maria, Fonseca-Bazzo Yris Maria, Masrouah Jamal Claudia & Silveira Dâmaris. 2020. Chemical composition and antifungal effect of ethanol extract from *Sapindus saponaria* L. fruit against banana anthracnose. *Scientia Horticulturae*. Volume 259. 108842. ISSN 0304-4238. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108842>

Aparecida Silva Angela, Azevedo João Lúcio, Casarotti Orlandelli Ravelly, Castro Juliana Cristina, Domingos Polli Andressa, Dos Santos Ribeiro Marcos Alessandro, García Adriana, Menicoze Santos Caroline, Polonio Julio Cesar, Abreu-Filho Benício Alves, Pereira Cabral Marcia Regina, Sarragiotto Maria Helena, Pamphile João Alencar, 2020. Secondary metabolites of *Curvularia* sp. G6-32, an endophyte of *Sapindus saponaria*, with antioxidant and anticholinesterasic properties. *Natural Product Research*. Volume 35. Issue 21. Pages 4148-4153. ISSN 1478-6419. <https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1739681>

Abdulrahman A. Al-Soqeer, Abdelsalam M. Menshawy, Ahmed M. Aggag, Hassan M. Mousa & Mohamed I. Motawei. 2023. Genetic diversity of the chemical composition and pod production of *Prosopis juliflora* trees grown in Saudi Arabia, *Heliyon*. Volume 9. Issue 11. e21649. ISSN 2405-8440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21649>

Aguilar-Zárate Pedro, Muñiz-Márquez Diana Beatriz, Veana Fabiola & Wong-Paz Jorge Enrique. 2020. Impacto de las tecnologías de extracción verdes para la obtención de compuestos bioactivos de los residuos de frutos cítricos. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23: 1-11. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.255>

Aragón D. Camilo, Flechas C. Henry A., Jiménez G. P. John A. & Morales Nelly B. 2009. Investigación y desarrollo de tres productos del jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.) como base para su industrialización. *Colombia Forestal*, 12, 171-182. DOI: [10.14483/UDISTRITAL.JOUR.COLOMB.FOR.2009.1.A12](https://doi.org/10.14483/UDISTRITAL.JOUR.COLOMB.FOR.2009.1.A12)

Andersson M.P., Karcz A.P. & Turchi M. 2022. First-principles prediction of critical micellar concentrations for ionic and nonionic surfactants. *Journal of Colloid and Interface Science*.

Volume 606, Part 1. Pages 618-627. ISSN 0021-9797.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.044>

Aracava Keila K., Koshima Cristina C., Nakamoto Karina T., Rodrigues Christianne E.C., Umeda Thayla K. & Venâncio Larissa L. 2016. (Liquid+liquid) equilibrium for systems composed of clove and allspice essential oil compounds and hydrous ethanol at T=298.2K. The Journal of Chemical Thermodynamics. Volume 95. Pages 54-62. ISSN 0021-9614. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2015.10.023>

Archila, L., Rodríguez, M., & Pérez, J. 2022. FTIR characterization of *Sapindus saponaria* L. fruit essential oil: Functional group identification. Journal of Essential Oil Research, 34(2), 145–153. <https://doi.org/10.1080/10412905.2022.2034567>

Abascal, E., & Gracia, J. 2009. Tensión superficial: prácticas y fundamentos. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ahmed Shehzad, Alameri Waleed, Fanourgakis George S., Froudakis George E., Karanikolos Georgios N. & Iskandarov Javad, 2024. Machine learning prediction and optimization of CO₂ foam performance for enhanced oil recovery and carbon sequestration: Effect of surfactant type and operating conditions. Geoenery Science and Engineering. Volume 240. 213064. ISSN 2949-8910. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213064>

Aboel-Ainin Moustafa A., Khaled Khaled A.M. & Olabi Abdul G. 2025. 2.15 - Bio-surfactant: Definitions, Types, Applications, Genetics, and Circular Economy. Comprehensive Green Materials (First Edition). Elsevier. Pages 220-234. ISBN 9780443157394. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15738-7.00041-6>

Abdul, G., Gamwo, I. K., Bamgbade, B. A., & Burgess, W. A. 2017. Experimental investigation and molecular-based modeling of crude oil density at pressures to 270 MPa and temperatures to 524 K. En Application of thermo-fluid processes in energy systems (pp. 141–155). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_6

Alfaro, M. C., Gómez, R., & Torres, J. 2018. Evaluation of sucrose esters and polysorbates as emulsifiers: HLB values and stability in food systems. Food Hydrocolloids, 81, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.015>

Abdeljawad Rashd Jebrel, Abdulhakim Shaah Marwan, Asyraf Kassim Mohd, Lalung Japareng, Masaud Allzrag Akrm Mohamed & Wijaya Dani. 2024. Kinetics and thermodynamic studies on biodiesel synthesis via Soxhlet extraction of *Scenedesmus parvus* algae oil. *Energy Conversion and Management: X*. Volume 23.100633. ISSN 2590-1745. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100633>

Amin, S M Nurul., Arshad, Aziz., Brown, Christopher L., Juraimi, Abdul Shukor., Islam, Md Ariful & Uddin, Md Kamal. 2021. Determination of Median Lethal Concentration (LC₅₀) for Endosulfan, Heptachlor and Dieldrin Pesticides to African Catfish, *Clarias gariepinus* and Their Impact on Its Behavioral Patterns and Histopathological Responses. *Toxics*, 9(12), 340. <https://doi.org/10.3390/toxics9120340>

Aregbe Azeez G., Franks George V., Hsia Tina, Krasowska Marta, Thang San H., 2024. Stability and characteristics of kerosene-in-water emulsions with xanthate surfactants: Influence of hydrophilic-lipophilic balance and molecular weight. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Volume 700.134818. ISSN 0927-7757. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134818>

Arriola César, Alvarez Félix, Rondón Raúl & Scotto Carlos. 2019. Determinación de la concentración letal media (CL50) producida por el sulfato de cobre pentahidratado en diez especies de peces dulceacuícolas bioindicadores utilizados en el Perú. *Ciencia y Desarrollo*, ISSN 1994-7224, ISSN-e 2409-2045, págs. 49-57. <http://dx.doi.org/10.21503/cyd.v22i4.1837>

Aruna Jyothi Kora. 2022. Plant saponin biosurfactants used as soap, hair cleanser, and detergent in India. *Applications of Next Generation Biosurfactants in the Food Sector*. Academic Press. Pages 459-477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824283-4.00004-6>

Algethami Faisal K., Alomar Taghrid, Arrua R. Dario, Hilder Emily F. & Mansour Fotouh R. 2023. Effect of hydrophilic/lipophilic balance on the porogenic properties of non-ionic surfactants for monolith preparation and chromatographic separation. *Journal of Chromatography A*. Volume 1699. 463991. ISSN 0021-9673. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.463991>

Ayala Alfredo A., Cerón Leidy J. & Hurtado Andrés M. 2016. Efecto de la Presión y la Temperatura de Extracción con CO₂ Supercrítico Sobre el Rendimiento y Composición de Aceite de Semillas de Guayaba (*Psidium guajava*). Inf. tecnol. vol.27. no.6. La Serena. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000600025>

Azevedo Sudati Enikeyla, Bruna Luíza Pelegrini, De Souza Lima Marli Miriam, Kimura Newller Marcelo, Louzano Moreira Amanda, Piloto Ferreira Izabel Cristina, Ré Fabrícia & Reginaldo Sampaio Anderson. 2017. Thermal and rheological properties of soapberry *Sapindus saponaria* L. (Sapindaceae) oil biodiesel and its blends with petrodiesel, Fuel. Volume 199. Pages 627-640. ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.059>

Almeida Fabíola C.G., Bezerra Karen G.O., Rufino Raquel D., Sarubbo Leonie A. & Silva Israel G.S. 2021. Plant-derived biosurfactants: Extraction, characteristics and properties for application in cosmetics. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 34 102036. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102036>

Anagha, E. K., Sariga, R., ShyamSundar, K., Panda, R. C., Kalavathy, M. H., & Naik, S. N. (2025). Supercritical CO₂ assisted extraction, purification and modelling of free fatty acids from the crude mixture – A case study of tallow hydrolysis. The Journal of Supercritical Fluids, 209, 106542. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2025.106542>

Antolak Hubert, Babic Mirko, Babic Ljiljana, Berlowska Joanna, Kregiel Dorota, Proestos Charalampos, Witonska Izabela & Zhang Bolin. 2017. Saponin-based, biological-active surfactants from plants. Application and Characterization of Surfactants. <http://dx.doi.org/10.5772/68062>

Amat, S., Mouahid, A., Claeys-Bruno, M., Bombarda, I., Ciavarella, A., Myotte, E., Nisteron, J. P., Crampon, C., & Badens, E. 2022. Supercritical CO₂ extraction of oil from Moroccan unroasted argan kernels: Effects of process parameters to produce cosmetic oil. Journal of CO₂ Utilization, 59, 101952. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.101952>

Alexandridis Paschalis, Bodratti Andrew M., Jahan Ruksana & Tsianou Marina. 2019. Biosurfactants, Natural Alternatives to Synthetic Surfactants: Physicochemical Properties and Applications. Advances in Colloid and Interface Science. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102061>

Adeyemi Gbadegesin Abioun, Fadairo Adesina & Ling Kegang. 2024. Experimental investigation of the impact of soybean oil-derived surfactant as a surface-active agent during gas well deliquification. *Petroleum Research*. Volume 9. Issue 4. Pages 489-501. ISSN 2096-2495. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.03.007>

Amalia, R., Firdausiyah, T., Yulianto, T., & Faisol, K. 2022. The local strong metric dimension in the join of graphs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2157(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2157/1/012004>

Amat, S., Mouahid, A., Bombarda, I., Claeys-Bruno, M., Myotte, E., Nisteron, J. P., Crampon, C., & Badens, E. 2021. Supercritical CO₂ extraction of Moroccan argan (*Argania spinosa* L.) oil: Extraction kinetics and solubility determination. *Journal of CO₂ Utilization*, 46, 101458. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101458>

Ali, M., Yin, S., Niu, L., Shibata, M., Liu, Y., & Hagiwara, T. 2022. Optimization of fucoxanthin extraction obtained from *Undaria pinnatifida* stem using supercritical CO₂ extraction. *Frontiers in Nutrition*, 9, 981176. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.981176>

Almeida Fabíola Carolina G., Almeida Darne G., Luna Juliana M., Meira Hugo M., Rocha e Silva Nathalia Maria P., Rufino Raquel D., Soares da Silva Rita de Cássia F. & Santos & Leonie A. Sarubbo Valdemir A. 2018: Natural Surfactants and Their Applications for Heavy Oil. Removal in Industry, Separation & Purification Reviews. <https://doi.org/10.1080/15422119.2018.1474477>

Bañares Celia, Chabni Assamae, Torres Carlos F. & Vázquez Luis. 2025. Combination of expeller and supercritical CO₂ for the extraction of a phenolic-rich olive oil – A preliminary chemical characterization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. ISSN 1226-086X. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.12.065>

Bregni Carlos, Pasquali Ricardo C. & Sacco Natalia. 2009. The Studies on Hydrophilic-Lipophilic Balance (HLB): Sixty Years after William C. Griffin's Pioneer Work (1949-2009). *Latin American Journal of Pharmacy*. 28 (2): 313-7. ISSN 0326-2383. <https://www.researchgate.net/publication/267952144>

Berg, J. M., Tymoczko, J. L., & Gatto, G. J. 2019. *Biochemistry* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.

Braz, J. M., Nitschke, M., & Pastore, G. M. 2014. Biosurfactants: Production and applications. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(2), 229–241. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000200001>

Barros Lillian, Braz de Oliveira Arildo José, Correia Gonçalves Regina Aparecida, Da Silva Santos Éverton, Dos Santos Filho José Rivaldo, Mandim Filipa, Molina Adriana K. & Piloto Ferreira Izabel Cristina. 2024. Evaluation of antitumoral and antioxidant activities of the hydroalcoholic extract and fractions obtained from the fruit pericarp of *Sapindus saponaria* L. *Natural Product Research*. Volume 38, Issue 6. Pages 1002-1006. ISSN 1478-6419. <https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2211214>

Bhattarai Ajaya, Kafle Ananda, Prasad Devkota Hari & Rai Summi. 2023. Characterization of saponins from the leaves and stem bark of *Jatropha curcas* L. for surface-active properties. *Heliyon*. Volume 9. Issue 5. e15807. ISSN 2405-8440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15807>

Bello Ayomikun, Cheremisin Alexey, Karamov Tagir, Morkovkin Andrey, Rodionov Alexander & Ivanova Anastasia. 2025. An experimental study of the physical mechanisms of fluid flow in tight carbonate core samples by binary surfactants, *Heliyon*. Volume 11, Issue 4. e42221. ISSN 2405-8440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42221>

Bregni, C., & Pasquali, I. 2006. Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter. *The Journal of Supercritical Fluids*, 38(2), 146–166. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.03.020>

Becerra Gutiérrez Lizzie Karen & Horna Acevedo María Valeria. Aislamiento de microorganismos productores de biosurfactantes y lipasas a partir de efluentes residuales de camales y suelos contaminados con hidrocarburos. *Scientia Agropecuaria* vol.7. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.03>

Baesso, M. L., Oliveira, R., & Santos, F. 2021. Infrared spectroscopy applied to vegetable oils: Functional group analysis and stability. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 252, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119126>

Bombardelli, E., Morazzoni, P., & Caruso, D. 2018. Phytochemical extraction and characterization of essential oils: Advances and perspectives. *Phytochemistry Reviews*, 17(4), 765–780. <https://doi.org/10.1007/s11101-018-9567-2>

Blanco Hernández Yisel, Mena Valdés Licet, Plaza Paredes Luis Enrique, Salas Olivet Eva, Sierra González Gustavo, Tamargo Santos Beatriz & Otero González Anselmo. 2015. Determinación de saponinas y otros metabolitos secundarios en extractos acuosos de *Sapindus saponaria* L. (jaboncillo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 20(1):106-116 <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:170732086>

Balderas Cortes José de Jesús, Gortáres Moroyoqui Pablo, Mondaca Fernández Iram, Riojas González Héctor H. & Torres Bustillos Luis G. 2010. Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Química Viva*. vol. 9. núm. 3. pp. 120-145. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86315692003>

Baptiste Jean Hounda Fokou, Boyom, F. Fekam & Dongmo P. Michel Jazet. 2020. Composición química y propiedades farmacológicas del aceite esencial. IntechOpen. [doi: 10.5772/intechopen.86573](https://doi.org/10.5772/intechopen.86573)

Barrios Sofía, Gonzalez Mariana, Lema Patricia, Novick Martina & Pérez Nicolás. 2025. Learning ultrasound assisted extraction through the use of sugar-coated chocolates. *Ultrasonics Sonochemistry*. Volume 114. 107250. ISSN 1350-4177. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107250>

Bui Quang Minh, Nguyen Xuan Hung, Nguyen Quang Trung, Nguyen Anh Tuan & Vu Duc Nam. 2025. Comparative Efficiency of Soxhlet and Accelerated Solvent Extraction (ASE) Methods for Dioxin/Furan Analysis in Ash Samples: A Green Chemistry Perspective. *Green Analytical Chemistry*. 100227. ISSN 2772-5774. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2025.100227>

Butale, S., Patil, R., & Deshmukh, A. 2018. Arduino-based soil moisture monitoring system. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 8(4), 112–118.

Braz de Oliveira Arildo José, Bruna Pelegrini Luíza, Lovato Letícia, Piloto Ferreira Izabel Cristina & Rodrigues Juliana. 2014. Seed oil of *Sapindus saponaria* L. (Sapindaceae) as potential C16 to C22 fatty acids resource. *Biomass and Bioenergy*. Volume 60. Pages 247-

251. ISSN 0961-9534. Calónico-Soto, J. 2019. Fasc. 85 Sapindaceae. Fl. Guerrero. Prensas de Ciencias. Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., México. 117 Pp. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.016>

Blanco Hernández Yisel, Mena Valdés Licet, Salas Olivet Eva, Sierra González Gustavo, Tamargo Santos Beatriz, Otero González Anselmo & Plaza Paredes Luis Enrique. 2015. Determinación de saponinas y otros metabolitos secundarios en extractos acuosos de *Sapindus saponaria* L. (jaboncillo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales* 20(1):106-116. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962015000100010&lng=es&lng=.

Banat, I. M., Satpute, S. K., Cameotra, S. S., Patil, R., & Nyayanit, N. V. 2022. Biosurfactants, bioemulsifiers and exopolysaccharides from marine microorganisms: Applications in bioremediation and biotechnology. *Marine Drugs*, 20(6), 337. <https://doi.org/10.3390/md20060337>

Castillo Gilda, Fernández Solymar, Hernández Helis, Marquina Germania & Morillo Osmar. 2010. Optimización de los parámetros de extracción de aceite de palma africana utilizando co₂ supercrítico. *Bioagro*. vol.22. n.2. pp.89-94. ISSN 1316-3361.

Carmona Francisco Javier, Demeestere Kristof, González-Cortés Jose Joaquin, Lamprea-Pineda Paula Alejandra, , Lebrero Raquel, Van Langenhove Herman & Walgraeve Christophe. 2024. Effect of surfactant type and concentration on the gas-liquid mass transfer in biotrickling filters used for air pollution control. *Journal of Environmental Management*. Volume 367. 121968. ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121968>

Caenn, R., Darley, H. C. H., & Gray, G. R. 2017. Composition and properties of drilling and completion fluids (7th ed.). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-06043-6>

Campo, J., Rodríguez, M., & Pérez, L. 2023. Free acidity and fatty acid composition in vegetable oils: Comparative analysis of extraction methods. *Journal of Food Chemistry*, 412, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135142>

Caldas Batista Eduardo Augusto, Ferreira Moreno Isabela, Grimaldi Renato, Martins Strieder Monique, Martínez Julian, Rostagno Mauricio Ariel & Tonon de Souza Patrícia. 2025. Sequential supercritical fluid and pressurized liquid extraction of pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) almonds. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. Volume 43. 101902. ISSN 2352-554. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101902>

Catchpole, O., Moreno, T., Montañes, F., & Tallon, S. 2018. Perspectives on processing of high value lipids using supercritical fluids. *Journal of Supercritical Fluids*, 134, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.001>

Calónico, J. (2019). Descripción morfológica y crecimiento del jaboncillo (*Sapindus saponaria** L.) en condiciones tropicales*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].

Carrera, J., Martínez, P., & López, R. 2013. Critical micelle concentration of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) in aqueous solution at 25 °C. *Journal of Surfactants and Detergents*, 16(4), 567–574. <https://doi.org/10.1007/s11743-013-1456-2>

Cáceres, A. 2021. Determination of sodium dodecyl sulfate (SDS) micelle concentration in water at 25 °C. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 626, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127134>

Cardona Bermúdez Liliana María, Gómez Dorely David, Muñoz Laura María, Román Páez Melissa Andrea, Rivera Narváez Carlos Mario, Passaro Carvalho Catarina & Quiceno Rico Juan Manuel. 2016. GUÍA DE EXTRACCIÓN POR FLUIDOS SUPERCRÍTICOS: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES. SENNOVA.

Clément C., Fievez V., Hess H.D., Kreuzer M., Soliva C.R. & Zeleke A.B. 2008. In vitro screening of various tropical foliage, seeds, fruits and medicinal plants for low methane and high ammonia generating potentials in the rumen. *Animal Feed. Science and Technology*. Volume 147, Issues 1–3. Pages 53-71. ISSN 0377-8401. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.009>

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. 2015. *Termodinámica: Un enfoque de ingeniería* (8ª ed.). McGraw-Hill Interamericana. ISBN 978-607-15-1281-9

Cesaro Alessandra, Ciotola Enrica, Esposito Giovanni, Koch Konrad & Sottorff Ignacio. 2025. Assessment of trace organic chemicals in anaerobically digested sludge and their partitioning behaviour: Simultaneous Soxhlet chemical extraction and quantification via LC-MS/MS analysis. Water Research. Volume 268, Part B. 122780. ISSN 0043-1354. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122780>

Cen Chunze, Fourtakas Georgios, Lind Steven & Rogers Benedict D. 2024. A single-phase GPU-accelerated surface tension model using SPH. Computer Physics Communications. Volume 295. 109012. ISSN 0010-4655. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2023.109012>

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 5363230, oleato de hexilo. Recuperado el 14 de agosto de 2024 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hexyl-oleate>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 87260209, ácido caproico ácido caprílico. Consultado el 14 de agosto de 2024 en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Caproic-acid-caprylic-acid>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 11005, ácido mirístico. Consultado el 14 de agosto de 2024 en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Myristic-Acid>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 985, ácido palmítico. Recuperado el 14 de agosto de 2024 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Palmitic-Acid>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 12366, palmitato de etilo. Recuperado el 14 de agosto de 2024 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ethyl-palmitate>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 445639, ácido oleico. Recuperado el 14 de agosto de 2024 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Oleic-Acid>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 10465, ácido heptadecanoico. Consultado el 14 de agosto de 2024 en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Heptadecanoic-Acid>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 5282768, ácido cis-11-eicosenoico. Recuperado 14 de agosto de 2024 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/cis-11-Eicosenoic-acid>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 10467, ácido eicosanoico. Recuperado el 14 de agosto de 2024 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Eicosanoic-Acid>.

Centro Nacional de Información Biotecnológica 2024. Resumen de compuestos de PubChem para CID 638072, escualeno. Recuperado el 14 de agosto de 2024 de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Squalene>.

Chen Fengli, Huo Ruiyun, Ma Yibo, Yan Shuangmei, Yang Lei & Zhang Qiang. 2020. A novel microwave-assisted steam distillation approach for separation of essential oil from tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andrews) petals: Optimization, kinetic, chemical composition and antioxidant activity. *Industrial Crops and Products*. Volume 154. 112669. ISSN 0926-6690. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112669>

Chan Eng-Seng, Khan Tanveer Ahmad, Lee Boon-Beng & Ravindra Pogaku. 2012. Tensión superficial de soluciones viscosas de biopolímeros medida mediante el método del anillo de du Nouy y el método de caída de peso. *Polimo. Toro*. 69, 471–489. <https://doi.org/10.1007/s00289-012-0782-2>

Chang Yan-xu, Du Kun-ze, Gao Xiu-mei, Hao Jia, Li Jin, Wang Lanhui & Yang Xue-jing. 2020. Biosurfactant trehalose lipid-enhanced ultrasound-assisted micellar extraction and determination of the main antioxidant compounds from functional plant tea. *Journal of Separation Science*. doi: [10.1002/jssc.201900910](https://doi.org/10.1002/jssc.201900910)

Chen Xiangwei, Guo Jixiang, He Aiguo, Li Jiao, Song Hanxuan, Wang Xiwen, Wang Li & Wyclif Kiyangi. 2025. Development and performance evaluation of a new type of temperature resistant surfactant for ultra-deep well casing flushing. *Separation and*

Purification Technology. Volume 359, Part 1. 130427. ISSN 1383-5866.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130427>

Cordova Catherina, Guillén Juan & Tuesta Tarsila. 2020. Extracción por microondas libre de solvente del aceite esencial de naranja (*Citrus sinensis*), y el efecto de las condiciones de proceso en su rendimiento, composición y actividad antimicrobiana. Revista chilena de nutrición. Vol.47 no.6 Santiago. ISSN 0717-7518. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182020000600965>

Córdova-Bautista Yolanda, Domínguez-Domínguez Marivel, Hernández-Rivera Miguel A., Herrera-Haro José G., Martínez-Zurimendi Pablo & Ojeda-Morales Marcia E. 2017. Do surfactants influence the growth of Rhizophora mangle during restoration of contaminated soil with emulsified oil. Restoration Ecology.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.13639/supinfo>

Collins, J., Liu, J., Li, L., Cheng, S., Wang, K., Wu, J., & Ye, Y. 2024. Adaptability evaluation of high-density kill fluid for ultra-deep and ultra-high temperature well testing in Tarim Oilfield. Energies, 18(7), 1779. <https://doi.org/10.3390/en18071779>

Cuitláhuacuc Gala Victor. 2017. Estudio silvicultural de la especie Sapindus saponaria L en el estado de Campeche, México. Tecnológico Nacional de México.
<https://www.researchgate.net/publication/353692057>

Cuyos, M., Pérez, J., & Torres, L. 2005. Métodos cualitativos para la detección de saponinas en extractos vegetales. Revista de Ciencias Químicas, 21(3), 145–152.

Cuevas, J., Hernández, R., & López, M. 2012. Métodos de prueba fisicoquímicos para la determinación de humedad y sólidos totales en alimentos por secado en estufa. Revista Mexicana de Ciencias de los Alimentos, 23(2), 115–124.

Chaudhary Sujana, Gauchan Dhurva, Prasad Munankarmi Nabin Narayan, Shyaula Sajana Lal & Timilsina Parash Mani. 2025. Optimization of supercritical CO2 green extraction of Zingiber officinale Roscoe essential oil and comparative GC-MS profiling and biological activities with steam and simultaneous distillation. Industrial Crops and Products. Volume 236. 122067. ISSN 0926-6690. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122067>.

Carrera, C. 2019. Supercritical fluid extraction of natural products: Principles and applications. *Industrial Crops and Products*, 132, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.045>

Datta Manali, Gour Vinod Singh, Nipun Sanadhya, Parmar Ashok & Sharma Pooja. 2015. Biosurfactant characterization and its potential to remove sebum from hair. *Industrial Crops and Products*. Volume 69. Pages 462-465. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.007>

DAVIES J. T. 1957. A QUANTITATIVE KINETIC THEORY OF EMULSION TYPE. I. PHYSICAL CHEMISTRY OF THE EMULSIFYING AGENT. University Lecturer in Chemical Engineering, Cambridge. Reprinted from: Gas/Liquid and Liquid/Liquid Interfaces. Proceedings of 2nd International Congress Surface Activity, Butterworths. pp. 426-438. Pg.275.

Daood, H. G., Várölygi, J., & Biacs, P. A. 2008. Extraction of bioactive compounds from plant matrices using supercritical CO₂. *Journal of Supercritical Fluids*, 45(2), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.01.012>

Desalination and Water Treatment. Volume 57, Issue 3. Pages 1255-1261. ISSN 1944-3986. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.996007>

De Souza Lopes Isadora, Franco Picone Carolina Siquiera, Galhardo Borguini Renata, Henrique Fasolin Luiz, Juliato Rafael Augusto, Paim de Andrade Cristiane Conte, Pessanha de Araújo Santiago Manuela Cristina, Troya Raineri Fiocco Ana Clara. 2025. Uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) fruit: Exploring its antioxidant potential through pressurized liquid extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*. Volume 218. 106498. ISSN 0896-8446. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2024.106498>

Del Ángel, J., Hernández, C., & López, D. 2018. Infrared spectroscopy analysis of functional groups in plant oils using KBr matrix. *Journal of Analytical Chemistry*, 73(5), 456–463. <https://doi.org/10.1134/S1061934818050045>

Deng, X., Li, Y., & Zhang, H. 2023. Supercritical CO₂ extraction of bioactive compounds: Optimization and modeling. *Journal of Supercritical Fluids*, 190, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2023.105678>

De aguiar, A. C. & Martínez, J. 2015. Analytical Supercritical Fluid Extraction. In J. L. Anderson, A. Berthod, V. Pino Estévez, & A. S. Stalcup (Eds.), Analytical Separation Science (1st ed., pp. 1659–1680). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527678129.assep060>

De la Vara, R., & Gutiérrez, H. 2012. Análisis y diseño de experimentos. McGraw-Hill Interamericana.

Direktor L.B., Maikov I.L. & Zaichenko V.M. 2010. An improved method of sessile drop for determining the surface tension of liquids. *High Temp* 48, 176–180. <https://doi.org/10.1134/S0018151X10020069>

Díaz Camilo, Rojas Rosario & Ruiz Candy. 2015. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEITES ESENCIALES DE 10 PLANTAS AROMÁTICAS PERUANAS. *Rev. Soc. Quím. Perú* vol.81 no.2. [DOI:10.37761/rsqp.v81i2.10](https://doi.org/10.37761/rsqp.v81i2.10)

Díaz, A., Martínez, C., & Gómez, R. 2017. Determination of free fatty acids and acidity index in edible oils. *Food Research International*, 99, 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.015>

Dorado Daniela J., Hurtado-Benavides Andrés M. & Martínez-Correa Hugo A. 2016. Extracción con CO₂ Supercrítico de Aceite de Semillas de Guanábana (*Annona muricata*): Cinética, Perfil de Ácidos Grasos y Esteroles. *Información Tecnológica* Vol. 27(5), 37-48. [DOI:10.4067/S0718-07642016000500005](https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000500005)

Dorn, P. B., Chou, C. S., & Gentempo, J. J. 2002. Toxicity of contaminated soils evaluated with earthworm bioassays. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(5), 1025–1030. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210510>

Durval, I. J. B., Sarubbo, L. A., Silva, M. da G. C., Bezerra, K. G. O., Ribeiro, B. G., Silva, I. A., Twigg, M. S., & Banat, I. M. 2018. Biosurfactants: Production, properties, applications, trends, and general perspectives. *Biochemical Engineering Journal*, 181, 108377. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108377>

Ebnesajjad Sina. 2011. 3 - Surface Tension and Its Measurement. In *Plastics Design Library. Handbook of Adhesives and Surface Preparation*. Pages 21-30. ISBN 9781437744613. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-4461-3.10003-3>

Esmaeili Hadi & Hashemipour Hassan. 2018. A simple correlation for determining ionic liquids surface tension. *Journal of Molecular Liquids*. Volume 272. Pages 692-696. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.011>

Eraso-Grisales Soany, Hurtado-Benavides Andrés & Mejía-España Diego. 2019. Extracción de glicoalcaloides de papa nativa (*Solanum phureja*) variedad ratona morada con líquidos presurizados. *Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm.*, Vol. 48(1), 181-197. <http://dx.doi.org/10.15446/rcciquifa.v48n1.80074>

EK Anagha, R. Sariga, K. ShyamSundar, Rames C. Panda, M. Helen Kalavathy, S.N. Naik. 2025. Supercritical CO₂ assisted extraction, purification and modelling of free fatty acids from the crude mixture – A case study of tallow hydrolysis. *The Journal of Supercritical Fluids*. Volume 219. 106542. ISSN 0896-8446. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2025.106542>

Ebnesajjad PhD Sina. 2014. Chapter 2 - Surface Tension and Its Measurement. *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding (Second Edition)*. Pages 7-24. ISBN 9780323264358. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26435-8.00002-2>

Esmailnezhad Ehsan, Ghader Zahiri Mohammad & Sheng James J. 2025. Optimal design of a water-based mud of nanoparticles-natural surfactant and its potential green application to oil well drilling. *Journal of Cleaner Production*. Volume 490. 144784. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144784>

Espinoza Silva Clara, Gamarra Quezada Flor, Ramos Filio Marianela, Flores Ramos Omar & Quispe Solano Miguel. 2017. Efecto de presión y temperatura en la extracción de isotiocianato de bencilo por fluidos supercríticos a partir de hojas de *Tropaeolum majus* L. *Rev. investig. Altoandín*. vol.19 no.4. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2017.313>

Fal Jacek, Traciak Julian & Żyła Gawel. 2021. 3D printed measuring device for the determination the surface tension of nanofluids. *Applied Surface Science*. Volume 561. 149878. ISSN 0169-4332. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149878>

-
- Favén, L., Khalati, E., & Oinas, P. 2023. Techno-economic and safety assessment of supercritical CO₂ extraction of essential oils and extracts. *Journal of CO₂ Utilization*, 74, 102547. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102547>
- Fernandez-Toledo, A.A.J., Gutiérrez-Miceli, F.A., Meza-Gordillo, R., Montes-Molina, J.A., Ruíz-Valdiviezo, V.M., Vázquez-Villegas, P.T. & Villalobos-Maldonado, J.J. 2018. Determinación de CL50 y CE50 de endosulfán lactone y diazinón en lombriz de tierra (*Eisenia foetida*). *AGROproductividad*. Vol. 11. Núm. 4.
- Freeman, G. R., Smith, D., & Patel, R. 2021. Micellization properties of fatty acids in aqueous solution: Oleic and linoleic acid critical micelle concentrations. *Journal of Physical Chemistry B*, 125(12), 3124–3132. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c11234>
- Fernandes, P., Cruz, A., & Domingues, R. 2013. Sophorolipids: Production, characterization and applications as biosurfactants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(3), 1009–1020. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4640-6>
- Fragoso, C. 2002. Bioensayos con lombrices como indicadores de toxicidad en suelos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 18(2), 45–52.
- Furkhan, M., Khan, A., & Shaikh, S. 2016. Smart irrigation system using Arduino IDE. *Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 5(2), 77–83.
- Gayathri K. Veena, Kumar P. Senthil, Muralidharan Manasa, Rangasamy Gayathri & Sridharan Rajalakshmi. 2025. Extraction of biosurfactants from LDPE and PAH degrading bacterial strains isolated from plastics and oil contaminated sites: Statistical optimization using response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials Advances*. Volume 17. 100603. ISSN 2772-4166. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100603>
- Gadhve Ashish. 2014. Determination of Hydrophilic-Lipophilic Balance Value. *International Journal of Science and Research*. 3. 573-575. ISSN: 2319- 7064. <https://www.ijsr.net/archive/v3i4/MDlwMTMxNTMw.pdf>
- Genot C., Kabri T.-H. & Meynier A. 2013. 5 - Stabilization of omega-3 oils and enriched foods using emulsifiers. In *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and*

Nutrition. Food Enrichment with Omega-3 Fatty Acids. Woodhead Publishing. Pages 150-193. ISBN 9780857094285. <https://doi.org/10.1533/9780857098863.2.150>

Guo Ruihua, Ma Zonghui, Xin Benrong, Xu Xuebing, Zheng Yan & Zheng Minying. 2015. 8 - Sugar Fatty Acid Esters. Polar Lipids. Elsevier. Pages 215-243. ISBN 9781630670443. <https://doi.org/10.1016/B978-1-63067-044-3.50012-1>

Guo Xiaowen, Rong Zongming & Ying Xugen. 2006. Calculation of hydrophile–lipophile balance for polyethoxylated surfactants by group contribution method. Department of Chemistry. Journal of Colloid and Interface Science. [Volume 298, Issue 1](#), 1. Pages 441-450. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.12.009>

Griffin, W. C. 1949. Calculation of HLB values of non-ionic surfactants. Journal of the Society of Cosmetic Chemists, 1(5), 311–326.

Godínez Mora Tovar Luis Arturo, Guerra Sánchez Ricardo Jaime, Ramírez Coutiño Víctor Angel, Rodríguez Valadez Francisco Javier & Torres Bustillos Luis Gilberto. 2013. pH effect on surfactant properties and supramolecular structure of humic substances obtained from sewage sludge composting. Rev. Int. Contam. Ambient vol.29 no.3. ISSN 0188-4999. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/4122510>

Reyes Cruz Gonzalo. 2020. “EXTRACCIÓN SUPERCRÍTICA Y CARACTERIZACIÓN DEL EXTRACTO DE LA HOJA DE MAGUEY MORADO (Tradescantia spathacea Sw.)”. Ingeniería y arquitectura.

Góngora, R., Hernández, C., & López, D. 2023. Advances in titrimetric determination of fatty acids in plant oils. Analytical Methods, 15(5), 456–465. <https://doi.org/10.1039/D3AY00045H>

Góngora-Chi, R., Hernández, C., & López, D. 2023. Avances en la caracterización de saponinas y azúcares mediante pruebas colorimétricas. Journal of Natural Products, 86(4), 567–575. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.3c00045>

Gracida Rodríguez Jorge Noel, Jiménez Islas Donaji & Medina Moreno Sergio A. 2010. Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos. Rev. Int. Contam. Ambient. 26 (1) 65-84. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v26n1/v26n1a6>

Giakoumis, E. G. 2018. Analysis of 22 vegetable oils' physico-chemical properties and fatty acid composition on a statistical basis, and correlation with the degree of unsaturation. *Renewable Energy*, 126, 403–419. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.057>

Haodong Jia, Hongbo Zhang, Rui Gao, Kexiong Chen, Lu Han, Xin Hu & Zhangjian Zhou. 2025. Mechanisms of the effect of surfactant types on the pore structure feature and properties of geopolymer foams. *Construction and Building Materials*. Volume 458. 139696. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139696>

Harkins, W. D., & Jordan, H. F. 1930. A method for the determination of surface and interfacial tension from the maximum pull on a ring. *Journal of the American Chemical Society*, 52(5), 1751–1772. <https://doi.org/10.1021/ja01368a004>

Hassanizadeh Seyed Majid. 2014. The Origin of Surface Tension. *InterPore Journal*. 1(1). ipj260424–3. <https://ipjournal.interpore.org/index.php/interpore/article/view/21>

Hemmati-Sarapardeh Abdolhossein, Rafiee Milad, Ranjbar Mohammad, Sepahvand Mohammad & Schaffie Mahin. 2025. Application potential of two novel natural anionic surfactants extracted from artichoke and *Prosopis farcta* for enhanced oil recovery. *Journal of Molecular Liquids*. Volume 423. 126980. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.126980>

Hernández Quiroz Manuel, Hernández Soto Jesús, Ponce de León Hill Claudia, Rojo Callejas Francisco, Robles Mendoza Cecilia & Vanegas Pérez Cecilia. 2013. EXTRACCIÓN ASISTIDA POR MICROONDAS Y LIMPIEZA EN FASE SÓLIDA COMO MÉTODO DE ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE PLAGUICIDAS ORGANOFOSFORADOS EN *Ambystoma mexicanum*. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 29(2), 189–200. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/32054>

Hosney Nareman K., Hussein Mariam I. & Salim Mohamed A. 2025. Implication of morphological and molecular studies on taxonomic treatment of *Acer L. spp.* and some selected taxa of Sapindaceae Juss. s.l. *Flora*. Volume 323. 152675. ISSN 0367-2530. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2025.152675>

Hounda Fokou, B. J., Boyom, F. F., & Dongmo Jazet, P. M. 2020. Chemical composition and pharmacological properties of essential oil. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86573>

Holmberg Krister, Kronberg Bengt & Lindman Björn. 2014. Surface Chemistry of Surfactants and Polymers (Kronberg/Surface Chemistry of Surfactants and Polymers) || Types of Surfactants, their Synthesis, and Applications. 1–47. [doi:10.1002/9781118695968.ch1](https://doi.org/10.1002/9781118695968.ch1)

Hong, Y., Chen, J., & Wu, L. 2018. Hydrophilic-lipophilic balance and emulsification properties of Tween surfactants in oil-in-water systems. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 536, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.09.045>

Huan Lian, Jingying Shi, Qingguo Wang & Yong Peng. 2019. Effect of emulsifier hydrophilic-lipophilic balance (HLB) on the release of thyme essential oil from chitosan films. Food Hydrocolloids. Volume 97. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105213>

Israelachvili Jacob N. 1995. Intermolecular and surface forces, 2nd Edition, Academic Press.

Jimtaisong Ampa & Saengsorn Kiattiphum. 2017. Determination of hydrophilic–lipophilic balance value and emulsion properties of sachal oil. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine. Volume 7. Issue 12. Pages 1092-1096 <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.10.011>

Jia Qingzhu, Shi Yajuan, Wang Qiang & Yan Fangyou. 2019. Norm descriptors for predicting the hydrophile-lipophile balance (HLB) and critical micelle concentration (CMC) of anionic surfactants. Volume 583. 123967. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123967>

Jiménez, J. 2015. Diseños experimentales aplicados a la ingeniería. Editorial Académica Española.

Jiajia, L., Wang, H., & Zhou, Y. 2025. Cell wall disruption and improved extraction kinetics in medicinal plants using novel techniques. Phytochemistry Letters, 52, 112–120.

Kaczorek Ewa, Makiej Aleksandra, Marcinkowska Agnieszka & Smulek Wojciech. 2024. Quillaja and Sapindus saponins influence on effect on solubilization of Polymyxin B peptide antibiotic in aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, Volume 395.123944. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123944>

Kaal Joeri, Martínez Cortizas Antonio & Traoré Mohamed. 2023. Variation of wood color and chemical composition in the stem cross-section of oak (*Quercus* spp.) trees, with special attention to the sapwood-heartwood transition zone. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. Volume 285.121893. ISSN 1386-1425. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121893>

Krause Rui W.M., Lokole Pathy B., Motomba Dave I., Mpuza Michel K., Mutwale Paulin K., Ngombe Nadège K., Nkanga Christian I. & Safari Justin B., 2024. Preparation and characterization of micellar nanoparticles using crude saponins from five Congolese plant species. *Pharmaceutical Science Advances*. Volume 2. 100055. ISSN 2773-2169. <https://doi.org/10.1016/j.pscia.2024.100055>

Kang Joohoon, Kim Dong-Hwan & Shaban Samy M. 2020. Surfactants: Recent advances and their applications. *Composites Communications*. Volume 22.100537. ISSN 2452-2139. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100537>

Kaikonjanat Apisada & Muangrat Rattana. 2025. Comparative evaluation of hemp seed oil yield and physicochemical properties using supercritical CO₂, accelerated hexane, and screw press extraction techniques. *Journal of Agriculture and Food Research*. Volume 19. 101618. ISSN 2666-1543. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101618>

Khan Asad Muhammad & Mujeeb Shanza. 2025. Spectroscopic and tensiometric studies of the interactions of BPA with single and mixed surfactant systems. *Journal of Molecular Liquids*. 127299. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127299>

Khan Sipper, Sahar Amna, Sameen Aysha, Tariq Tayyaba & Tariq Farwa. 2023. Chapter 1 - Essential oils in plants: Plant physiology, the chemical composition of the oil, and natural variation of the oils (chemotaxonomy and environmental effects, etc.). Academic Press. Pages 1-36. ISBN 9780323917407. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91740-7.00016-5>

-
- Khordad Reza. 2025. Investigation of contribution of the intermolecular potential attraction term in surface tension of refrigerant fluids. *Fluid Phase Equilibria*. Volume 595. 114408. ISSN 0378-3812. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2025.114408>
- Kittl, C., Müller, R., & Schmid, H. 2023. Thermodynamic insights into CO₂ extraction near critical conditions. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 170, 106234. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2023.106234>
- Kuehl, R. O. 2001. *Design of experiments: Statistical principles of research design and analysis* (2nd ed.). Duxbury Press.
- Lai Jiajia, Li Xiangzhou, Lu Ying, Wang Yuqing, Yuan Han, Yang Yanhong & Zhou Peng. 2025. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of flavonol glycosides from *Ginkgo biloba*: Optimization of efficiency and mechanism. *Ultrasonics Sonochemistry*. Volume 114. 107254. ISSN 1350-4177. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107254>
- Lafont, R., Dinan, L., & Wilson, I. 2011. Acidity index and lipid characterization in natural oils. *Lipids*, 46(9), 875–883. <https://doi.org/10.1007/s11745-011-3589-2>
- Leneweit Gero, Nirschl Hermann, Poggemann Lukas & Ullmann Kirsten. 2020. Adsorption process for phospholipids of different chain lengths at a fluorocarbon/water interface studied by Du Noüy ring and spinning drop. *Colloid Polym Sci* 298, 407–417. <https://doi.org/10.1007/s00396-020-04618-3>
- Limtrakarn Wiroj & Obchoei Thanachai. 2024. Axisymmetric flow model of cannabis oil extraction of supercritical fluid extraction CO₂ process. *International Journal of Thermofluids*. Volume 22. 100682. ISSN 2666-2027. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100682>
- Lunkenheimer K & Wantke K.D. 1978. On the applicability of the du Nouy (ring) tensiometer method for the determination of surface tensions of surfactant solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*. Volume 66, Issue 3. Pages 579-581. ISSN 0021-9797. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(78\)90079-6](https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90079-6)
- Magaril Elena & Magaril Romen. 2017. Impact of surfactants in micro concentrations on certain properties of organic liquids as a basis for improving some oil-and-gas industry

processes and properties of gasoline. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Volume 529. Pages 733-738. ISSN 0927-7757. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.06.062>

Marangoni D. Gerrard, Schramm Laurier L. & Stasiuk Elaine N. 2003. Surfactants and their Applications. *Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C: Phys. Chem.* 99. 3-48. DOI: [10.1039/b208499f](https://doi.org/10.1039/b208499f)

Mahecha, G. & Echeverri, C. 1983. Crecimiento del jaboncillo (*Sapindus saponaria* L.) en condiciones de bosque húmedo tropical. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.

Mendoza Cantú Ania & Ramírez Romero Patricia. 2008. Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo La experiencia en México. México: SEMARNA. ISBN: 978-968-817-882-9.

Mena, R. 2014. Bioensayos con lombrices para la caracterización de suelos contaminados. *Revista Latinoamericana de Ecotoxicología*, 9(1), 33–41.

Meniai, A. H., Benamor, A., & Belkacem, M. 2022. Green extraction of plant materials using supercritical CO₂: Insights into methods, analysis, and bioactivity. *Plants*, 13(16), 2295. <https://doi.org/10.3390/plants13162295>

Miyazaki Silvia S. & Sarti Gabriela C. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS BIOSURFACTANTES SINTETIZADOS POR BACILLUS SUBTILIS. Área de Agroalimentos. Departamento de Biología, Aplicada y Alimentos.

Miranda, M., Pérez, J., & Torres, L. 2016. Determination of fatty acids by titration with NaOH: A comparative study of methods. *Journal of Food Chemistry*, 210, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.012>

Moteetee A., Mzimba N.F. & Van Vuuren S. 2023. Southern African plants used as soap substitutes; phytochemical, antimicrobial, toxicity and formulation potential. *South African Journal of Botany*. Volume 163. Pages 673-683. ISSN 0254-6299. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.11.002>

Musiał Witold & Zapolski Remigiusz. 2024. La metodología de superficie de respuesta para la evaluación de los valores de HLB de mezclas de tensioactivos no iónicos utilizando parámetros de sus isothermas π -A. *Moléculas*. 29(10):2351. [DOI: 10.3390/mol29102351](https://doi.org/10.3390/mol29102351)

Muangrat, R., Chalermchat, Y., Siriwoharn, T., Jirarattanarangsri, W., Tangjaidee, P., Pongsirikul, I., & Pannasai, S. (2024). Ultrasound and low-pressure supercritical CO₂ extraction: A synergistic approach to hemp seed oil extraction. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 43, 100595. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2024.100595>

Moges, A., & Goud, V. V. 2023. Optimization of oil extraction from Hippophae salicifolia berries using supercritical CO₂: Assessment of physicochemical, antioxidant, antibacterial, and thermal properties. *Food and Humanity*, 1, 826–837. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.08.001>

Melo, R., Silva, A., & Torres, P. 2020. Application of central composite design to optimize spawns propagation. *Open Journal of Optimization*, 9(3), 47–70. <https://doi.org/10.4236/ojop.2020.93005>

Mohammed, S., & Ikiensikimama, S. S. 2023. Vegetable oils as surfactant feedstocks for enhanced oil recovery: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 200, 693–705. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.03.021>.

Núñez, G. A., Valle Lladser, J. M. del, & Navia, D. 2020. Supercritical CO₂ oilseed extraction in multi-vessel plants: Effect of extraction pressure and plant size on production cost. *Journal of Supercritical Fluids*, 120, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.11.002>

Ortega-Quintana Fabián A, Pérez-Sierra Ómar A, Urango-Anaya Katty J & Vélez-Hernández Gabriel. 2018. Extracción Rápida de Pectina a Partir de Cáscara de Maracuyá (*Passiflora edulis flavicarpa*) empleando Microondas. *Información Tecnológica* Vol. 29(1), 129-136. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100129>

Padilla-González GF, Phumthum M & Sadgrove NJ. 2022. Química fundamental de aceites esenciales y compuestos orgánicos volátiles, métodos de análisis y autenticación. *Plantas* (Basilea). 11(6):789. [DOI: 10.3390/plantas11060789](https://doi.org/10.3390/plantas11060789)

Parada Fabián, Rodríguez Ignacio, Rojas Néstor & Ordonez, Andrés F. 2006. Estudio comparativo de la extracción de cafeína con CO₂ supercrítico y acetato de etilo. *rev.ing.* n.24. pp.34-42. [10.16924/revinge.24.5](https://doi.org/10.16924/revinge.24.5)

Pennington, T. D. & Sarukhán, J. 2005. Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies. 3a. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica. México. 523 Pp.

Pinto Barrios Juan Camilo & Valbuena Villareal Rubén Darío. 2020. Concentración letal media CL (50-96) de las especies de peces *Prochilodus magdalenae* y *Pimelodus grosskopfii* al principio activo de fungicidas Cyproconazole utilizado en el cultivo de café en el departamento del Huila. *ingeniería y región*. Vol. 24. ISSN: 1657-6985. <https://doi.org/10.25054/22161325.2243>

Popenda Agnieszka & Włodarczyk-Makula Maria. 2016. The application of biosurfactants into removal of selected micropollutants from soils and sediments.

Rattana Muangrat, Yongyut Chalermchat, Thanyaporn Siriwoharn, Wachira Jirarattanarangsri, Pipat Tangjaidee, Israpong Pongsirikul, Supachet Pannasai. 2024. Ultrasound and low-pressure supercritical CO₂ extraction: A synergistic approach to hemp seed oil extraction. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. Volume 43. 100595. ISSN 2214-7861. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2024.100595>

Rangwala Juzer Ali & Sarasan Geetha. 2024. Synthesis of metallic surfactants from Jatropa oil and study of it's molecular structure and antimicrobial activity on plant pathogen *Xanthomonas campestris*. *Journal of the Indian Chemical Society*. Volume 101, Issue 12. 101472. ISSN 0019-4522. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101472>

Raiger lustman, L. J., & López, N. I. 2009. Los biosurfactantes y la industria petrolera. *Química Viva*, 8(3), 146–161.

Ralla, T., Salminen, H., Edelmann, M., Dawid, C., Hofmann, T., & Weiss, J. 2018. Oat bran extract (*Avena sativa* L.) from food by-product streams as new natural emulsifier. *Food Hydrocolloids*, 81, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.07.032>

Rojas, J., Pérez, M., & Gómez, L. 2006. Propiedades físicas de los fluidos supercríticos y aplicaciones en procesos de separación. *Revista Colombiana de Química*, 35(2), 145–158.

Rowlinson J.S. & Widom B. 1982. Molecular theory of capillarity. <https://doi.org/10.1002/bbpc.19840880621>

Sarubbo, L. A., Silva, M. da G. C., Durval, I. J. B., Bezerra, K. G. O., Ribeiro, B. G., Silva, I. A., Twigg, M. S., & Banat, I. M. 2022. Biosurfactants: Production, properties, applications, trends, and general perspectives. *Biochemical Engineering Journal*, 181, 108377. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108377>

Brask, J., Habibi, Z., Mohammadi, M., Shahedi, M., & Yousefi, M. 2021. Improvement of biodiesel production from palm oil by co-immobilization of *Thermomyces lanuginosa* lipase and *Candida antarctica* lipase B: Optimization using response surface methodology. *International journal of biological macromolecules*, 170, 490–502. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.181>

Subba Rao V.V. & Zettlemoyer A.C. 1969. Capabilities of the du Noüy Tensiometer. *Journal of Colloid and Interface Science*. Volume 29, Issue 1. Page 172. ISSN 0021-9797. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(69\)90365-8](https://doi.org/10.1016/0021-9797(69)90365-8)

Su, Y., Zhang, X., Li, J., & Wang, H. (2023). Supercritical fluid extraction as a potential green technology for bioactive compounds: Mechanisms, advantages, and applications. *Engineering Proceedings*, 37(1), 115. <https://doi.org/10.3390/ECP2023-14674>

Silverstein, R. M., Bassler, G. C., & Morrill, T. C. 1991. Spectrometric identification of organic compounds (5th ed.). John Wiley & Sons.

Souza Andrada Anconi, C., de Jesus Fonseca, J. L., & Nunes, A. C. (2024). A digital image-based colorimetric method for measuring free acidity in edible vegetable oils. *Food Chemistry*, 443, 138555. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138555>

Temelli, F. 2009. Perspectives on supercritical fluid processing of fats and oils. *The Journal of Supercritical Fluids*, 47, 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.10.014>

Usiña, R. 2017. Ensayos fitoquímicos para la identificación de carbohidratos y metabolitos secundarios en plantas medicinales. *Revista de Investigación Científica*, 12(2), 87–95.

Walter A. Jacobs. 1925. Saponins: III. The sapogenin occurring in sapindus saponaria l. and sapindus mukorossi utilis (trabuti). Journal of Biological Chemistry. Volume 64, Issue 2.1925. Pages 379-381. ISSN 0021-9258. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)84931-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)84931-6)

Wang Lufei, Su Xianbo, Zhao Weizhong, Xia Daping, Wang Qian. 2023. Enhancement of biomethane production from coal by supercritical CO2 extraction. Journal of CO2 Utilization. Volume 74. 102545. ISSN 2212-9820. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102545>

Wilson, M. J., Jones, D. L., & Edwards, C. A. 2002. Earthworm bioassays for contaminated soil assessment. Applied Soil Ecology, 19(1), 57–66. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(01\)00185-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(01)00185-6)

Zaragoza Martínez, A. 2012. Propiedades bioquímicas de tensioactivos biológicos de origen bacteriano. 1–207.

ANEXOS

A.1 Registro de identificación de la especie *sapindus saponaria* L.

Villahermosa, Tabasco a 25 de octubre de 2023

C. NANCY CRISTEL CORTAZA TORRES
UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
PRESENTE

Por medio del presente, le hago llegar la determinación del siguiente espécimen botánico:

Datos del espécimen: Nancy Cristel Cortaza Torres, 001. Localidad: Poblado Huimango 1ra, Cunduacán, Tabasco.

Nombre científico: *Sapindus saponaria* L. (Familia Sapindaceae).

Folio Herbario UJAT: 37198.

Este ejemplar se encuentra en resguardo y disponible para consulta en la Colección de Plantas Vasculares del Herbario UJAT.

Sin otro particular, me despido, agradeciendo de antemano la gentileza de su atención.

Atentamente


Dra. Nelly del Carmen Jiménez Pérez
Curador Colección de Plantas Vasculares Herbario UJAT
División Académica de Ciencias Biológicas
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

C.c.p. Interesado

B.1 Constancia de crianza de lombriz *eisenia foetida*.



ASUNTO: CONSTANCIA DE CRIANZA DE LOMBRICES EN EL PSV

A QUIEN CORRESPONDA.

Por medio de la presente se hace constar que en las comunidades de aprendizaje campesino CAC'S, se realiza la crianza de lombrices (*Eisenia Foetida*) roja californiana para la obtención de productos como lixiviado y humus de lombriz, que son productos orgánicos utilizados en la unidades de producción de los sembradores y sembradoras.

La anatomía de esta lombriz se parece a la de otras lombrices de tierra comunes; un cuerpo de segmentos largos, comienza en la cabeza puntiaguda y termina en una cola ligeramente aplanada. Una banda carnososa llamada clitelo ocupa en el cuerpo a aproximadamente 1/3 de la longitud de la lombriz. El tracto digestivo es simple, comienza en la boca donde la lombriz empieza a consumir su alimento antes de pasarlo a la faringe. La faringe es una sección muscular que actúa como una bomba para llevar la comida a la boca antes de bombearla hacia el esófago.

Las cápsulas de huevo de lombriz de tierra pueden sobrevivir a la congelación y las condiciones secas durante períodos prolongados. Las cápsulas de huevo esperarán condiciones más favorables para eclosionar. Las lombrices adultas en condiciones favorables pondrán entre 2 y 4 cápsulas de huevos por mes. Asimismo, cada cápsula puede eclosionar de 3 a 7 lombrices (*Eisenia foetida*). Los huevos de lombriz son de color amarillo dorado brillante cuando se ponen por primera vez y se vuelven progresivamente de color rojo pardusco antes de eclosionar. Éstos, se rompen en unos 21 días en condiciones ideales. Lo hacen más rápido a temperaturas más cálidas de lo que prefieren las lombrices adultas.

Generalmente la alimentación de las lombrices se realiza con excremento de ganado bovino, algunas frutas y verduras, de igual manera se tienen que verificar la humedad y temperatura para su buen desarrollo y reproducción.

Atentamente:

Ing. Edith María Frías Estrada
Técnico productivo del PSV

C.1 Constancia de estancia académica.



FACULTAD DE QUÍMICA
DEPTO. DE FÍSICOQUÍMICA
LABORATORIO DE SUPERFICIES
ASUNTO: ESTANCIA ACADÉMICA

Dra. Dora María Frias Márquez
Directora de la División Académica
de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Presente

Mediante este conducto doy constancia y reconocimiento, de la Estancia de Investigación efectuada en el Laboratorio de Superficies a mi cargo, los días 19 al 23 de febrero del actual, por parte de la I.Q. **Nancy Cristel Cortaza Torres**, alumna de la Maestría en Ciencias en Ingeniería. En esta actividad se prepararon disoluciones de los aceites esenciales de su selección, con las cuales se determinó tensión superficial con el método del anillo, así como el tratamiento y corrección de datos para calcular la concentración micelar crítica; estudio que formará parte de su proyecto de maestría.

Atentamente

Ciudad Universitaria, CDMX, 28 febrero del 2024.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Dr. Jesús Gracia Fadrique
Responsable del Laboratorio de Superficies
jgraciaf@unam.mx

CCP.- Dr. **Carlos Amador Bedolla**, Director de la Facultad de Química, UNAM.
CCP.- I.Q. **Nancy Cristel Cortaza Torres**

D.1 Tabla de factores de corrección (F) para el método del anillo (Harkins & Jordan, 1930).

1766

TABLE VIIIID

CORRECTION FACTORS (*F*) FOR THE RING METHOD

<i>R³/V</i>	<i>R/r</i> = 30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60
0.80	.8937	.900	.906	.912	.918	.9230	.928	.933	.937	.942	.9454	.949	.952	.954	.956	.9581
.82	.8917	.898	.904	.909	.915	.9211	.926	.931	.935	.940	.9436	.947	.950	.952	.954	.9563
.84	.8894	.895	.902	.907	.913	.9190	.924	.929	.933	.938	.9419	.946	.949	.951	.953	.9548
.86	.8874	.893	.900	.905	.911	.9171	.922	.927	.932	.936	.9402	.944	.947	.949	.951	.9534
.88	.8853	.891	.898	.903	.909	.9152	.921	.926	.930	.934	.9384	.942	.945	.947	.950	.9517
.90	.8831	.889	.896	.902	.907	.9131	.919	.924	.928	.933	.9367	.940	.943	.946	.948	.9504
.92	.8809	.887	.894	.900	.905	.9114	.917	.922	.926	.931	.9350	.939	.942	.945	.947	.9489
.94	.8791	.885	.892	.898	.904	.9097	.915	.920	.925	.929	.9333	.937	.940	.943	.945	.9476
.96	.8770	.883	.890	.896	.902	.9074	.914	.919	.923	.928	.9320	.936	.939	.942	.944	.9462
.98	.8754	.882	.888	.894	.900	.9064	.912	.917	.922	.926	.9305	.934	.937	.940	.943	.9452
1.00	.8734	.880	.886	.892	.899	.9047	.910	.916	.920	.925	.9290	.933	.936	.939	.941	.9438
1.05	.8688	.875	.882	.888	.895	.9007	.906	.912	.916	.921	.9253	.929	.932	.936	.938	.9408
1.10	.8644	.871	.878	.885	.891	.8970	.903	.908	.913	.917	.9217	.925	.929	.933	.935	.9378
1.15	.8602	.867	.875	.881	.888	.8937	.900	.905	.910	.914	.9183	.922	.926	.930	.933	.9352
1.20	.8561	.864	.871	.878	.885	.8904	.897	.902	.907	.911	.9154	.920	.923	.927	.930	.9324
1.25	.8521	.860	.868	.875	.882	.8874	.893	.899	.904	.908	.9125	.916	.920	.924	.927	.9300
1.30	.8484	.856	.864	.871	.879	.8845	.891	.896	.901	.905	.9097	.914	.917	.921	.925	.9277
1.35	.8451	.853	.861	.869	.876	.8819	.888	.893	.898	.903	.9068	.911	.915	.919	.922	.9253
1.40	.8420	.850	.858	.866	.873	.8794	.885	.891	.896	.900	.9043	.909	.913	.916	.920	.9232
1.45	.8387	.847	.855	.863	.871	.8764	.883	.888	.893	.898	.9014	.906	.910	.914	.918	.9207

WILLIAM D. HARKINS AND HUBERT F. JORDAN

Vol. 52

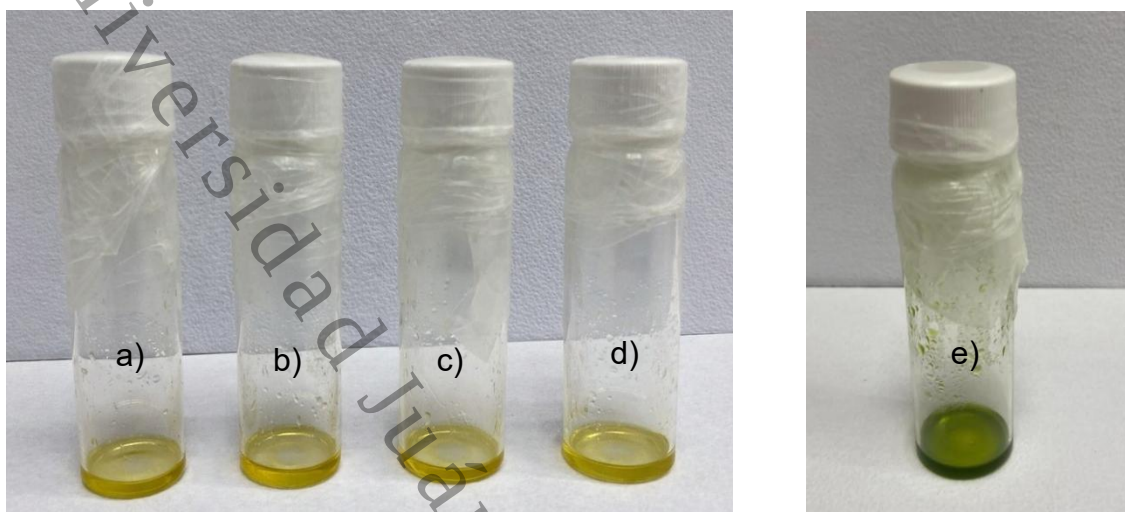
E.1. Tabla de Dimensiones nominales, variaciones permitidas para tela de alambre de tamices de prueba estándar (ASTM E11-95).

Sieve Designation		Nominal Sieve Opening, in. ^a	Permissible Variation of Average Opening from the Standard Sieve Designation	Opening Dimension Exceeded By Not More Than 5 % of the Openings	Maximum Individual Opening	Nominal Wire Diameter, mm ^c
Standard ^a	Alternative					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
125 mm	5 in.	5	±3.70 mm	130.0 mm	130.9 mm	8.00
106 mm	4.24 in.	4.24	±3.20 mm	110.2 mm	111.1 mm	6.30
100 mm ^d	4 in. ^d	4	±3.00 mm	104.0 mm	104.8 mm	6.30
90 mm	3½ in.	3.5	±2.70 mm	93.6 mm	94.4 mm	6.30
75 mm	3 in.	3	±2.20 mm	78.1 mm	78.7 mm	6.30
63 mm	2½ in.	2.5	±1.90 mm	65.6 mm	66.2 mm	5.60
53 mm	2.12 in.	2.12	±1.60 mm	55.2 mm	55.7 mm	5.00
50 mm ^d	2 in. ^d	2	±1.50 mm	52.1 mm	52.6 mm	5.00
45 mm	1¾ in.	1.75	±1.40 mm	46.9 mm	47.4 mm	4.50
37.5 mm	1½ in.	1.5	±1.10 mm	39.1 mm	39.5 mm	4.50
31.5 mm	1¼ in.	1.25	±1.00 mm	32.9 mm	33.2 mm	4.00
26.5 mm	1.06 in.	1.06	±.800 mm	27.7 mm	28.0 mm	3.55
25.0 mm ^d	1.00 in. ^d	1	±.800 mm	26.1 mm	26.4 mm	3.55
22.4 mm	¾ in.	0.875	±.700 mm	23.4 mm	23.7 mm	3.15
19.0 mm	¾ in.	0.750	±.600 mm	19.9 mm	20.1 mm	3.15
16.0 mm	5/8 in.	0.625	±.500 mm	16.7 mm	17.0 mm	3.15
13.2 mm	0.530 in.	0.530	±.410 mm	13.83 mm	14.05 mm	2.80
12.5 mm ^d	½ in. ^d	0.500	±.390 mm	13.10 mm	13.31 mm	2.50
11.2 mm	7/16 in.	0.438	±.350 mm	11.75 mm	11.94 mm	2.50
9.5 mm	¾ in.	0.375	±.300 mm	9.97 mm	10.16 mm	2.24
8.0 mm	5/16 in.	0.312	±.250 mm	8.41 mm	8.58 mm	2.00
6.7 mm	0.265 in.	0.265	±.210 mm	7.05 mm	7.20 mm	1.80
6.3 mm ^d	¼ in. ^d	0.250	±.200 mm	6.64 mm	6.78 mm	1.80
5.6 mm	No. 3½ ^e	0.223	±.180 mm	5.90 mm	6.04 mm	1.60
4.75 mm	No. 4	0.187	±.150 mm	5.02 mm	5.14 mm	1.60
4.00 mm	No. 5	0.157	±.130 mm	4.23 mm	4.35 mm	1.40
3.35 mm	No. 6	0.132	±.110 mm	3.55 mm	3.66 mm	1.25
2.80 mm	No. 7	0.110	±.095 mm	2.975 mm	3.070 mm	1.12
2.36 mm	No. 8	0.0937	±.080 mm	2.515 mm	2.600 mm	1.00
2.00 mm	No. 10	0.0787	±.070 mm	2.135 mm	2.215 mm	0.900
1.7 mm	No. 12	0.0661	±.060 mm	1.820 mm	1.890 mm	0.800
1.4 mm	No. 14	0.0555	±.050 mm	1.505 mm	1.565 mm	0.710
1.18 mm	No. 16	0.0469	±.045 mm	1.270 mm	1.330 mm	0.630
1.00 mm	No. 18	0.0394	±.040 mm	1.080 mm	1.135 mm	0.560
850 µm ^f	No. 20	0.0331	±.35 µm	925 µm	970 µm	0.500
710 µm	No. 25	0.0278	±.30 µm	775 µm	815 µm	0.450
600 µm	No. 30	0.0234	±.25 µm	660 µm	695 µm	0.400
500 µm	No. 35	0.0197	±.20 µm	550 µm	585 µm	0.315
425 µm	No. 40	0.0165	±.19 µm	471 µm	502 µm	0.280
355 µm	No. 45	0.0139	±.16 µm	396 µm	426 µm	0.224
300 µm	No. 50	0.0117	±.14 µm	337 µm	363 µm	0.200
250 µm	No. 60	0.0098	±.12 µm	283 µm	306 µm	0.160
212 µm	No. 70	0.0083	±.10 µm	242 µm	263 µm	0.140
180 µm	No. 80	0.0070	±.9 µm	207 µm	227 µm	0.125
150 µm	No. 100	0.0059	±.8 µm	174 µm	192 µm	0.100
125 µm	No. 120	0.0049	±.7 µm	147 µm	163 µm	0.090
106 µm	No. 140	0.0041	±.6 µm	126 µm	141 µm	0.071
90 µm	No. 170	0.0035	±.5 µm	108 µm	122 µm	0.063
75 µm	No. 200	0.0029	±.5 µm	91 µm	103 µm	0.050
63 µm	No. 230	0.0025	±.4 µm	77 µm	89 µm	0.045
53 µm	No. 270	0.0021	±.4 µm	66 µm	76 µm	0.036
45 µm	No. 325	0.0017	±.3 µm	57 µm	66 µm	0.032
38 µm	No. 400	0.0015	±.3 µm	48 µm	57 µm	0.030
32 µm	No. 450	0.0012	±.3 µm	42 µm	50 µm	0.028
25 µm ^d	No. 500	0.0010	±.3 µm	34 µm	41 µm	0.025
20 µm ^d	No. 635	0.0008	±.3 µm	29 µm	35 µm	0.020

F.1. Partes del árbol *sapindus saponaria* L.: a) raíz, b) flor, c) hoja, d) tallo y e) fruto

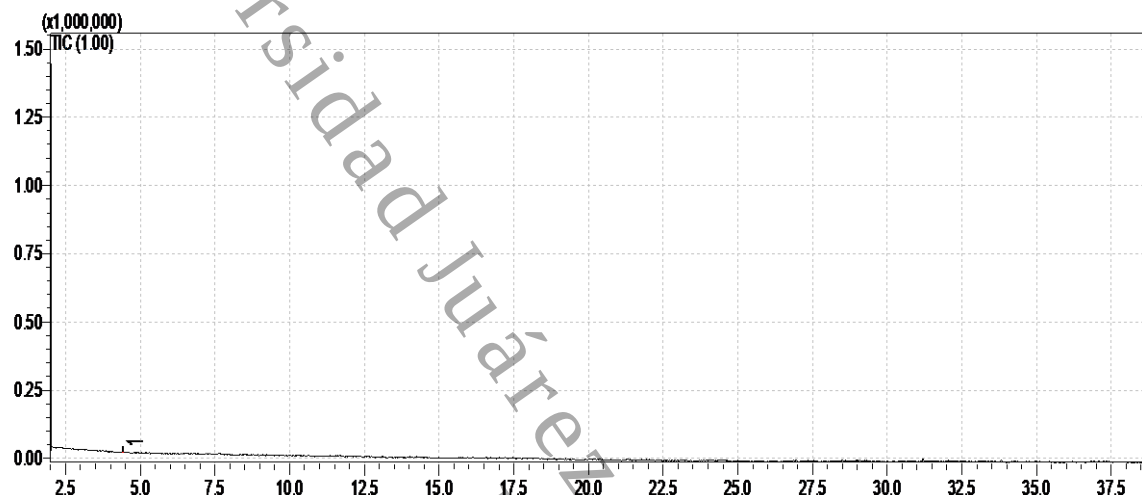


G.1 Aceite esencial de las partes del árbol de *sapindus saponaria* L.: a) raíz, b) flor, c) tallo, d) fruto y e) hoja



H.1. Identificación de compuestos del aceite esencial extraído de las diferentes partes del árbol *sapindus saponaria* L.

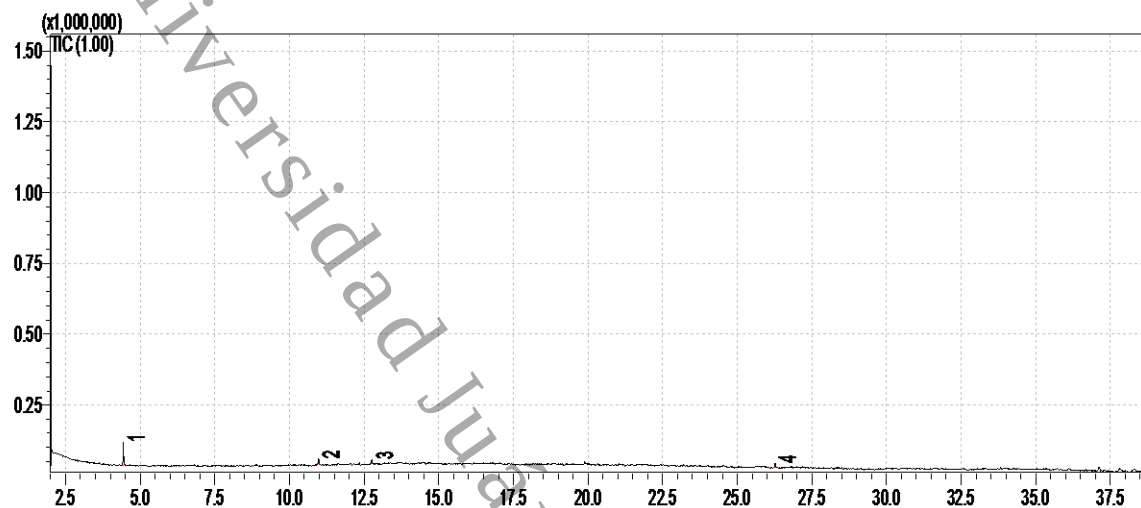
H1.1 Cromatograma del aceite extraído del tallo del árbol *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%.



H1.1 Componente obtenido del aceite extraído del tallo de *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%.

No.	Tiempo de retención	Área	Concentración (%)	Componente identificado
1	4.413	27167	100	Etanol, 2,2'-oxibis-

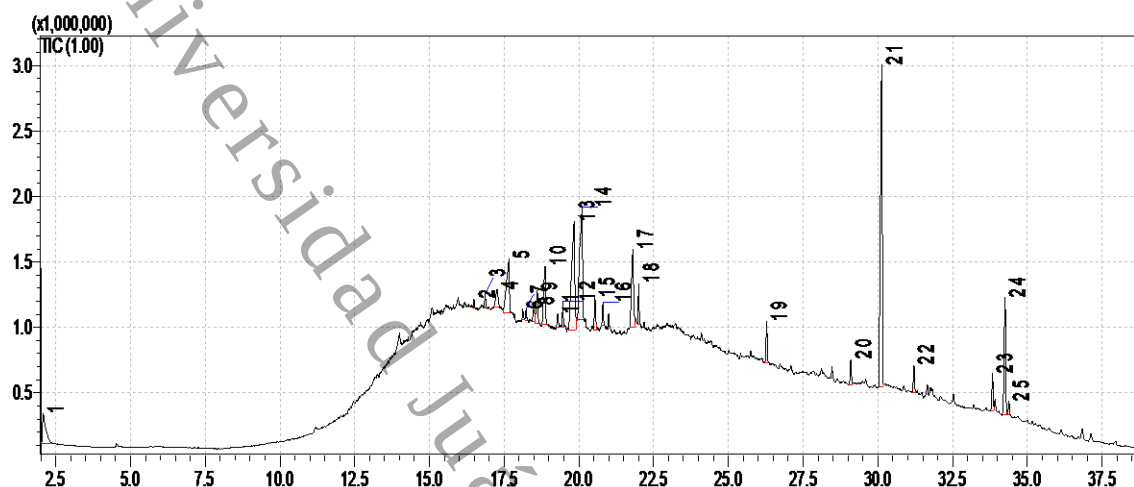
H1.2 Cromatograma del aceite extraído de la raíz del árbol *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%.



H1.2 Componentes obtenidos del aceite extraído de la raíz del árbol *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%.

No.	Tiempo de retención	Área	Concentración (%)	Componente identificado
1	4.435	139209	61	Etanol, 2,2'-oxibis-
2	10.98	26857	11.77	Tridecano
3	12.758	24453	10.72	Tetradecano
4	26.264	37691	16.52	Ftalato de diisooctilo

H1.3 Cromatograma del aceite extraído de la hoja del árbol *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%.

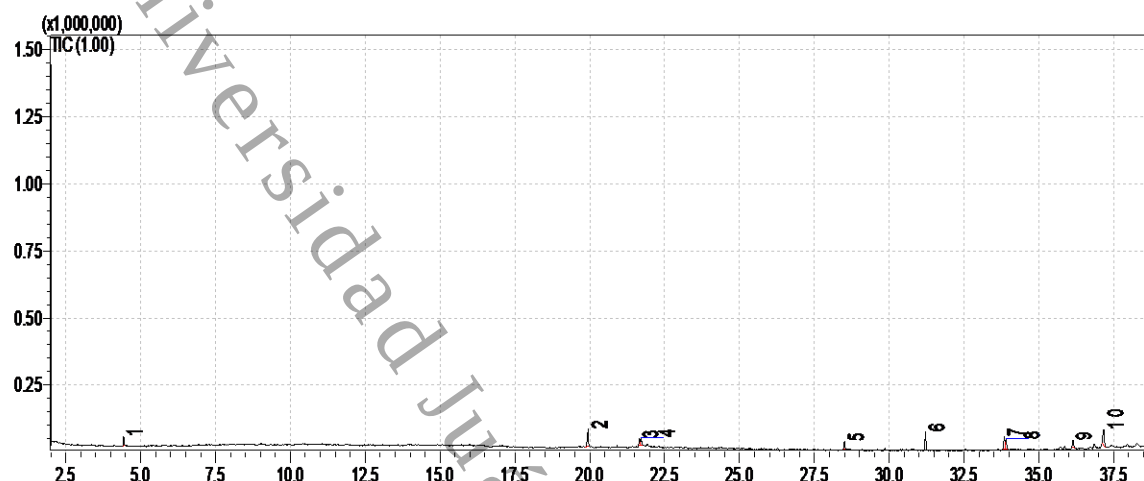


H1.3 Componentes obtenidos del aceite extraído de la hoja del árbol *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%.

No.	Tiempo de retención	Área	Concentración (%)	Componente identificado
1	2.083	1712101	3.92	Ácido ciclopropanetetradecanoico, 2-octil-, éster metílico
2	16.489	158693	0.36	Heptadecano
3	16.861	231870	0.53	Metil tetradecanoato
4	17.277	750136	1.72	Ácido palmitoleico
5	17.664	2772105	6.34	Ácido tetradecanoico
6	18.122	178074	0.41	Ácido oleico
7	18.234	202995	0.46	Ácido 4-metilnonanoico
8	18.496	440172	1.01	Ácido eicosanoico
9	18.605	878863	2.01	ácido cis-vacénico
10	18.871	1927584	4.41	Ácido pentadecanoico
11	19.293	302692	0.69	2-Metil-7-nonadeceno
12	19.464	372288	0.85	Éster metílico del ácido hexadecanoico
13	19.848	6141796	14.06	ácido cis-10-nonadecenoico
14	20.107	5545746	12.69	Ácido n-hexadecanoico
15	20.532	724278	1.66	Ácido heptadecanoico, éster heptadecílico
16	20.803	386594	0.88	ácido cis-11-eicosenoico
17	21.805	2954014	6.76	ácido cis-13-eicosenoico
18	22.001	667242	1.53	Ácido octadecanoico

19	26.28	828347	1.9	Ftalato de di-n-octilo
20	29.094	564347	1.29	Ácido 1,4-bencenodicarboxílico, éster bis(2-etilhexil)
21	30.134	11073131	25.34	Caroteno, 7,7',8,8',11,11',12,12',15,15'-decahidro-
22	31.204	580517	1.33	Nonacosano
23	33.832	785383	1.8	Hentriacontano
24	34.257	3232035	7.4	26-Hidroxicolesterol
25	34.385	286733	0.66	Colestanol

H1.4 Cromatograma del aceite extraído de la flor del árbol *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%.



H1.4 Componentes obtenidos del aceite extraído de la flor del árbol *sapindus saponaria* L. por el método soxhlet con hexano al 99%.

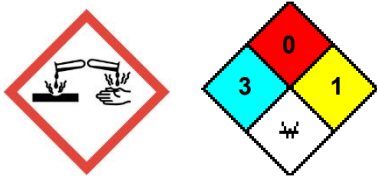
No.	Tiempo de retención	Área	Concentración (%)	Componente identificado
1	4.431	61403	5.54	Ácido propanoico, 2-hidroxí-, éster etílico, (L)-
2	19.941	181701	16.4	Ácido n-hexadecanoico
3	21.661	55489	5.01	Ácido 9-octadecinoico
4	21.719	64782	5.85	Ácido oleico
5	28.505	64484	5.82	Eicosano
6	31.21	165711	14.95	Heptacosano
7	33.843	140050	12.64	Octacosano
8	33.899	94688	8.54	1-Eicosanol
9	36.135	76197	6.88	Estigmasta-5,22-dieno, 3-metoxi-, (3 β ,22E)-
10	37.164	203632	18.38	beta-Acetato de sitosterol

I.1. Hojas de seguridad de reactivos

Hoja de seguridad del ácido sulfúrico (H₂SO₄)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD. Fuente: Carl Roth International (2024).	
Pictogramas	
Indicaciones de peligro	Puede ser corrosivo para los metales. Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.
Consejos de prudencia	- Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección. - EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. - EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua (o ducharse). - 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. - Llamar inmediatamente a un centro de toxicología/médico.
PRIMEROS AUXILIOS	
Medidas generales	
Inhalación	Proporcionar aire fresco. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.
Contacto con la piel	Quitar mecánicamente (por ej.: limpiar con cuidado, empleando algodón o celulosa, las partes de la piel afectadas) y lavar a continuación con agua abundante y detergente neutral. Necesario un tratamiento médico inmediato, ya que auterizaciones no tratadas pueden convertirse en heridas difícil de curar.
Contacto con los ojos	En caso de contacto con los ojos aclarar inmediatamente los ojos abiertos bajo agua corriente durante 10 o 15 minutos y consultar al oftalmólogo. Proteger el ojo ileso.
Ingestión	Lavar la boca inmediatamente y beber agua en abundancia. Llamar al médico inmediatamente. En caso de tragar existe el peligro de una perforación del esófago y del estómago (fuertes efectos cauterizantes).

Hoja de seguridad del hidróxido de sodio (NaOH)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD. Fuente: Carl Roth International (2024).	
Pictogramas	
Indicaciones de peligro	Puede ser corrosivo para los metales Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.
Consejos de prudencia	- Mantener el recipiente herméticamente cerrado. Llevar guantes/gafas de protección. - EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua (o ducharse). - 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. - Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/médico.
PRIMEROS AUXILIOS	
Medidas generales	
Inhalación	Retirar del área de exposición hacia una bien ventilada. Si el accidentado se encuentra inconsciente, no dar a beber nada, dar respiración artificial y rehabilitación cardiopulmonar. Si se encuentra conciente, levantarlo o sentarlo lentamente, suministrar oxígeno, si es necesario.
Contacto con la piel	Quitar la ropa contaminada inmediatamente. Lavar el área afectada con abundante agua corriente.
Contacto con los ojos	Lavar con abundante agua corriente, asegurándose de levantar los párpados, hasta eliminación total del producto.
Ingestión	No provocar vómito. Si el accidentado se encuentra inconsciente, tratar como en el caso de inhalación. Si está conciente, dar a beber una cucharada de agua inmediatamente y después, cada 10 minutos.

Hoja de seguridad del fenolftaleína (C₂₀H₁₄O₄)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD. Fuente: Carl Roth International (2024).	
Pictogramas	
Indicaciones de peligro	Se sospecha que provoca defectos genéticos Puede provocar cáncer Se sospecha que perjudica a la fertilidad.
Consejos de prudencia	• No manipular la sustancia antes de haber leído y comprendido todas las instrucciones de seguridad. • Llevar guantes de protección. • EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Consultar a un médico.
PRIMEROS AUXILIOS	
Medidas generales	
Inhalación	Proporcionar aire fresco. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.
Contacto con la piel	Aclararse la piel con agua/ ducharse.
Contacto con los ojos	Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.
Ingestión	En caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico (si es posible, mostrar la etiqueta).

Hoja de seguridad del etanol (C₂H₅OH)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD. Fuente: UNCR, (2016b).	
Pictogramas	 
Indicaciones de peligro	Líquido y vapores muy inflamables. Provoca irritación ocular grave.
Consejos de prudencia	- Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar Mantener el recipiente herméticamente cerrado. - 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.
PRIMEROS AUXILIOS	
Medidas generales	
Inhalación	Proporcionar aire fresco. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.
Contacto con la piel	Aclararse la piel con agua/ ducharse. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.
Contacto con los ojos	Mantener separados los párpados y enjuagar con abundante agua limpia y fresca por lo menos durante 10 minutos. En caso de irritación ocular consultar al oculista.
Ingestión	Enjuagarse la boca. Llamar a un médico si la persona se encuentra mal.

Hoja de seguridad del hexano (C₆H₁₄)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD. Fuente: Carl Roth International (2025)	
Pictogramas	
Indicaciones de peligro	• Líquido y vapores muy inflamables. • Puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias. • Provoca irritación cutánea. • Puede provocar somnolencia o vértigo. • Se sospecha que perjudica a la fertilidad Provoca daños en los órganos (sistema nervioso) tras exposiciones prolongadas.
Consejos de prudencia	• No manipular la sustancia antes de haber leído y comprendido todas las instrucciones de seguridad • Llevar guantes/gafas de protección. • EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua (o ducharse). • EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. • EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Consultar a un médico
PRIMEROS AUXILIOS	
Medidas generales	
Inhalación	Proporcionar aire fresco. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.
Contacto con la piel	Aclararse la piel con agua/ducharse. En caso de irritaciones cutáneas, consultar a un dermatólogo.
Contacto con los ojos	Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico.
Ingestión	Llamar al médico inmediatamente. En caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico (si es posible, mostrar la etiqueta). Observar el peligro por aspiración en caso de vómito.

Hoja de seguridad del cloroformo (CHCl₃)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD. Fuente: Carl Roth International (2024).	
Pictogramas	
Indicaciones de peligro	• Nocivo en caso de ingestión. • Provoca irritación cutánea H319 Provoca irritación ocular grave. • Tóxico en caso de inhalación. • Se sospecha que provoca cáncer. • Se sospecha que daña al feto. • Provoca daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.
Consejos de prudencia	• No manipular la sustancia antes de haber leído y comprendido todas las instrucciones de seguridad No respirar la niebla/los vapores/el aerosol. • EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con abundante agua y jabón EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. • 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. • EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Consultar a un médico. • EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con abundante agua y jabón EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración. • 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. • EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Consultar a un médico
PRIMEROS AUXILIOS	
Medidas generales	
Inhalación	Llamar al médico inmediatamente. En caso de dificultades respiratorias o paro de respiración preparar respiración artificial.
Contacto con la piel	Aclararse la piel con agua/ducharse. En caso de irritaciones cutáneas, consultar a un dermatólogo.
Contacto con los ojos	Mantener separados los párpados y enjuagar con abundante agua limpia y fresca por lo menos durante 10 minutos. En caso de irritación ocular consultar al oculista.

Ingestión	Enjuáguese la boca con agua (solamente si la persona está consciente). En caso de accidente o males tar, acudase inmediatamente al médico (si es posible, mostrar la etiqueta). Llamar a un médico.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Hoja de seguridad del anhídrido acético ($C_4H_6O_3$)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD. Fuente: Carl Roth International (2024).	
Pictogramas	  
Indicaciones de peligro	• Líquidos y vapores inflamables. • Nocivo en caso de ingestión. • Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves. • Mortal en caso de inhalación. • Puede irritar las vías respiratorias.
Consejos de prudencia	• Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. No fumar. Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección. • EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua o ducharse. • EN CASO DE INHALACIÓN: Llamar a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/médico si la persona se encuentra mal. • 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.
PRIMEROS AUXILIOS	
Medidas generales	
Inhalación	Llamar al médico inmediatamente. En caso de dificultades respiratorias o paro de respiración preparar respiración artificial.
Contacto con la piel	En caso de contacto con la piel, lávese inmediata y abundantemente con mucha agua. Necesario un tratamiento médico inmediato, ya que cauterizaciones no tratadas pueden convertirse en heridas difícil de curar.
Contacto con los ojos	En caso de contacto con los ojos aclarar inmediatamente los ojos abiertos bajo agua corriente durante 10 o 15 minutos y consultar al oftalmólogo. Proteger el ojo ileso.
Ingestión	Lavar la boca inmediatamente y beber agua en abundancia. Enjuáguese la boca con agua (solamente si la persona está consciente). Llamar al médico inmediatamente. En caso de tragar existe el peligro de una perforación del esófago y del estómago (fuertes efectos cauterizantes). Llamar a un médico.

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Aplicaciones industriales y medioambientales de un biotensioactivo de origen vegetal con base en características fisicoquímicas y balance hidrofílico-lipofílico (HLB).
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Ing. Nancy Cristel Cortaza Torres. Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera. Dra. Marcia Eugenia Ojeda Morales.
ORCID:	https://orcid.org/0009-0003-4762-0127 https://orcid.org/0000-0002-8007-7221 https://orcid.org/0000-0003-0360-4654
Resumen de la Tesis:	Los biotensioactivos terpénicos son una alternativa natural para reducir la tensión superficial del agua, incrementando así la solubilidad y disponibilidad de compuestos orgánicos. Por otra parte, uno de los problemas ambientales del estado de Tabasco son los siniestros causados por negligencias antropogénicas durante el manejo, transporte o procesamiento del petróleo. Para minimizar el impacto se aplican diversos tensioactivos químicos, lo que ha propiciado la “limpieza de los ecosistemas” así como la mortandad de los factores bióticos. Este estudio propicia la aplicación de un aceite vegetal de baja

	toxicidad que tenga la capacidad de reducir la tensión superficial, por lo que, se evaluó el aceite del árbol jaboncillo (<i>Sapindus saponaria</i> L.) obtenido a partir de la raíz, tallo, hojas, flor y fruto, por el método soxhlet y supercrítico con CO₂. Los analitos se identificaron en ambos métodos de extracción mediante GC-MS, confirmando que el fruto presentó un rendimiento de aceite significativamente superior al de las demás estructuras del árbol. El componente más representativo del fruto fue ácido oleico con 60.15% obtenido por soxhlet y 53.61% obtenido por supercrítico con CO₂, además de 12 analitos adicionales en el aceite esencial. El balance hidrofílico-lipofílico (HLB) fue determinado por el método de contribución grupal de Davies, el resultado se registró en 5.1236 representando un agente emulgente (w/o). El análisis por FTIR determinó bandas de -OH, -C=O, C-H, y C=C asociados con una estructura triterpénica representativa de las saponinas. La tensión superficial y concentración micelar crítica del aceite esencial del fruto fue de $\sigma = 52.5 \text{ mN/m}$ y $\text{CMC} = 4.55015 \times 10^{-05} \text{ } \mu\text{M}$.
--	--

Palabras claves de la Tesis:	<i>Sapindus Saponaria</i> L., gases acoplado a un espectrómetro de masas (GC/MS), Supercrítica con CO ₂ (SFE), soxhlet, ácido oleico, alcanos, ácidos carboxílicos, ésteres, aldehídos, estructura triterpénica, saponinas y tensión superficial.
Referencias citadas:	A partir de la página 106 a 132