



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC  
DIRECCIÓN ACADÉMICA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA BIOQUÍMICA

*Oleoextracción de compuestos polifenólicos de cáscara de Opuntia-ficus  
indica mediante ultrasonido o un sistema de alto corte*

**T E S I S**

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA BIOQUÍMICA**

PRESENTA

**I.Q. YOYCE TANIA OBANDO GALICIA**

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Alfonso Totosaus Sánchez, Director  
Dra. María Eva Rodríguez Huevo, Asesor/revisor  
Dr. Ignacio García Martínez, Asesor/revisor

Ecatepec de Morelos, México, (Febrero) de 2024

**DIRECCIÓN ACADÉMICA**  
 DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA  
 PROGRAMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA BIOQUÍMICA

Fecha: 25 de septiembre del 2023

Datos generales  
Nombre del alumno:

OBANDO	GALICIA	YOYCE TANIA
Apellido paterno	Apellido materno	Nombres (s)

Matrícula: 202121819

PROYECTO: Oleoextracción de compuestos polifenólicos de cáscara de *Opuntia ficus-indica* mediante ultrasonido o un sistema de alto corte

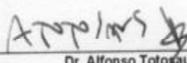
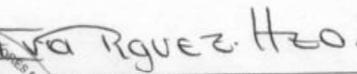
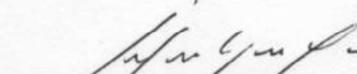
DIRECTOR: Dr. ALFONSO TOTOSAUS SANCHEZ

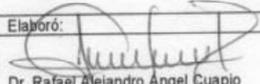
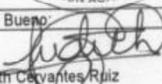
**Dictamen:**  
 Con base en el registro No. MCIBQ/2021/OAGY920510 correspondiente al periodo escolar 2021-2, asignado al proyecto de tesis Oleoextracción de compuestos polifenólicos de cáscara de *Opuntia ficus-indica* mediante ultrasonido o un sistema de alto corte y presentado por la alumna referida; y después de haber sido desarrolladas las actividades requeridas, el Comité Tutorial, conformado por los integrantes que firman al calce, ha determinado que SI (X) NO ( ) han sido cubiertos en su totalidad los requisitos que permitan a esta División Académica liberar al alumno de los trámites académicos para tal efecto e iniciar el trámite de obtención de grado de maestría en la Unidad de Registro y Certificación de este Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Observaciones:

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Comité Tutorial

 Dr. Alfonso Totosaus Sánchez Director	 Dra. Maria Eva Rodriguez Huez Asesora
 Dra. Ignacio Garcia Martinez Asesor	

Elaboró:  Dr. Rafael Alejandro Ángel Cuapio Coordinador de Posgrado	Revisó y Visto Bueno:  M. en IQ. Judith Cervantes Ruiz Jefe de División	Enterado:  M. en A. Armando Alcalde Martinez Director Académico
---	---	--



Esta Tesis fue realizada con el apoyo de la Beca del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONACYT).



*DEDICADO*

*Con el amor más puro de una órbita  
cerrada sin principio ni fin para:*



*ALBA ARACELI*

*γ*

*GASTÓN MARTÍNEZ*

---

## Agradecimientos

Esta página es para retribuir con un reconocimiento sincero a todas las personas que caminaron conmigo para hacer posible esta etapa de estudio; me refiero a profesores, compañeros, amigos y familiares. En especial menciono, en un orden que no resta importancia a ninguno:

Al **Dr. Alfonso Totosaus Sánchez**; por la confianza, paciencia y en general por el apoyo que me ha brindado en todo momento.

Al **Dr. Gaston Martínez de Jesús**; por su colaboración con herramientas para el desarrollo experimental.

A mis profesores y revisores el **Dr. Ignacio García y Dra. Eva Rodríguez** a quienes les agradezco las recomendaciones para mejorar este trabajo.

Al **Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec**; porque sin ser mi alma mater me acogió en sus instalaciones permitiendome realizar estudios de maestría.

A mi hija **Alba** y mi esposo **Gaston**, por su amor, apoyo y ser mis motivaciones para ser una mejor persona

A mis padres **Berta y Saúl**<sup>†</sup>; por darme la vida y ser las primeras personas en confiar en mí

A mi hermano **Oscar Obando** por haber sido mi ejemplo a seguir

A mis amigas y compañeras **Karla Lemus y Fernanda Isalas**, por los momentos y risas que hicieron mas ameno este camino.

Este logro no es mío, es de todos y para todos. Porque el ser y el conocimiento no existen solos, coexisten en un universo. Y cuanto más camino en la ciencia, más confirmo la necesidad de otros.

**I.Q. Yoyce Tania Obando Galicia**

---

## Breve reseña personal

Ecatepec de Morelos, Estado de México (Agosto 2023)

Mis padres me nombraron Yoyce Tania Obando Galicia, nací el 10 de mayo de 1992 en el Estado de Morelos, en el núcleo familiar formado por mis padres; Berta Galicia y Saúl Obando<sup>†</sup> y mi hermano Oscar Eduardo. En el 2018 formé mi propia familia a lado de mi esposo Gastón Martínez y en el 2020 recibimos a nuestra hija Alba Martínez.



En el 2017 me licencié como ingeniera química por la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco. En ese mismo año ingresé al sector industrial como químico analista y aunque en el 2019 logré ser jefa de departamento, no me sentía plena en el ámbito profesional; razón por la que en el 2021 decidí iniciar con mis estudios de posgrado en el TES-Ecatepec. Donde me he topado con investigadores que han dado un aporte a mi crecimiento profesional. He aprendido sobre una parte de la química que ignoraba por completo; ahora reconozco y veo el potencial de investigación en el área de alimentos y una vez más confirmo que la química es una ciencia central y que es la base de otras disciplinas. Estoy por recibir un título con formación en Ciencias Bioquímicas y reconozco que aun me falta mucho por aprender, pero me siento satisfecha por estar por concluir esta etapa y ansiosa por planear una nueva.

Yoyce Tania Obando Galicia

---

Índice	
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>vi</b>
<b>Breve reseña personal</b> .....	<b>vii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRAC</b> .....	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>PROBLEMÁTICA</b> .....	<b>6</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>10</b>
<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>12</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
Lípidos.....	13
Aditivos alimenticios .....	20
Compuestos Fenólicos .....	21
Extracción de Compuestos fenólicos .....	25
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>28</b>
<b>MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
Etapa 1. Homogenización de la cáscara de tuna.....	29
Etapa 2. Extracciones .....	31
Etapa 3. Elaboración de oleogeles .....	38
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>41</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>42</b>
<b>Control analítico del proceso cuantitativo</b> .....	<b>42</b>
Intervalo lineal .....	42
Recobro y desviación del analito (Exactitud y precisión).....	45
<b>Resultados de las extracciones de CFT</b> .....	<b>46</b>
Modelo matemático de las Extracciones .....	48
Superficies de respuesta (Extracción con ultrasonido).....	49
Superficies de respuesta de la extracción con Sistema de Alto corte.....	52
<b>Oleogeles</b> .....	<b>53</b>
Índice de peróxido de los oleogeles.....	56
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>60</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>62</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>64</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>73</b>
<b>PRODUCTIVIDAD</b> .....	<b>74</b>

---

## Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades organolépticas de los CF .....	22
Tabla 2. Producción Nacional de tuna en el 2021 (fuente SIAP, 2021).....	24
Tabla 3. Diseño experimental codificado 2 <sup>3</sup> de las extracciones.....	31
Tabla 4. Niveles del sistema factorial de la EU .....	32
Tabla 5. Niveles del sistema factorial de la EAC .....	32
Tabla 6. Estadísticas de regresión de la curva de catecol .....	44
Tabla 7. Resultados de la extracción con ultrasonido y sistema de alto corte .....	46
Tabla 8. Resumen del ANOVA extracción con ultrasonido .....	47
Tabla 9. Resumen del ANOVA extracción de alto corte .....	47
Tabla 10. Resultados de firmeza de los oleogeles .....	55
Tabla 11. Resultados de Índice de peróxido (IP).....	57

---

## Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de Lípidos (Fuente: Adaptada de FAO, 2008) .....	14
Figura 2. Estructura química del triglicérido.....	14
Figura 3. Composición principal de aceites vegetales (Fuente adaptada de Yara-Varón et al., 2017).....	15
Figura 4. Estructura química del grupo fenol (hidroxibenceno) .....	22
Figura 5. Tuna Roja ( <i>Opuntia ficus-indica</i> ) silvestre .....	29
Figura 6. De izquierda a derecha; cáscara: fresca, secada y tamizada.....	30
Figura 7. Elaboración del solvente de extracción.....	33
Figura 8. Baño ultrasónico Cole Parmer 8892 .....	33
Figura 9. Disco Norstone con 7 surcos .....	34
Figura 10. Geometría del reactor: D=diámetro del impulsor, Z=altura del reactor, T=diámetro del reactor y C=posición del impulsor. ....	35
Figura 11. Decantación y reducción de los extractos metanólicos .....	37
Figura 12. Elaboración de oleogeles.....	38
Figura 13. Equipo "LFRA Texture Analyze" usado en las pruebas de firmeza .....	39
Figura 14. Curva de calibración de catecol y su gráfico de residuos .....	43
Figura 15. Superficie de respuesta AC con B en el nivel +1 (ultrasonido) .....	49
Figura 16. Superficie de respuesta AB con C en el nivel -1 (Ultrasonido) .....	51
Figura 17. Superficie de respuesta BC con A en el nivel 0 (Alto corte).....	52
Figura 18. Superficie de respuesta AB con A en su nivel +1 (Alto corte) .....	53
Figura 19. Oleogeles estructurados.....	54
Figura 20. Gráficos de efecto del %LS y tipo de cera sobre la firmeza del oleogel	56
Figura 21. IP oleogeles C. Candelilla .....	58
Figura 22. IP Oleogeles de C. Soya.....	59

---

## RESUMEN



Los aditivos alimenticios sintéticos como el BHT (Butilhidroxitolueno), el BHA (butilhidroxianisol) o TBHQ (terbutilhidroquinona), son usados ampliamente en la industria alimenticia para evitar la degradación oxidativa de los alimentos. Sin embargo, la continua preocupación por consumir productos más “naturales” ha incentivado las investigaciones para encontrar alternativas naturales a los aditivos sintéticos. Por ello, en este trabajo se enfocó en extraer los antioxidantes naturales contenidos en la cáscara de tuna roja (deshecho orgánico sin valor comercial); por medio de dos métodos extractivos diferentes (ultrasonido y un sistema de alto corte). Para lo anterior se utilizó aceite vegetal de soya como solvente de extracción grado alimenticio. Dicho aceite que fue enriquecido de antioxidantes se usó para la elaboración de oleogeles que en prospectiva sean usados para sustituir a las grasas o mantecas usadas en la formulación de alimentos.

El trabajo se desarrolló siguiendo un diseño experimental para evaluar la influencia de la temperatura, tiempo, velocidad de agitación y lecitina de soya sobre la oleoextracción de los antioxidantes de la tuna asistida con ultrasonido y con el sistema de alto corte. La cuantificación de los compuestos fenólicos se realizó con un método colorimétrico y su resistencia a la oxidación se evaluó de manera indirecta mediante la cuantificación de los peróxidos presentes en el oleogel.

---

## ABSTRAC



Synthetic food additives as BHT (butyl hydroxy toluene), BHA (butyl hydroxy anisol) or TBHQ (terbutyl hydroquinone) are widely employed in the food industry to avoid food oxidative degradation. Nonetheless, the concern about the consumption of “healthier” foods has encourage research to find alternatives to the synthetic additives. In this view, this work was focuses to the natural antioxidants contained in the red opuntia ficus pear peel (organic waste with no commercial value), by two different extraction methods (ultrasound and system). For this, edible soybean oil was employed as food grade solvent, and this oil was employed to oleogel elaboration, with the aim to be employed as fat or lard replacer in the food formulation.

This work was developed following an experimental design to evaluate the influence of temperature, stirring rate, and soy lecithin on the oleoextraction of opuntia ficus pear peel antioxidants assisted by ultrasound or high shear rate propeller. Phenolic compounds quantification was colorimetric, and the resistance to oxidation was indirectly evaluated by the peroxide content in oleogel.



# CAPÍTULO I

---

## INTRODUCCIÓN



La tuna, es el fruto proveniente del nopal y cuenta con amplia presencia en la zona centro de México como Estado de México, Puebla e Hidalgo. La variedad “roja” corresponde al 20.5 % de la producción nacional de las diferentes variedades de tuna (SIAP, 2021). Además, del 37-67 % del peso total del fruto corresponde a la cáscara (Jiménez-Aguilar et al., 2015) y al no ser una parte comestible se convierte en un desecho de tipo orgánico sin uso.

Este tipo de residuos (cáscaras y frutas), que no tienen un tratamiento específico, llegan a rellenos sanitarios ocasionando efectos negativos al medio ambiente; debido a que su descomposición natural genera gases de efecto invernadero, crecimiento de fauna nociva y líquidos que se infiltran en el subsuelo. Una de las propuestas de la NOM-161-SEMARNAT-2011 para este tipo de residuos es el plan de manejo especial por medio de la revalorización o procesamiento para la recuperación de algún componente. Es así que, de las cáscaras y frutas, se tiene peculiar interés sobre sus compuestos bioactivos como compuestos fenólicos o tratarla como fuente natural de fibra.

Por lo anterior, la extracción de compuestos bioactivos ha sido de amplio interés como una forma de promover la “economía circular”. Hasta el momento el método ampliamente aceptado, por su alto rendimiento, es el uso de solventes como metanol, acetona, cloroformo y grandes cantidades de agua. Sin embargo, en las

---

últimas décadas se han planteado alternativas al uso de solventes, como el uso de fluidos supercríticos, solventes eutécticos profundos, microondas y ultrasonido.



De manera general, las recuperaciones de compuestos bioactivos a partir de fuentes como cáscaras de frutas se hacen a través de lo que técnicamente se conoce como extracciones sólido-líquido, pues el analito de interés que se encuentra atrapado en una matriz sólida se recupera en un medio líquido. Las variables que controlan este tipo de proceso son el tamaño de partícula sólida, temperatura, pH, solubilidad del analito y la forma de mantener el contacto entre las fases. Esta última se refiere a los procesos de mezclado.

La operación de mezclado es compleja desde el punto de vista diferencial es el cual en la última década se han comenzado investigaciones referentes al uso de geometrías diferentes de agitadores que han llamado impulsores de alto corte (IAC) aplicadas a la desaglomeración de partículas como el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en la industria de las pinturas. Sin embargo, existen escasas investigaciones de estos impulsores aplicados a otros campos donde se requieren sistemas de dispersión de partículas sólidas en un medio fluido. Tal es el caso de la recuperación de biomoléculas. Por ello en este trabajo se pretendió evaluar el impulsor Norstone, como mecanismo de agitación para la recuperación de compuestos fenólicos totales y con ello darles una entrada a aplicaciones con fines diferentes a la industria de la pintura. Y que para posteriores trabajos sea de interés usar otros impulsores como el Cowles, Hockmeyer y profundizar sobre su eficiencia en este tipo de procesos.

---

## PROBLEMÁTICA



Abordar los diversos problemas que enfrenta el área de ingeniería de los alimentos en un solo trabajo de investigación, resulta ser casi imposible. Pues abarcan desde problemas medio ambientales, tecnológicos, de salud causados por consumo de alimentos poco saludables (como los que tienen un alto contenido de ácidos saturados y trans), y los no menos importantes, problemas de desigualdad económica que desencadenan un desabasto de alimentos en algunas regiones. Es así como, diversas investigaciones han abordado temas con el aprovechamiento de subproductos agroindustriales, la generación de alimentos funcionales o nutraceuticos, o en otros casos la mejora en la calidad de los alimentos y que en prospectiva puedan ser un aporte hacia la solución de los diversos problemas.

Particularmente, en esta investigación se tiene interés sobre compuestos fenólicos de origen natural. Debido a que su capacidad antioxidante los hace potenciales para ser aprovechados como aditivos alimenticios que sustituya a los sintéticos como BHQ, BTH que son usados en las grasas para consumo humano.

Aunque el conocimiento sobre la recuperación de los compuestos fenólicos ha iniciado desde décadas atrás; la variedad en la que los compuestos se pueden encontrar en la naturaleza provoca que cada sistema deba ser analizado y su método de recuperación deba ser ajustado a las necesidades específicas de cada matriz y desde luego a la aplicación que se pretende otorgarles.

---

Los métodos convencionales de extracción con solventes, como metanol/agua, han mostrado amplia eficiencia de recuperación compuestos bioactivos en variadas matrices. Sin embargo, el volumen de solvente que llega a utilizarse provoca que los procesos sean poco amigables con el medio ambiente. De este modo, diversas investigaciones han planteado alternativas no convencionales para la extracción. Por ejemplo, el uso de microondas, fluidos supercríticos, ultrasonido. Aunque hay evidencia de la viabilidad de su uso, aún existe un largo camino por recorrer para llegar a optimizar las técnicas, ya sea individuales o combinadas, y como anteriormente se menciona también para ajustar dichos procesos a las necesidades de cada matriz.

Sabiendo que las matrices orgánicas como cáscaras de frutas, flores y otros materiales sólidos, son la principal fuente de interés para extraer compuestos fenólicos. Desde el punto de vista de procesos, a este tipo de operación, se le conoce como extracción sólido-líquido.

En las extracciones sólido-líquido, los parámetros físicos que influyen en la eficiencia de la extracción son el tamaño de partícula sólida, tipo de matriz, y la forma de mantener el contacto entre las fases (mezclado), dentro de los parámetros termodinámicos la selectividad del solvente por analito de interés, la poca afinidad del de la matriz por el solvente, temperatura y pH. Todos estos parámetros limitan o favorecen los procesos de transferencia de masa y determinan cinéticamente la velocidad de extracción.

Durante los últimos años, se ha comenzado a estudiar la eficiencia de diversos dispositivos mecánicos usados para operaciones de mezclado. Una de las herramientas que se usan para dicho propósito, son las simulaciones en Computacional Fluid Dynamics (CFD), de la que se obtienen parámetros hidrodinámicos que describen el funcionamiento de dichos dispositivos.

Sin embargo, a pesar de que en la literatura hay trabajos que reportan el desempeño de los dispositivos como, turbina Ruston, Disco Norstone, Hockmeyer,

---

## JUSTIFICACIÓN



En cualquier proceso de extracción de compuestos bioactivos con valor comercial, de manera particular a partir de coproductos agroindustriales como cáscaras de frutas o frutas subutilizadas, es importante el reducir el manejo de solvente orgánicos que además de ser una fuente de contaminación, deben ser evaporados para la obtención de oleorresinas. El utilizar aceites vegetales comestibles como solvente “verde” elimina la necesidad de utilizar solventes orgánicos. La extracción de este tipo de compuestos se ve mejorada al utilizar un método asistido, como el ultrasonido o los propulsores de alto corte, como es el caso de esta tesis.

De este modo, la evaluación del efecto de estos dos métodos de extracción y las variables de proceso correspondientes permitirán establecer las mejores condiciones para obtener aceites comestibles enriquecidos con antioxidantes naturales, los cuales son empleados en la elaboración de oleogeles, reemplazo de grasas y mantecas en la formulación de alimentos.

---

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Evaluar y comparar la cantidad de compuestos fenólicos extraídos de la cáscara de tuna roja con ultrasonido y con el sistema de alto corte, usando aceite vegetal como solvente de extracción.

### Objetivos específicos

- Extraer los compuestos fenólicos de la cáscara de tuna roja con ultrasonido y un sistema de alto corte (Norstone) usando aceite vegetal de soya como solvente.
- Cuantificar la cantidad de compuestos fenólicos extraídos de la cáscara de tuna roja mediante el ensayo de Folin-Ciocalteu
- Elaborar oleogeles con los aceites enriquecidos de compuestos fenólicos, estructurados con cera de candelilla y cera de soya.
- Evaluar el estado de oxidación de los oleogeles mediante la prueba de índice de peróxido
- Evaluar la dureza de cada oleogel mediante un análisis de textura por penetración con vástago

---

## HIPÓTESIS



En la extracción asistida de compuestos bioactivos, antioxidantes de manera particular, además de la temperatura de extracción y la concentración de lecitina como auxiliar en la extracción de polifenoles, el método asistido utilizado, en este caso, ultrasonido o impulsor Norstone de alto flujo, serán la principal influencia en el rendimiento de extracción de compuesto fenólicos.

# CAPÍTULO II

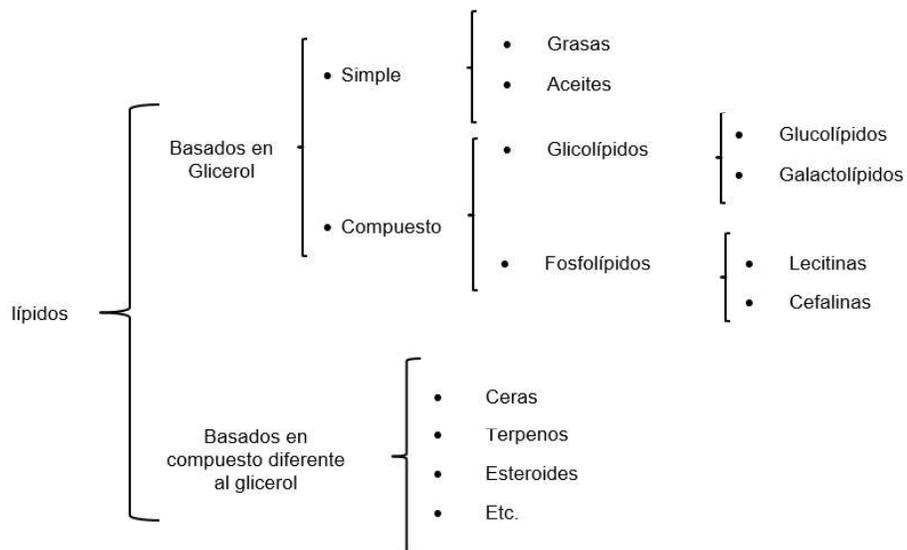
---

## MARCO TEÓRICO

### Lípidos

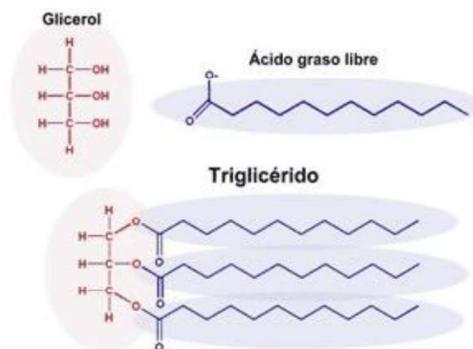
La palabra lípido está formada por la raíz griega λίπος que significa *grasa* y el sufijo latino “ido” que quiere decir cualidad o apariencia de- (Plitt, 1995). Aunque puede resultar ambiguo, en términos etimológicos lípido es un ente de apariencia grasa. Existe un amplio número de moléculas que pueden dar dicha apariencia, por lo que resulta complicado dar una definición y clasificación única de la palabra lípido. Una definición más reciente de la palabra lípido usada en diversos trabajos (Duarte V. et al., 2016; Serrano Maddelaine et al., 2014) en los que refieren que son moléculas hidrófobas que pueden originarse parcial o totalmente a través de condensaciones de tioésteres o unidades de isopreno.

La heterogeneidad de todos los compuestos que pertenecen a la definición de lípidos conlleva a que existan diversas clasificaciones relacionadas con sus características físicas, químicas o estructurales. Sin embargo, debido a que el interés de este trabajo es en los lípidos más abundantes en los alimentos, se consideró que la clasificación mostrada en la Figura 1 de la *Food and Agriculture Organization*, (FAO, 2008) es la más adecuada. La cual está basada en el contenido de un grupo glicerol dentro de la estructura química del lípido.



**Figura 1. Clasificación de Lípidos** (Fuente: Adaptada de FAO, 2008)

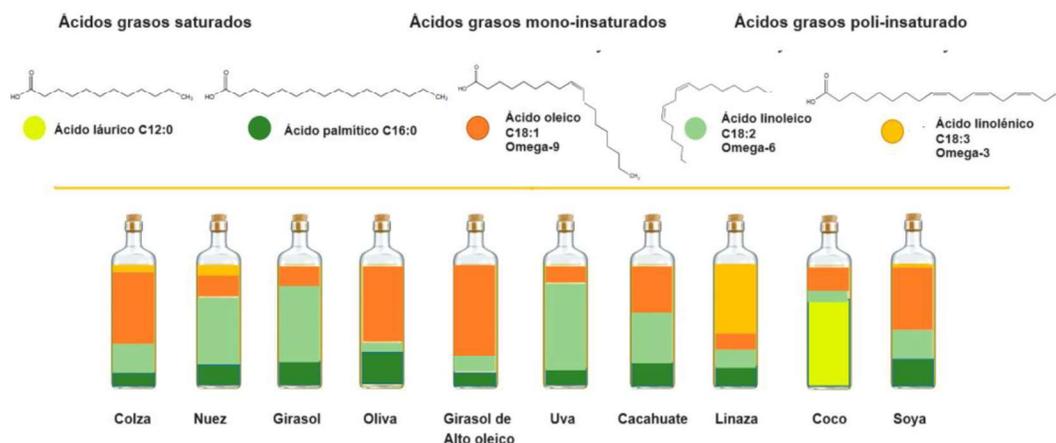
Los lípidos más abundantes en los alimentos son las grasas y aceites que están formadas por un 90 -95 % de triglicéridos (Figura 2) que son ácidos grasos esterificados y unidos a una molécula de glicerol (Farrán-Codina., 2020; Yara-Varón et al., 2017). El resto puede ser agua, fosfolípidos, ácidos grasos libres, vitaminas, pigmentos y algunas impurezas como los metales (Yara-Varón et al., 2017).



**Figura 2. Estructura química del triglicérido**

Los ácidos grasos (AG) que se unen al glicerol pueden ser saturados (solo enlaces sencillos), monoinsaturados (con un doble enlace) y poliinsaturados (con más de un doble enlace). Las características fisicoquímicas de las grasas y aceites dependen de la longitud de la cadena y de las insaturaciones que presente. Dichas insaturaciones, se señalan en función de la distancia de la distancia del doble enlace respecto al grupo metilo terminal del ácido graso (Farrán-Codina., 2020), es así como los Omega-3 y Omega-6 tienen su primera insaturación en el tercer y sexto carbono, respectivamente, respecto al grupo metilo terminal.

En la Figura 3 se muestra la composición de algunos aceites vegetales usados como parte de la alimentación humana, y se puede destacar que el aceite de linaza, nuez, canola y soya son los que presentan más Omega-3 y los aceites de semilla de uva, girasol, nuez presentaron más alto contenido de Omega-6, posteriormente se hablará de la importancia de grasas con un contenido elevado de Omega 3 y 6.



**Figura 3. Composición principal de aceites vegetales** (Fuente adaptada de Yara-Varón et al., 2017)

---

## El papel de las grasas en los alimentos y salud humana

Los alimentos, de manera general están compuestos de carbohidratos, proteínas, lípidos, agua y en una menor cantidad de biomoléculas como pigmentos, vitaminas y minerales. En el caso específico de los lípidos; se encuentran en los alimentos principalmente en forma de grasas. Las cuales son la principal fuente de energía, pues aportan alrededor de 9 cal/g, que es mayor a las 4 cal/g de las proteínas y carbohidratos (Vargas Domínguez, 2019).

Existen AG que no pueden ser sintetizados por el cuerpo humano y son los denominados ácidos grasos esenciales. Los principales son las familias de Omega-3; cuyo precursor es el ácido alfa linoleico y los Omega-6; derivado del ácido linoleico (Aires et al., 2005).

El consumo de AG poliinsaturados genera beneficios en la salud humana, pues además de proporcionar parte de la energía necesaria al cuerpo, cumplen funciones como la de formar parte de las membranas celulares, precursores de prostaglandinas, forman parte del sistema nervioso central y transporte de vitaminas liposolubles (Sanhueza Catalán et al., 2015), también reducen el colesterol LDL (Cabezas-Zábala et al., 2016). Sin embargo, las insaturaciones representan un problema en la estabilidad de la grasa, pues los dobles enlaces de la grasa son más propensos a oxidarse y como consecuencia la pérdida de su valor nutricional.

Por otro lado, una dieta elevada en AG saturados, y AG trans está relacionada con el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, algunos cánceres, diabetes,

---

trastornos del aparato locomotor, hipertensión, obesidad y sobrepeso (OMS, 2021). Además de ser promotores del aumento de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), lo que genera la formación de placa aterosclerosis que conlleva a accidentes vasculares como infartos, (Islam et al., 2019).

En el caso de la industria alimenticia, las grasas tienen un papel indispensable en la elaboración de alimentos. Por ejemplo, el aroma tanto agradable como desagradable, depende de las reacciones de los lípidos con otras moléculas contenidas en los alimentos. Algunos ejemplos de dichas interacciones son la degradación de Strecker, reacción de Maillard y los propios procesos oxidativos de los lípidos (Shahidi & Oh, 2020).

También se atribuye a las grasas que los aromas estén retenidos en la fase oleosa del alimento, generando mayor tiempo de residencia de los compuestos volátiles (aroma) en los receptores del olfato (Badui Dergal, 2006), en la textura le proporciona cremosidad y en los procesos de fritura su aporte es en la formación del color y consistencia crujiente. De tal forma, la presencia de los lípidos en los alimentos es de importancia para lograr una calidad sensorial y consecuente aceptación.

### **Degradación de lípidos en los alimentos**

Los alimentos son un sistema multifásico abierto, compuesto por diversas moléculas en los tres estados de la materia, que se encuentran reaccionando con el entorno. Ocurren reacciones desde las propias de la maduración y las ocasionadas

---

intencionalmente en los procesos fabricación. De tal forma que en sentido estricto nunca se encuentran en equilibrio termodinámico.



Las reacciones previamente mencionadas, pueden proporcionar características organolépticas tanto favorables como desfavorables; las cuales tienen que ver con la aceptación o rechazo, así mismo con el nivel de agrado (Espinosa Manfugás, 2020). A partir de lo anterior, se puede evaluar la calidad y tiempo de vida útil de los alimentos.

La degradación de los alimentos genera pérdidas y enfermedades de transmisión alimentaria (ETAs) como las intoxicaciones (Juncos et al., 2021), lo que es catalogado como una problemática a nivel mundial.

Los alimentos con alto contenido de grasas tienden a degradarse mediante procesos de oxidación, como la lipólisis o rancidez hidrolítica y autooxidación o rancidez oxidativa (Badui Dergal, 2006). La degradación de dichas grasas, provoca que los alimentos se arrancien, y que por lo tanto su vida útil en el periodo comercial sea disminuida.

La autooxidación es la principal causa de degradación de las grasas. Se inicia en la presencia de oxígeno principalmente, sin embargo, otros agentes que favorecen estas reacciones son la luz, calor, presencia de traza de metales como Fe y Cu y especies reactivas de oxígeno (Badui Dergal, 2006). Por otro lado, la parte de la grasa que es más propensa a oxidarse es en los dobles enlaces de los AG (Mouithys-Mickalad et al., 2021).

La autooxidación, se lleva a cabo en una serie de reacciones químicas clasificadas en etapa de iniciación (1), propagación (2) y terminación (3). Durante las etapas 1 y 2, se generan principalmente compuestos peróxidos que en la etapa 3 se convierten en aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos y otros compuestos de bajo peso molecular. Estos últimos, son los que proporcionan el olor y sabor a rancio de las grasas (Badui Dergal, 2006). Una de las herramientas que usa la industria alimenticia para proteger las grasas mono y poliinsaturadas de la autooxidación es mediante el uso de aditivos alimenticios como los antioxidantes, de los cuales se profundizará más adelante.

### **Oleogeles como sustitutos de grasas**

La industria aceitera mexicana inició en 1887 con la obtención de aceites de algodón y ajonjolí (SADER, 2017). Con el paso de los años, la extracción se amplió a otras fuentes como cártamo, soya, canola, palma, entre otras. Sin embargo, la industria alimenticia no solo demanda aceites si no también grasas sólidas. Para lograr la consistencia sólida o semisólida de los aceites a temperatura ambiente, se realiza una hidrogenación para saturar a los ácidos grasos insaturados. Durante este proceso se obtienen grasas *trans* (Gómez-Cortés et al., 2018) que son conocidas por tener efectos perjudiciales para la salud.

Una de las alternativas para las grasas sustituir a las grasas saturadas y trans son los oleogeles, que de acuerdo con Totosa et al. (2016) estos se pueden definir como un líquido orgánico atrapado en una red tridimensional de algún agente

estructurante. Algunos de los agentes estructurantes utilizados para la elaboración de oleogeles comestibles son monoglicéridos, ceras,  $\beta$ -sitosterol,  $\gamma$ -orizanol y etilcelulosa (Alongi et al., 2022).

De acuerdo con (Ferrer-González et al., 2019) los oleogeles estructurados con aceite de soya cuando se sustituyen en rebozados de carne muestran una buena alternativa para mantener una mayor cantidad de ácidos poliinsaturados.

### **Aditivos alimenticios**

Los aditivos alimenticios son sustancias que se agregan con el propósito de conservación o de mejorar la inocuidad (Baena Ruiz & Totija Isasa, 2001). De acuerdo con la CODEX STAND 192-1995, la industria alimenticia debe usar aditivos en cantidades pequeñas y controladas para mantener la calidad del alimento, proporcionar ayuda a la fabricación, envasado, transporte o almacenamiento del alimento.

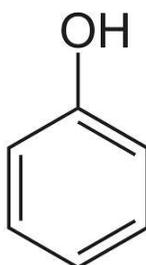
Algunos de los aditivos alimenticios sintéticos de la industria alimenticia y comercialmente más usados son el terbutilhidroquinona (TBHQ), terbutilhidroxianisol (BHA), terbutilhidroxitolueno (BHT). Su uso es extendido a nivel mundial y aceptado por organizaciones como la FDA (*Food and Drug Administration*), USDA (*United States Departamento of Agriculture*), JECFA (*Comité de Expertos en Aditivos Alimenticios*) de la FAO. Sin embargo, debido a su origen sintético, su uso está regulado a nivel mundial en la Norma Internacional de CODEX ALIMENTARIUS (1999) y en México por la NMX-F-808-SCFI-2018 y en ambas se

indica que sus valores no pueden superar el 0.02%. Aunque estas organizaciones autorizan el uso de aditivos sintéticos, su uso y aplicación debe garantizar la inocuidad, además de justificarse su aplicación.

Lo anterior y con la actual preocupación por el consumo de alimentos de con aditivos más “naturales”, se han planteado alternativas como el uso de antioxidantes provenientes de recursos biológicos naturales como las frutas o sus cáscaras, hojas, flores o cualquier material biológico con un contenido significativo de compuestos bioactivos.

### **Compuestos Fenólicos**

Los compuestos fenólicos son una clase de metabolito secundario de las plantas y se encuentran en matrices como frutas y verduras (Albuquerque et al., 2021). Son biosintetizados principalmente en la ruta del ácido siquímico o shikímico y del acetato-malonato (Baena Ruiz & Totija Isasa, 2001; Taiz & Zeiger, 2002). Existen más de 8000 compuestos fenólicos conocidos que abarcan desde moléculas simples como el ácido fenólico hasta compuestos polimerizados como los taninos (Gil Hernández, 2010). Estructuralmente los compuestos fenólicos tienen al menos un anillo aromático con un grupo hidroxilo (ver Figura 4) unido a estructuras aromáticas o alifáticas (Gimeno Creus, 2004). Dentro de la planta se pueden encontrar como glucósidos o agliconas, compuestos libres y en la mayoría de los casos se encuentran en estructuras polimerizadas (Alara et al., 2021).



**Figura 4. Estructura química del grupo fenol (hidroxibenceno)**

Los compuestos fenólicos son los responsables de la pigmentación y astringencia de las plantas (Albuquerque et al., 2021). Algunas otras propiedades organolépticas de los compuestos fenólicos son mostradas en la Tabla 1, las cuales son importantes para la aceptación de los alimentos.

**Tabla 1. Propiedades organolépticas de los CF**

<b>Color</b>	Antocianinas: colores en tonos rojo, azules y violáceos de frutas como hortalizas y sus derivados: ciruela, fresas, uvas, berenjena, col lombarda, rábano, vino etc.
<b>Sabor</b>	Isoflavonas contenidas en los cítricos o oleuropeína en las aceitunas
<b>Astringencia</b>	Proantocianidinas (taninos condensados) y los taninos hidrolizables como los contenidos en el vino
<b>Aroma</b>	Compuestos fenólicos simples como el eugenol de los plátanos

\*Fuente (Gimeno Creus, 2004)

Por otro lado, el interés de la industria farmacéutica, alimenticia y cosmética sobre los compuestos fenólicos es debido a su actividad antioxidante y su consecuente beneficio en la salud humana. Además, su aplicación principal en los alimentos es

la de preservación, gracias a su actividad antimicrobiana, aunado a esto varios trabajos se enfocan en usarlos como alternativas de aditivos alimenticios como BHQ o TBH (Albuquerque et al., 2021), en otros casos se pueden usar como colorantes naturales, como el caso de las antocianinas que proporcionan un color rojo-púrpura. También se dice que disminuyen la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), disminuyen el proceso inflamatorio (Gimeno Creus, 2004). Debido a lo anterior, su consumo tiene efectos preventivos sobre enfermedades como obesidad, cáncer, enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas, además de tener actividad antiinflamatoria (Gil Hernández, 2010). Sin embargo, es importante aclarar que para los fines de este trabajo la principal propiedad que se desea de los compuestos fenólicos es la actividad antioxidante.

### **Tuna roja como fuente de compuestos fenólicos**

El nopal (*Opuntia spp*) es una cactácea característica de nuestro país. Su fruto son las tunas, y existen diversas variedades como la amarilla, blanca, xoconoxtle y roja, entre otras. En la Tabla 2, se muestran los valores de la producción de tuna a nivel nacional en el 2021. Para el interés de este trabajo, se destaca que la producción de tuna roja fue de 94963.92 toneladas correspondiente al 20.55 % de la producción total de este fruto.

**Tabla 2. Producción Nacional de tuna en el 2021 (fuente SIAP, 2021)**

Clase de Tuna	Producción (Tn)	Lugar de cultivo
<b>Alfajayucan</b>	170875.73	Estado de México, Hidalgo, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Guanajuato, Tlaxcala
<b>Amarilla</b>	40645.57	Zacatecas, Jalisco, San Luis Potosí, Tamaulipas, Guanajuato, Oaxaca, Jalisco, Puebla
<b>Blaca burrón</b>	11879.54	Zacatecas, Estado de México, San Luis Potosí
<b>Blanca cristalina</b>	78903.03	Puebla, Zacatecas, San Luis Potosí, Estado de México, Aguascalientes, Hidalgo, Tlaxcala
<b>Criolla</b>	53883.18	Puebla, Veracruz, Michoacán, Durango
<b>Pico chulo</b>	792.49	Estado de México
<b>Roja</b>	94963.92	Zacatecas, Guanajuato, Puebla, <b>Estado de México</b> , San Luis Potosí, Oaxaca
<b>Xoconoxtle</b>	10265.56	Hidalgo, Estado de México
<b>Total</b>	<b>462209.02</b>	

Particularmente, en el Estado de México, se cosecharon 15817.60 hectáreas que corresponden a un valor de producción de 460 117.96 miles de pesos (SIAP, 2022). Sin embargo, existe una amplia presencia de tuna roja silvestre que no es aprovechada comercialmente y que, desde este punto de vista, representa un área potencial de aprovechamiento de ese recurso natural.

De acuerdo con el estudio realizado por Jiménez-Aguilar et al. (2015), la tuna está constituida de un 28-58% de pulpa, 2-10 % semillas y un 37-67% de cáscara. Además, en la misma investigación se recalca que las variedades de tuna en México son una fuente valiosa de antioxidantes. El tipo de bio-compuestos predominantes en las variedades de tuna rojo-púrpura son las betalaínas, compuestos fenólicos y

---

flavonoides (Ramírez-Ramos et al., 2015), además también se ha encontrado que la tuna (*Opuntia ficus-indica*) contiene betacianinas (Peñarrieta et al., 2014).

Con lo anterior, es notorio que la proporción no comestible de la tuna (cáscara) es una parte importante que se convierte en un residuo de tipo orgánico. Y por los volúmenes de desechos de acuerdo con la NOM-116-SEMARNAT-2015 se deben catalogar como de manejo especial mediante: reutilización o reciclado, revalorización y/o recuperación de alguno de sus componentes. Desde este punto de vista, diversas investigaciones se han centrado en aprovechar dicho desecho como fuente de fibra, principalmente.

### **Extracción de Compuestos fenólicos**

La recuperación de biomoléculas con actividad antioxidante de matrices vegetales se realiza mediante técnicas tradicionales, en las que se usan grandes volúmenes de solventes, en procedimientos como la maceración y extracción con Soxhlet (Alara et al., 2018). Por otro lado, se han realizado diversos estudios para evaluar a los solventes que comúnmente son usados en ese tipo de extracciones en los que se ha encontrado que el metanol, etanol y agua, proporcionan los mayores rendimientos (Lefebvre et al., 2021; Sailema Ortiz et al., 2023). Sin embargo, aunque su recuperación es relativamente alta, los métodos no resultan ser tan eficientes debido al alto consumo energético por los largos tiempos de procesado (Ramón & Gil-Garzón, 2021). Otra complicación de la recuperación de biomoléculas

---

para aplicaciones alimenticias es la obtención de un concentrado inocuo y libre de solvente.

La búsqueda de ahorro energético y la disminución de tiempos de procesamiento han incentivado investigaciones relacionadas con “procesos de recuperación verde” o basados en una “economía circular”. Es así como, en las últimas décadas, se han estudiado métodos como el uso de ultrasonido, microondas, fluidos supercríticos, solventes eutécticos profundos para extracción de compuestos fenólicos de matrices vegetales (Alara et al., 2021b).

Para Rojas et al. (2019) la extracción de biomoléculas con ultrasonido es una metodología amigable con el medio ambiente. En esta técnica ofrece procesos rápidos y no modifica las características texturales del producto (Bhargava et al., 2021). Por otro lado, la falta de comprensión genera que esta técnica aún no sea utilizada a nivel industrial con fines extractivos, sin embargo, si se presenta como una alternativa prometedora.

Por otro lado, en las extracciones sólido-líquido, donde los compuestos de interés se encuentran en el medio sólido, necesitan de la operación de mezclado. Esta operación sirve para mantener dispersas a las partículas finas sólidas (Harnby et al., 1992). Además, las partículas finas tienen una tendencia natural a aglomerarse cuando se adicionan a un medio líquido, por lo que es indispensable el mezclado como operación para dispersar a los grumos (Kresisch, 2016). Esto puede provocar

---

que la eficiencia de extracción disminuya, debido a que los aglomerados reducen la superficie de contacto solvente-sólido.

Naturalmente la agitación es una operación unitaria empleada en casi cualquier proceso industrial. Es usado para mejorar la transferencia de masa y calor, o simplemente para mantener en suspensión partículas dentro de un medio fluido. Hasta el momento el tipo de agitadores que se usa para estos procesos de mezclado son las paletas inclinadas o de aspas. Sin embargo, en las últimas décadas, ha comenzado el interés por estudiar mejor los sistemas de agitación con lo cual se han hecho configuraciones de diversos dispositivos con la finalidad de mejorar los procesos de mezclado. Los impulsores de alto corte son dispositivos que se usan a altas velocidades para crear zonas de flujo intenso (Ramírez-Muñoz et al., 2016), con lo que se produce en alto cizallamiento. Aunque la mayor parte de su aplicación está relacionada con la industria de pinturas, sus estudios abordan dispersiones sólido-líquido. Por lo anterior, en este trabajo se propone evaluar la extracción de compuestos fenólicos utilizando un disco Norstone como medio de agitación mecánica y compararla con la extracción con ultrasonido.

# CAPÍTULO III

## MÉTODOS

Esta tesis es dividida en la etapa de homogenización de la cáscara de tuna roja, extracciones por dos técnicas (ultrasonido y el sistema de alto corte con el Disco Norstone), y finalmente por la elaboración de oleogeles con los aceites enriquecidos con los CFT.

### **Etapa 1. Homogenización de la cáscara de tuna**

Debido a que se usó un fruto silvestre; del cual no se tiene ningún tipo de control de cultivo, fue necesario e importante homogenizar todo el producto final, para tenerlo bajo las mismas condiciones fisicoquímicas. En la Figura 5, se muestra la tuna roja silvestre (*Opuntia ficus indica*) recolectada de la zona de Jocotitlán, Estado de México. Dicha recolección se realizó en los meses de mayo a septiembre del año 2022.



**Figura 5. Tuna Roja (*Opuntia ficus-indica*) silvestre**

Una vez recolectado todo el fruto, se lavó con una solución de hipoclorito de sodio al 1% (v/v) durante tres minutos, posteriormente fue enjuagado con agua corriente. El fruto lavado fue despulpado para recuperar la cáscara y ésta posteriormente fue secada a condiciones ambientales durante una semana. Cada lote de cáscara seca fue pulverizada y tamizada en un equipo HUMBOLDT MFG CO con una malla de 60 mesh. Como resultado se obtuvo una harina de tuna roja (HTR) con un tamaño de partícula de 0.25 mm (Figura 6). Cabe mencionar que la HTR fue almacenada en condiciones ambientales en una bolsa de plástico sellada.



**Figura 6. De izquierda a derecha; cáscara: fresca, secada y tamizada**

## Etapa 2. Extracciones

Para evaluar la influencia de los parámetros temperatura (factor B), porcentaje de lecitina de soya (factor C); en el caso del ultrasonido el tiempo (factor A) y para la extracción de alto corte, la velocidad de agitación (factor D) sobre la extracción de compuestos fenólicos totales (CFT), se desarrollaron dos sistemas factoriales con tres factores y dos niveles ( $2^3$ ). En la Tabla 3, se muestra el diseño factorial general codificado, en orden estándar, que se siguió para cada uno de los sistemas de extracción.

**Tabla 3. Diseño experimental codificado  $2^3$  de las extracciones**

Ensayo	Fact. A o D	Fact. B	Fact. C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0

Es de mencionarse que los ensayos se realizaron por duplicado y en un orden aleatorio. Por otro lado, para descodificar los ensayos de cada sistema de extracción (EU o EAC) se debe recurrir a la Tabla 4 y Tabla 5. En dichas tablas, se muestran los niveles de los factores de la extracción con ultrasonido (EU) y con el sistema de agitación de alto corte (EAC), respectivamente.

**Tabla 4. Niveles del sistema factorial de la EU**

Factores	Niveles		
	-1	0	1
A: Tiempo (min)	30	45	60
B: Temperatura (°C)	20	40	60
C: LS* (%)	0	1	2

**Tabla 5. Niveles del sistema factorial de la EAC**

Factores	Niveles		
	-1	0	1
D: Agitación (rpm)	800	1300	1800
B: Temperatura (°C)	20	40	60
C: LS* (%)	0	1	2

### Extracciones de los Compuestos fenólicos totales.

El solvente de extracción utilizado fue de grado alimenticio. Básicamente, es una mezcla de aceite vegetal comestible puro de soja y lecitina de soja (LS). Esta última se usó como un factor del diseño experimental y su adición fue de entre 0-2 % (p/p).

Para preparar el solvente, se mezcló el aceite vegetal de soja y la LS, y se calentó a 80 °C en una parrilla, manteniéndolo en agitación magnética hasta la disolución total de la LS (Figura 7). Posteriormente, fue acondicionado a la temperatura requerida de cada ensayo del diseño experimental.

Inmediatamente después de acondicionar el solvente, se agregó HTR en una relación 4:1 solvente/HTR. Posteriormente, se colocó bajo las condiciones de cada ensayo dependiendo si es ultrasonido o con el sistema de alto corte.



**Figura 7. Elaboración del solvente de extracción**

### **Extracción con ultrasonido**

En el caso del sistema de extracción con ultrasonido, se usaron 100 g totales de mezcla. De los cuales, 80 g fueron solvente y 20 g HTR. El baño ultrasónico (Figura 8) que se utilizó fue de la marca Cole Parmer 8892, con condiciones constantes de frecuencia oscilatoria de 40 kHz y una potencia de 80 W.

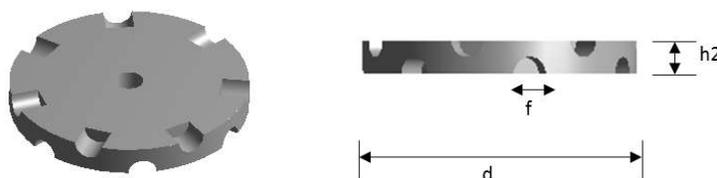


**Figura 8. Baño ultrasónico Cole Parmer 8892**

Cabe destacar que debido a que las soluciones frescas pueden tener disueltos gases, como burbujas de aire, fue necesaria una desgasificación previa al inicio del ensayo. Para dicho acondicionamiento, se trabajó el equipo con la solución extractora durante 5 minutos. Pasado este tiempo, se comenzó la extracción de los compuestos fenólicos bajo las condiciones de ensayo acorde a la Tabla 3. Pasado el tiempo de residencia de la extracción, la solución se dejó reposar durante 24 horas, para poder realizar una separación del aceite enriquecido de la HTR por medio de filtración.

### Extracción con el sistema de alto corte

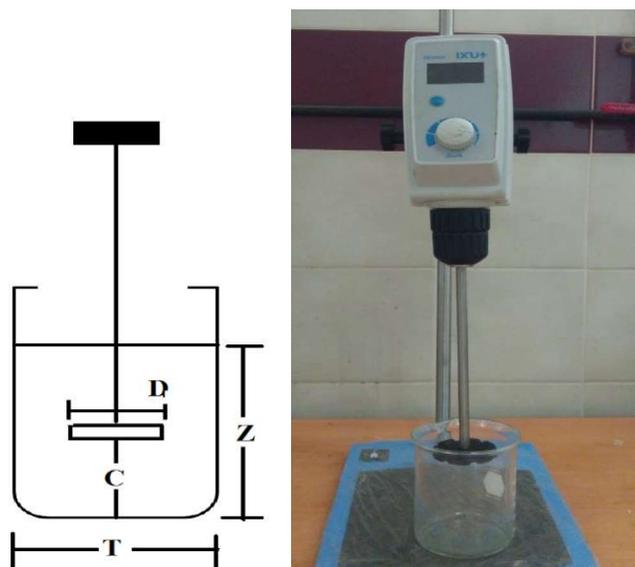
El sistema de agitación fue realizado con el Disco Norstone como impulsor de alto corte (Figura 9). Las dimensiones del disco utilizado fueron: diámetro  $d = 4.9$  cm, altura  $h_2 = 6$  mm y diámetro de surco  $f = 3$  mm.



**Figura 9. Disco Norstone con 7 surcos**

El impulsor fue sujetado con un eje vertical cilíndrico a un motor tipo MIXER UXI mostrado en la Figura 10. En dicho sistema utilizado, el diámetro del tanque agitado fue de  $T = 7.5$  cm. De acuerdo con las recomendaciones de uso del impulsor, la

altura a la que debe ser colocado, debe cumplir la relación  $C/T=0.3048$ . Debido a lo anterior, el Disco Norstone se colocó a 2.88 cm medidos de la base del reactor a la base inferior del disco.



**Figura 10. Geometría del reactor: D=diámetro del impulsor, Z=altura del reactor, T=diámetro del reactor y C=posición del impulsor.**

Una vez montado el sistema de agitación bajo la geometría anteriormente mencionada, se procedió a preparar 200 g de mezcla de extracción (160 g de solvente y 40 de HTR) que se vertió en el reactor. La extracción se dejó en un tiempo de residencia de 45 minutos con control de velocidad. Cabe resaltar que la temperatura de la reacción se controló de forma externa con un baño de agua. Al finalizar la mezcla se dejó reposar por 24 horas para realizar una separación por filtración.

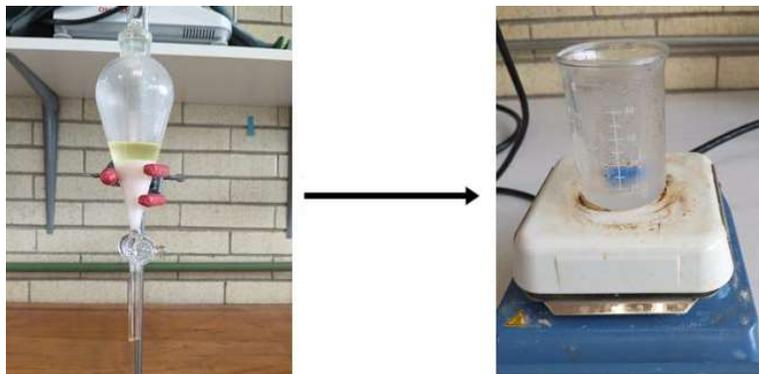
## Cuantificación de los Compuestos fenólicos totales (CFT)

La cuantificación de los compuestos fenólicos extraídos en el solvente se realizó por medio de colorimetría. En la que el generador de color fue una reacción REDOX a pH alcalino; en la que los grupos oxhidrilo o hidroxilo (-OH) de los CFT reducen a los metales  $\text{Mo}^{+6}$  y  $\text{W}^{6+}$  (color amarillo) a  $\text{Mo}^{5+}$  y  $\text{W}^{5+}$  (color azul) del ácido fosmolibdotúngstico (Reactivo de Folin-Ciocalteu). Por lo que a mayor presencia de CFT, mayor será la reducción de los metales Mo y W y por ende la intensidad azul aumenta. Para poder llevar a cabo la reacción REDOX para la cuantificación de los CFT, fue necesaria una etapa previa de recuperación de los CFT del aceite, puesto que este último puede interferir en la reacción generando falsos positivos de cuantificación.

### Extractos de CFT en metanol

Para realizar los extractos metanólicos, se siguió la metodología adaptada de Li et al, (2019). Para ello, se pesó  $5 \pm 0.05$  g de aceite enriquecido y se mezclaron con n-hexano en una proporción 1:1. A dicha mezcla se le realizaron dos lavados con una solución de metanol/agua 6:4 y se separaron mediante decantación (Figura 11). Los extractos metanólicos de ambos lavados se mezclaron y redujeron a 6 ml aproximados con una temperatura máxima de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente. En los casos donde se notó la presencia de residuos aceitosos en el extracto reducido, se enjuagó con 2 ml de n-hexano y nuevamente se separaron por decantación. Los extractos reducidos y fríos se aforaron a 10 ml

y para evitar su degradación, se conservaron en tubos de vidrio tapados a 4 °C hasta su posterior análisis.



**Figura 11. Decantación y reducción de los extractos metanólicos**

### Ensayo de Folin-Ciocalteu

El ensayo fue desarrollado en tubos de ensayo de vidrio de 20 ml, en los cuales se mezcló en el orden mencionado: 1 ml de agua destilada, 1 ml de extracto metanólico, 1 ml del reactivo de Folin-Ciocalteu y 2 ml de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) al 5% (p/v). Dicha mezcla se agitó y se dejó reposar a temperatura ambiente en absoluta obscuridad durante 60 minutos. Posteriormente, se leyó su absorbancia en un espectrofotómetro UV-VIS de doble haz (FAITHFUL, FUV-1800) a 760 nm. Los resultados fueron correlacionados con una curva de catecol.

### Etapa 3. Elaboración de oleogeles



Para la formulación de los oleogeles, se usó el aceite de soya enriquecido con los compuestos fenólicos totales y las ceras de candelilla y soya como agentes estructurantes.

Debido a que la cantidad cera necesaria para la gelación, es muy ambigua, primero se determinó la cantidad necesaria para la gelación bajo las condiciones promedio del aceite usado en este trabajo, es decir, aceite con el 1 % (p/p) de lecitina de soya. Para dicho fin, se hicieron pruebas de gelación con 3, 7 y 14 % (p/p) de cera de candelilla y 20, 25 y 30 % de cera de soya.



**Figura 12. Elaboración de oleogeles**

Para la elaboración de los oleogeles, primero se calentó el aceite a 70°C durante 25 minutos en un horno. Pasado ese tiempo, se colocó en una parrilla con agitación magnética (Figura 12) y se adiciono la cantidad de cera de candelilla o de soya necesaria, manteniendo en agitación y 70 °C, hasta la disolución total de la cera.

Posteriormente, el oleogel se retiró de la parrilla y se dejó reposar a temperatura ambiente para su gelación. Una vez estructurado se procedió a realizar el análisis de firmeza.

### **Análisis de firmeza de los oleogeles**

Para realizar el análisis de textura, se usó el equipo “LFRA Texture Analyzer” de la marca Brookfield (Figura 13), en el cual se determinó la fuerza máxima usada para penetrar a cada oleogel. Para ello, el equipo se programó para que el vástago se moviera en un ciclo a una velocidad de 1 mm/s, y un objetivo de 20 mm de penetración.



**Figura 13. Equipo “LFRA Texture Analyzer” usado en las pruebas de firmeza**

Todos los oleogeles se procesaron bajo las mismas condiciones en vasos de precipitado de 100 ml con una altura del oleogel estructurado de  $5.3 \pm 0.2$  cm y un diámetro de 3.2 cm.

### **Índice de peróxido (IP) de los oleogeles**

Para este análisis, los oleogeles elaborados se almacenaron en bolsas de plástico a condiciones ambientales. Y la prueba se realizó a los 30 y 60 días de almacenamiento.

Para determinar el índice de peróxido como evaluación del estado de oxidación de los oleogeles, se usó el método oficial AOCS-Cd-8-53, y se obtuvieron los resultados en unidades de miliequivalentes de oxígeno activo por cada kilo de oleogel.

Para ello, se pesaron 5 g de cada oleogel, y se adicionó 30 ml de una solución de ácido acético/cloroformo 3:2. La mezcla se agitó, con ayuda de un vórtex, hasta la disolución total de la grasa. Posteriormente se adicionó 0.5 ml de una solución fresca de KI saturada, dejando reposar durante exactamente un minuto con agitación eventual. Esta solución se tituló con una solución de Tiosulfato de sodio al 0.1 N. Después del viré (desaparición del color amarillo) se agregó 2 ml de almidón de papa y se continuó la titulación hasta el nuevo viré (desaparición del color azul).

Cabe destacar que las soluciones de Tiosulfato de sodio 0.1 N y la solución de almidón de papa fueron conservadas en frascos ámbar a 4 °C por un tiempo máximo de una semana.

# CAPÍTULO IV

---

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Control analítico del proceso cuantitativo

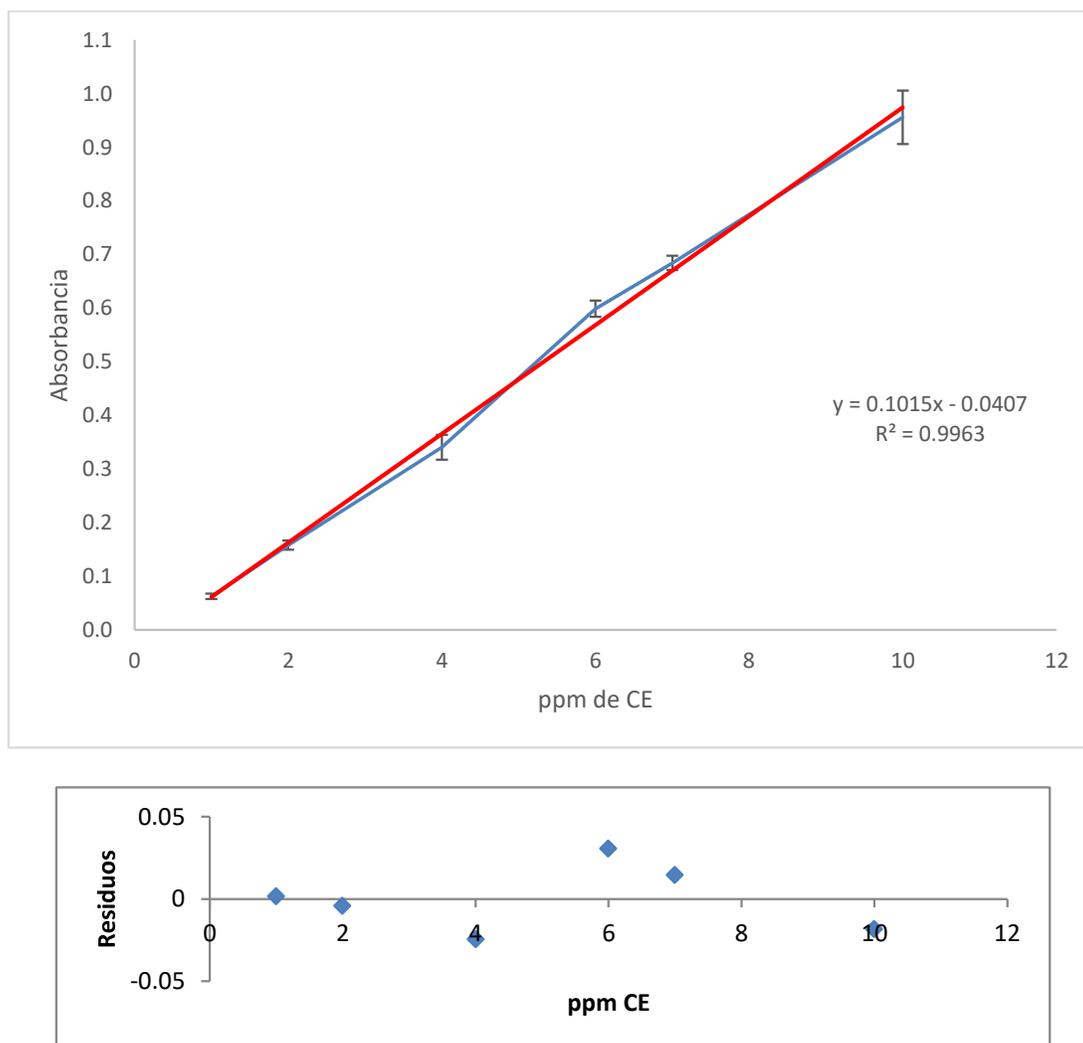
Todo campo de la investigación debe garantizar la calidad de los resultados que se obtengan en dicho estudio. Es decir, que al expresar las mediciones de la magnitud física de interés (en este caso la concentración de CFT) estamos obligados a dar una indicación cuantitativa de la calidad del resultado, esto es evaluar y expresar la incertidumbre en la medición. Por dicha razón, en esta tesis se realiza un control analítico del proceso cuantitativo de los CFT. Para lo anterior, se toman fragmentos del documento CCAYAC-P-058. En la que de acuerdo con el criterio 6, se evalúa lo siguiente:

- Intervalo lineal de la curva de calibración
- Recobro del analito en la corrida de muestras (Parámetro de exactitud)
- Desviación cada medida de las muestras analizadas (Parámetro de precisión)
- Expresión de la incertidumbre en la medición (De acuerdo con la GUM)

#### Intervalo lineal

El tipo de curva de trabajo que se usó en esta tesis es de “calibración sencilla” en la que se preparó una serie de seis patrones y se cuantificó su absorbancia en un equipo UV-VIS. De acuerdo con la Ley de Lambert-Beer, la relación entre la

concentración del analito y la absorbancia medida es lineal. La curva de calibración que se obtuvo es mostrada en la Figura 14, en donde “y” corresponde a la absorbancia y “x” a la concentración de catecol equivalente en partes por millón ( $\frac{mg}{L}$ ). Cada punto de la curva se corrió por triplicado para evaluar la desviación estándar de cada punto.



**Figura 14. Curva de calibración de catecol y su gráfico de residuos**

Además, en la Figura 14, también se muestra el gráfico de residuales, en el que podemos observar que los datos no presentan tendencias marcadas, con lo que se puede afirmar que los residuos se encuentran espaciados de manera aleatoria y por lo tanto el ajuste lineal es adecuado.

Los resultados del análisis de regresión lineal con la herramienta de análisis de datos de Excel, de la curva son mostrados en Tabla 6. En la que podemos notar que la ecuación de la curva de calibración es  $Y = 0.1015 X - 0.0407$ . El coeficiente de correlación cuadrático  $R^2$  es superior a 0.99, por lo que la curva es considerada como una buena relación lineal.

**Tabla 6. Estadísticas de regresión de la curva de catecol**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<b>Coeficiente de correlación múltiple</b>	0.998170784
<b>Coeficiente de determinación <math>R^2</math></b>	0.996344914
<b>Incertidumbre</b>	0.023001096
<b>Observaciones</b>	6
<i>Coefficientes de la ecuación</i>	
<b>Intercepción "b"</b>	-0.040748016
<b>pendiente "m"</b>	0.101494048

Por otro lado, la incertidumbre de cada medición fue calculada de acuerdo con la expresión, de la guía INC-1 (1980) de la CIPM (comité internacional de pesas y medidas), mostrada en la ecuación siguiente. En la que lo que se trata es de hacer una corrección de la concentración calculada con la ecuación de la recta obtenida.

$$S_{x_i} = \frac{S_{y/x}}{m} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y_i - \bar{y})^2}{m^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

En donde:  $S_{y/x}$  es el error típico expresado en términos de desviación estándar,  $m$  la pendiente de la recta,  $n$  el número de estándares de la curva,  $y_i$  el valor de la absorbancia de cada muestra,  $\bar{y}$  el promedio de todas las absorbancias medidas,  $x_i$  es la concentración de cada estándar y  $\bar{x}$  es el promedio de la concentración de los estándares.

Los resultados de incertidumbre de cada medida son mostrados directamente en las tablas de resultados (Tabla 7)

### **Recobro y desviación del analito (Exactitud y precisión)**

El recobro del analito de interés corresponde a la cantidad de analito recuperado de una muestra contaminada (intencionalmente con una concentración conocida del patrón estándar), por medio del método analítico de cuantificación. Para determinarlo se usa la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{C_e - C_s}{C_a} * 100$$

En donde,  $R$  es el recobro,  $C_e$ ,  $C_s$  y  $C_a$  corresponde a la concentración de la muestra fortificada, muestra sin fortificar y la adicionada a la muestra, respectivamente.

Es así como, para evaluar la exactitud de cada lote de muestras se cuantificó la muestra fortificada por duplicado y se determinó el recobro, el cual oscilo entre 85 y

112 %, con una desviación estándar entre el 0.4 y 1.4, que de acuerdo con la guía del CCAYAC-P-058 son resultados adecuados para este tipo de estimaciones.

## Resultados de las extracciones de CFT

En la Tabla 7, se muestran los resultados promediados de cada corrida de las extracciones, tanto como del uso del ultrasonido, como del sistema de alto corte con el disco Norstone. En la que podemos notar que, en ambos casos, la mayor extracción se obtuvo con los parámetros en sus niveles más altos, es decir: tiempo de 60 minutos, temperatura 60 °C y un 2 % de lecitina de soya en el aceite. Por el contrario, la menor extracción fue con el ensayo 5 (-1, -1, +1) de tiempo 30 minutos, 20 °C y un 2 % de lecitina de soya. En el caso del sistema del alto corte, el menor rendimiento se obtuvo bajo las condiciones del ensayo 7 (-1, 1, 1) de 800 rpm, 20°C y 0 % LS.

**Tabla 7. Resultados de la extracción con ultrasonido y sistema de alto corte**

Ensayo	Factor A o D	Factor B	Factor C	Ultrasonido	Alto corte
				mg CE/g	mg CE/g
1	-1	-1	-1	7.2257	16.5738
2	1	-1	-1	10.0748	10.6795
3	-1	1	-1	16.9375	13.1725
4	1	1	-1	10.3697	13.7867
5	-1	-1	1	7.1207	11.0191
6	1	-1	1	13.7325	13.7107
7	-1	1	1	11.053	10.5903
8	1	1	1	19.0916	19.9423
9	0	0	0	13.6659	16.1469
10	0	0	0	15.2229	14.2643

En la Tabla 8, se muestran los vales de p, obtenidos del análisis de varianza de los resultados de la extracción con ultrasonido. Dicho análisis sugiere que la interacción temperatura-lecitina de soya no tiene influencia sobre la extracción, el resto de los parámetros e interacciones si son significantes.

**Tabla 8. Resumen del ANOVA extracción con ultrasonido**

FUENTE	p-value	
A-Tiempo	0.0001	significativo
B-Temperatura	< 0.0001	significativo
C-Lecitina Soya	0.0052	significativo
AB	0.0013	significativo
AC	< 0.0001	significativo
BC	0.6917	
ABC	0.0002	significativo

La Tabla 9, muestra los resultados del valor de p del análisis de varianza de la extracción con el sistema de alto corte. En el que infiere que los parámetros temperatura B, lecitina de soya C y la interacción ABC no son significantes sobre la extracción. Y en el caso de la agitación D y las interacciones AB, AC y BC si generan influencia significativa sobre la extracción.

**Tabla 9. Resumen del ANOVA extracción de alto corte**

FUENTE	p-value*	
A-Agitacion	0.0053	significativo
B-Temperatura	0.0156	
C-Lecitina Soya	0.5847	
AB	< 0.0001	significativo
AC	< 0.0001	significativo
BC	0.0094	significativo
ABC	0.9365	

## Modelo matemático de las Extracciones

Los resultados de la cuantificación de compuestos fenólicos de cada método se ajustaron a un modelo matemático (Ecuación 1) por medio de una regresión lineal múltiple. En donde  $Y_{ABC}$  es la cantidad de compuestos fenólicos totales extraídos con el ultrasonido o con el sistema de alto corte, y los coeficientes  $\beta_0$ ,  $\beta_A$ ,  $\beta_B$  y  $\beta_C$  corresponden a los coeficientes de regresión de cada factor. Dichos valores tienen que ver la influencia de su respectivo factor sobre la extracción de CFT.

$$Y_{ABC} = \beta_0 \pm \beta_A A \pm \beta_B B \pm \beta_C C \pm \beta_{AB} AB \pm \beta_{AC} AC \pm \beta_{BC} BC \quad (1)$$

El modelo resultante es mostrado en la ecuación. De acuerdo con el ANOVA, se puede omitir el término BC, el cual se sugiere no tiene influencia sobre la extracción.

$$Y_{ABC} = 11.95 + 1.37A + 2.41B + 0.7988C - 0.99AB + 2.3AC + 1.36ABC \quad (2)$$

Por otro lado, es de notar que en orden ascendente de influencia de cada parámetro es la temperatura B, la interacción AC, el tiempo de residencia A, la interacción ABC y AB y finalmente el porcentaje de lecitina de soya C.

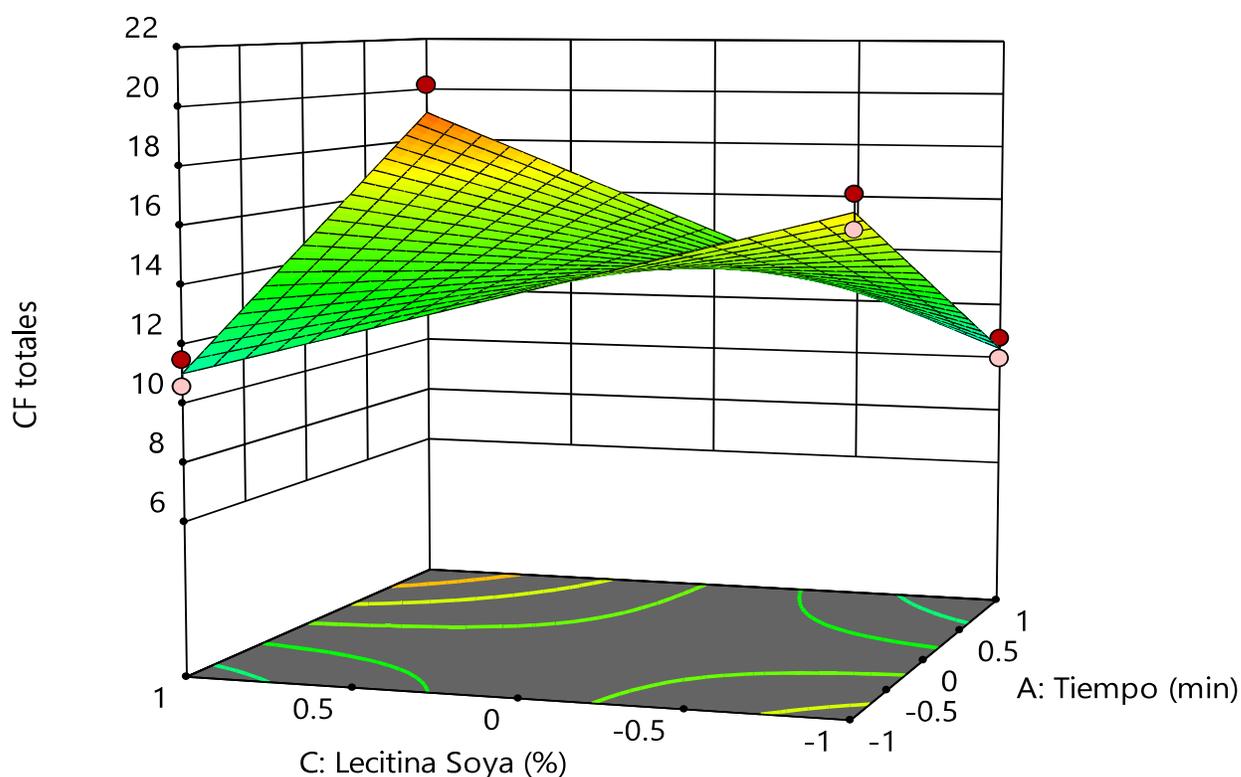
Para el caso del modelo matemático de la extracción con el sistema de agitación de alto corte, también fue ajustado a la ecuación 1 y es mostrada en la ecuación 3. En la que se omite el término correspondiente a la interacción ABC debido a que el ANOVA sugiere que no tiene una influencia significativa sobre la extracción. Por otro lado, a pesar de que los términos B y C no mostraron significancia en el ANOVA, no pueden ser omitidos debido a que son efectos principales del diseño experimental.

$$Y_{DBC} = 13.6843 + 0.8454D + 0.688B + 0.131C + 1.64 DB + 2.165DC + 0.762 BC$$

De este modelo matemático podemos decir que el orden descendente de influencia sobre la extracción es interacción AC, DB, factor D, interacción BC y factor B y C.

### Superficies de respuesta (Extracción con ultrasonido)

Las superficies de respuesta se obtuvieron a partir del modelo matemático de la ecuación 2. Debido a que la temperatura, es el parámetro que más influencia tiene sobre la extracción, se elige su punto más alto (+1B = 60°C) para presentar la superficie de respuesta



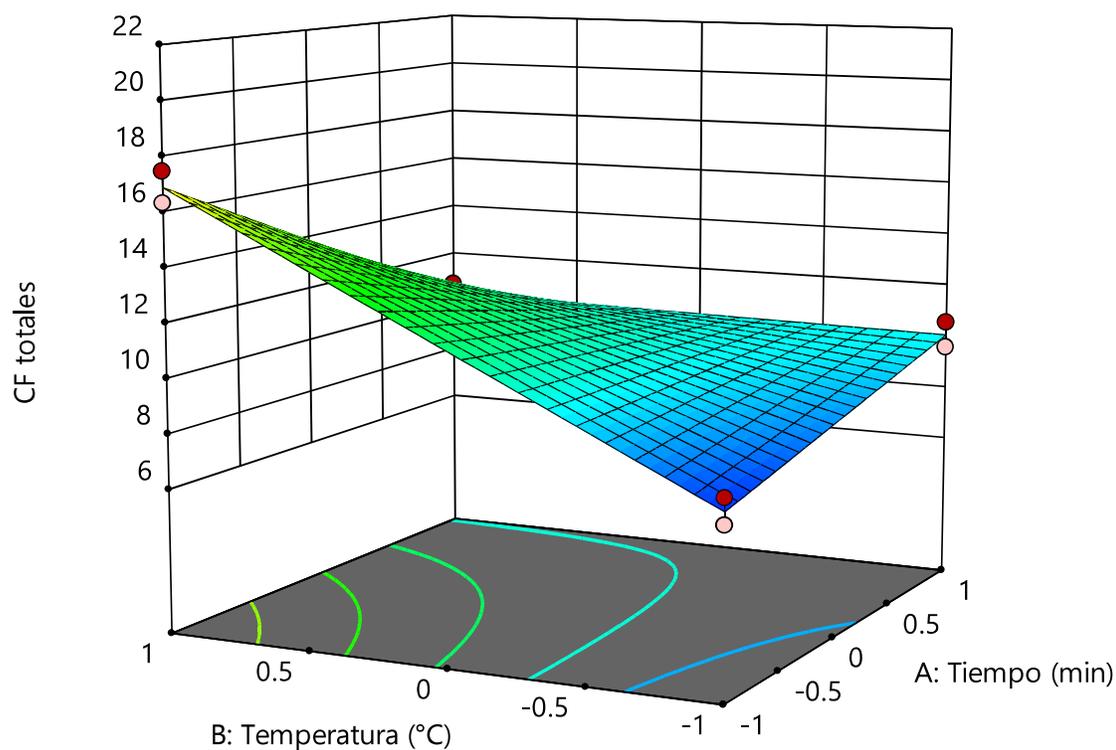
**Figura 15. Superficie de respuesta AC con B en el nivel +1 (ultrasonido)**

En la Figura 15, se muestra el gráfico, en el que podemos notar que la mayor extracción de compuestos fenólicos fue de 19.09 mg CE. Obtenidos con los factores en sus niveles más altos (+1A, +1C). Posiblemente debido a que, en el mayor tiempo de residencia de la extracción, se provocó más daño en la cáscara, permitiendo que el solvente se difundiese en los poros de la cáscara arrastrando más cantidad de CFT. Sumado a eso, también se permitió más tiempo de contacto íntimo entre cáscara-solvente.

Por otro lado, centrando la atención en el punto +1 A y -1 C (60 minutos y 0% lecitina de soya) de mismo gráfico, se logra una extracción de 10.36 mg CE. Podemos notar que, aunque el tiempo de residencia fue el máximo y por ende debería extraer más CFT, por las elucidaciones del párrafo anterior. pero a causa de la ausencia de lecitina de soya no se tienen buenos resultados de extracción. Lo que puede ser debido a que: de manera estructural, los compuestos fenólicos tienen un gran número de grupos OH que les confiere un carácter polar, lo que provoca una baja solubilidad en solventes apolares como el aceite de soya puro.

Por otro lado, analizando la superficie de respuesta mostrada la Figura 16, en la que se grafica el tiempo y la temperatura respecto de la extracción de CFT manteniendo constante a C en su nivel inferior ( -1C = 0%LS). Se puede notar que en el punto -1A, +1B (30 minutos y 60 °C) se extraen 16.93 mg CE. Este resultado contrasta con que a mayor tiempo y porcentaje de LS aumenta la extracción. Retomando, el

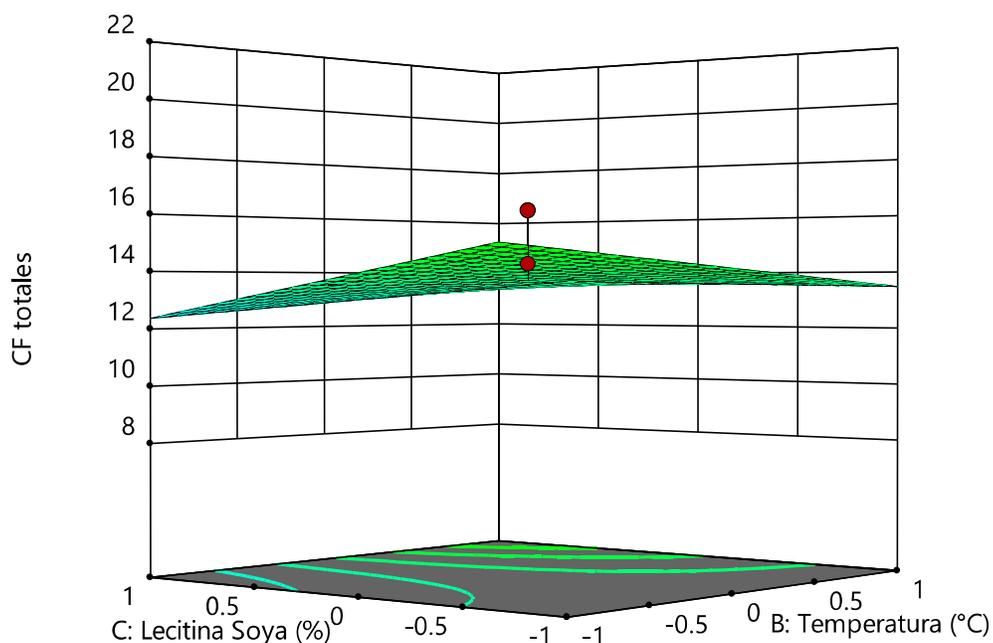
modelo matemático esta interacción, notamos que AB provoca un afecto negativo sobre la respuesta, sin embargo, el efecto positivo de la temperatura es mayor y debido a lo anterior es por ello por lo que se observa que a las condiciones de 25 minutos, 60 °C y 0 %LS proporciona una extracción relativamente alta. Además, este gráfico confirma que las condiciones que proporcionan una menor cantidad de CFT extraídos es con las condiciones más bajas de todas las variables, es decir, 25 minutos, 20 °C y 0% LS.



**Figura 16. Superficie de respuesta AB con C en el nivel -1 (Ultrasonido)**

## Superficies de respuesta de la extracción con Sistema de Alto corte

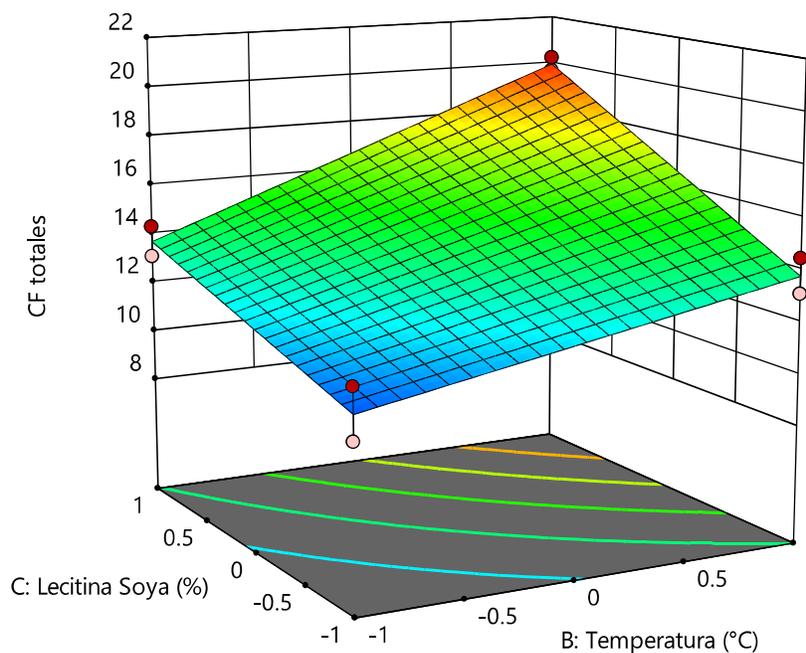
En la Figura 17, se muestra la superficie de respuesta BC con el factor de agitación en su nivel central (1300 rpm). En donde podemos notar que se obtiene una superficie casi plana; afirmando que a esas condiciones de agitación no se tiene influencia significativa de la temperatura y la lecitina de soya. Lo que concuerda con el ANOVA. Cabe destacar que la cantidad de CFT extraídos a 1300 rpm oscila entre 12 y 15 mg CE.



**Figura 17. Superficie de respuesta BC con A en el nivel 0 (Alto corte)**

Por otro lado, en la Figura 18, se muestra la superficie de respuesta BC con A en el nivel superior (1800 rpm). Podemos notar que existe una tendencia de extracción

creciente a mayor temperatura y cantidad de lecitina de soya. Siendo así que la mayor extracción se obtuvo con todos los factores en su nivel superior (1800 rpm, 60 °C y 2% LS) con un valor de 19.94 mg CE.



**Figura 18. Superficie de respuesta AB con A en su nivel +1 (Alto corte)**

## Oleogeles

De acuerdo con las pruebas de gelación se determinó que las concentraciones adecuadas para lograr una firmeza visual de los oleogeles fue de 7% (p/p) cera de candelilla y 25 % (p/p) de cera de soya. Por lo que estas concentraciones fueron usadas para realizar los oleogeles con los aceites enriquecidos de los compuestos fenólicos totales.

En la Figura 19, se muestran algunos de los oleogeles obtenidos durante todo el desarrollo experimental. Y debido a que se realizaron dos oleogeles por corrida experimental, se obtuvieron en total dieciocho oleogeles. A los que se les realizó un análisis de firmeza, resultados que son mostrados en la



**Figura 19. Oleogeles estructurados**

En la Tabla 10, se muestran los resultados promedio de la firmeza de cada oleogel, tanto para los que se elaboraron con el aceite enriquecido proveniente de la extracción con ultrasonido como la de alto corte. En dicha tabla, claramente es notorio que los oleogeles de cera de candelilla presentaron una firmeza más alta que los de cera de soya. Esto posiblemente debido a que la cera de candelilla es

una cera de alto punto de fusión, al contrario de la cera de soya que es de bajo punto de fusión.

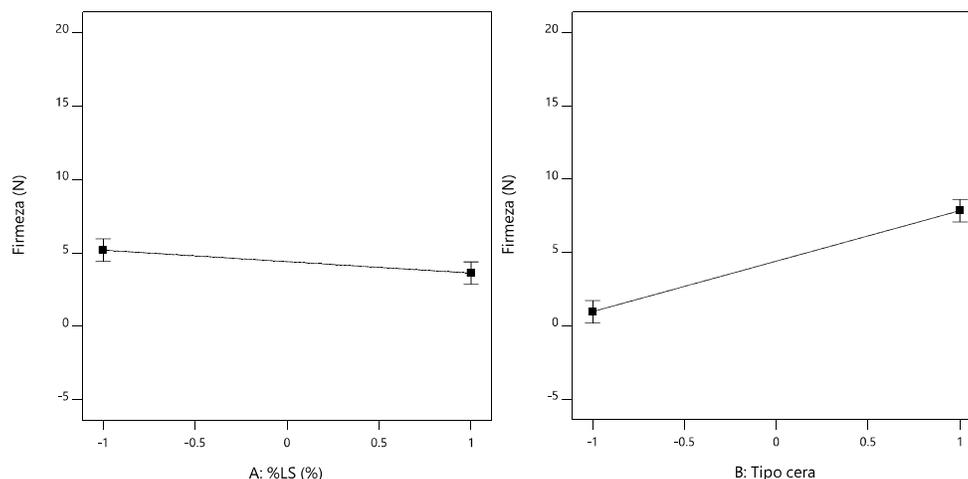
En el caso del oleogel de cera de soya del ensayo 5 de la extracción con alto corte, se le colocó una firmeza de cero, debido a que su consistencia visual fue semilíquida y el equipo no pudo realizar la prueba. Dicho fenómeno se pudo haber ocasionado debido a que la prueba se desarrolló en un día caluroso. Por lo que se puede afirmar que la temperatura del ambiente en la que se encuentren los oleogeles, influye en su consistencia.

**Tabla 10. Resultados de firmeza de los oleogeles**

Ensayo	Factor A o D	Factor B	Factor C	Ultrasonido		Alto corte	
				Firmeza (N)		Firmeza (N)	
				C. Candelilla	C. Soya	C. Candelilla	C. Soya
1	-1	-1	-1	6.8	5.75	12.2	2.05
2	1	-1	-1	10.05	4.85	7.85	1.1
3	-1	1	-1	5.75	3.6	8.75	0.6
4	1	1	-1	4.8	2.95	8.1	0.8
5	-1	-1	1	9.55	2.4	7.35	0
6	1	-1	1	5.75	2.55	9.35	1.2
7	-1	1	1	3.3	1.8	7.35	1.35
8	1	1	1	4.45	0.95	1.8	0.55
9	0	0	0	5.1	5	5.1	3.5
10	0	0	0	7.3	0.5	7.3	3.9

Por otro lado, realizando un análisis de varianza (ANOVA) de la firmeza de los oleogeles, tomando como factores el tipo de cera de candelilla y el porcentaje de lecitina de soya presente en el oleogel formado. Se obtiene que, el tipo de cera es el factor que más influye sobre la firmeza del oleogel, seguido de la cantidad de

lecitina de soya. En la Figura 20, se muestran los gráficos de efectos, en la que se puede observar que, en el caso de la lecitina de soya, a medida que aumenta su contenido, se produce un efecto negativo, es decir, que la firmeza disminuye.



**Figura 20. Gráficos de efecto del %LS y tipo de cera sobre la firmeza del oleogel**

Por otro lado, podemos notar que, en el caso de la cera de soya, se produce un efecto positivo al cambiar la cera de soya por la de candelilla.

### Índice de peróxido de los oleogeles

El índice de peróxido (IP) es usado a nivel laboratorio-industrial, para evaluar la calidad del aceite o grasa. Con este parámetro, se evalúa el estado de oxidación primario o inicial de un aceite y su posibilidad a oxidarse mientras está en almacenamiento. De acuerdo con la NMX-F-154-SCFI-2010, este valor no debe superar 70 meq/O<sub>2</sub> activo por cada kilogramo de grasa. Si el IP supera dicho valor, el aceite o grasa es altamente propenso a sufrir oxidación y a enranciarse.

En la Tabla 11, se muestran los resultados del valor de peróxido o índice de peróxido. En la que podemos notar que los IP son mayores en los oleogel elaborados con el aceite enriquecido de CFT provenientes de ultrasonido. Lo que indica una mayor cantidad de peróxidos presentes.

**Tabla 11. Resultados de Índice de peróxido (IP)**

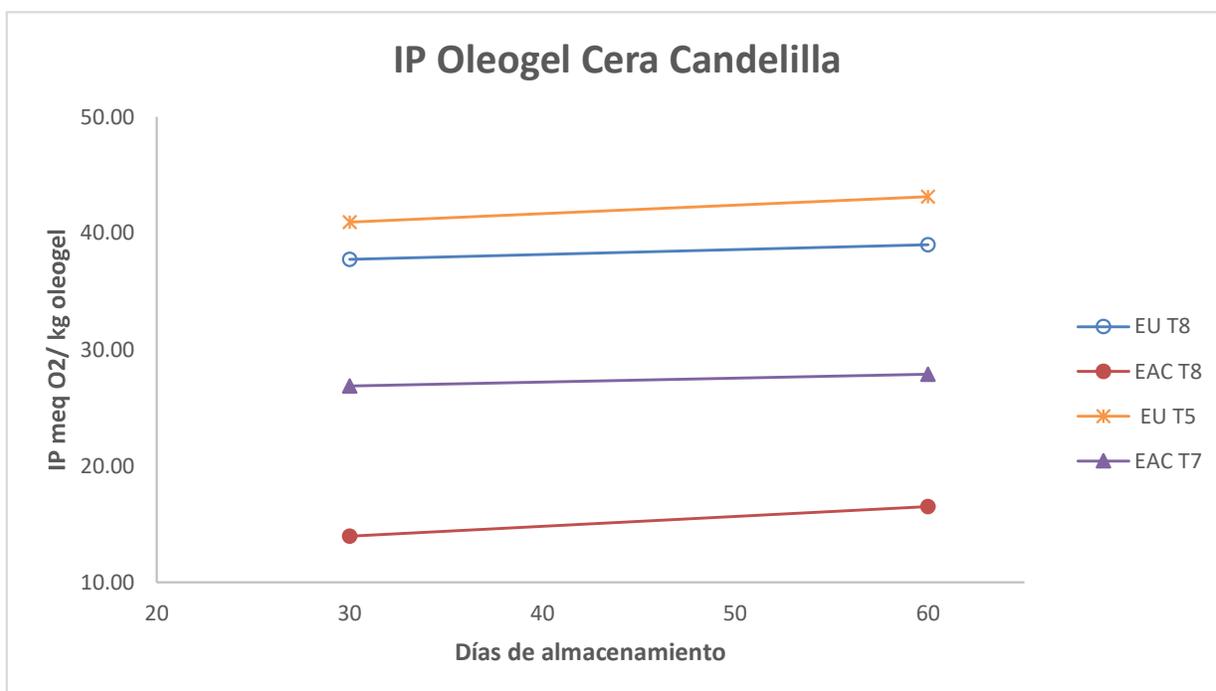
ENSAYO	Oleogel C.C* IP meq O <sub>2</sub> /kg				Oleogel C.S* IP meq O <sub>2</sub> /kg			
	Ultrasonido		Alto corte		Ultrasonido		Alto corte	
	30 días	60 días	30 días	60 días	30 días	60 días	30 días	60 días
1 <sub>A,B,C</sub>	48.50	48.85	12.09	13.24	28.59	30.28	31.95	35.07
2 <sub>A,B,C</sub>	24.11	23.90	37.47	41.93	30.85	29.80	11.52	16.01
3 <sub>A,B,C</sub>	11.78	11.89	24.33	27.95	37.89	37.95	16.39	20.15
4 <sub>A,B,C</sub>	35.98	37.83	24.09	27.95	35.11	34.37	20.27	25.35
5 <sub>A,B,C</sub>	40.94	43.13	29.96	31.97	24.27	23.38	18.28	21.61
6 <sub>A,B,C</sub>	24.13	26.98	28.40	33.75	32.63	30.81	19.14	23.92
7 <sub>A,B,C</sub>	39.88	37.75	26.87	27.87	26.65	26.78	18.17	20.75
8 <sub>A,B,C</sub>	37.75	39.01	13.98	16.50	25.81	26.25	12.30	14.24
9 <sub>A,B,C</sub>	25.88	28.97	29.94	34.10	17.87	21.04	17.96	19.85
10 <sub>A,B,C</sub>	31.92	33.98	25.95	27.89	18.73	19.01	17.96	20.51

Los valores de A, B y C corresponden a los valores de las condiciones de ensayo para la extracción de CFT

\*C.C.= cera candelilla y C.S.= cera de soya

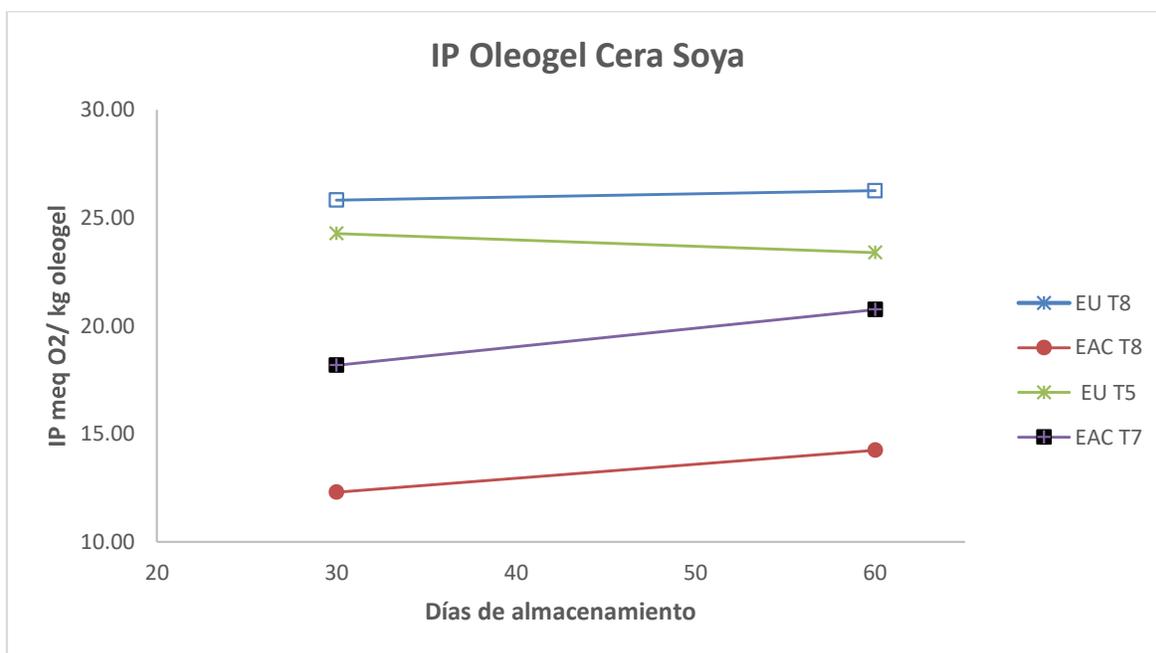
Por otro lado, de acuerdo con los resultados de la extracción de CFT, en el ensayo 8 de ambos tratamientos se debería obtener el IP más bajo, debido a que existe una mayor cantidad de CFT. Sin embargo, el caso del oleogel de cera de candelilla elaborado con el aceite del ensayo 8 con el ultrasonido eso no ocurre, pues su valor de IP es de 39.01 a los 60 días, que es un valor más alto comparado con el ensayo 3 que fue de 11.78 meq O<sub>2</sub>/Kg, en donde se obtuvo una menor cantidad de CFT.

En la Figura 21, se muestra el gráfico en el que se comparan los oleogel de cera de candelilla, elaborados con el aceite proveniente de los ensayos 8 (mayor CFT extraídos) y el ensayo 7 para el caso del alto corte y 5 para el ultrasonido (menor CFT extraídos). En donde se puede observar que el mayor IP se obtuvo con los oleogel provenientes del aceite con ultrasonido. Sin embargo, muestran una pendiente cercana a cero lo que sugiere estabilidad en la formación de peróxidos. Por otro lado, en el caso de los oleogel elaborados con el aceite de la EAC, es notoria una diferencia entre el IP obtenido con la mayor y menor cantidad de CFT presentes en el oleogel.



**Figura 21. IP oleogel C. Candelilla**

En el caso de la Figura 22, se muestran los resultados más destacados de índice de peróxido de los oleogel de cera de soya (donde hay mayor y menor presencia de CFT). Podemos destacar que, aunque el IP obtenido en los oleogel estructurados con el aceite de la EAC, es menor que los provenientes del ultrasonido, su pendiente es mayor; lo que indica una pequeña formación de peróxidos en el tiempo, que son correlativos con una oxidación de los oleogel. Sin embargo, la formación de peróxidos una vez iniciada la cadena de oxidación es abrupta, es decir para poder afirmar que se ha iniciado la oxidación, sería necesario tener cambios drásticos del IP. Por lo que podemos decir que, aunque exista una pequeña formación de peróxidos, no son notorios los cambios significativos, por lo que se puede tener la elucidación de una estabilidad.



**Figura 22. IP Oleogel de C. Soya**

---

## CONCLUSIONES

El uso de impulsores de alto corte como el disco Norstone, pueden ser usados para extraer biomoléculas, como los Compuestos fenólicos totales. Pues se obtienen resultados de extracción comparables e incluso mejores que la extracción con ultrasonido bajo las mismas condiciones de temperatura y lecitina de soya

Los procesos de extracción son mejores a temperatura de 60°C, posiblemente debido a que aumenta el movimiento Browniano de las moléculas, provocando que la solución se expanda disminuyendo su densidad y viscosidad; lo que, en el caso del sistema de alto corte, al impulsor le genera mayor facilidad para la intensificación del proceso de mezclado de la cáscara-solvente, favoreciendo el íntimo contacto entre estas fases y evitando la saturación del solvente en zonas cercanas a la superficie de la matriz que contiene los CFT.

El uso de la lecitina de soya, de acuerdo con los resultados del diseño experimental, en el caso del uso del sistema de alto corte, de manera general no tiene una influencia significativa, esto posiblemente debido a que las altas zonas de turbulencia (1800 rpm) no permiten la formación de las micelas que modifiquen las condiciones de solubilidad de los CFT en el aceite. Por el contrario, en la extracción con ultrasonido, su presencia es significativa, posiblemente debido a que la modificación de la polaridad de la molécula de solvente genera un movimiento que

apoya a la difusión molecular del CFT, por lo que combinado con un mayor tiempo de residencia genera mejores resultados de extracción.

---

## RECOMENDACIONES

El alcance de este trabajo está enfocado a la extracción de compuestos polifenólicos con actividad antioxidante, provenientes de la cáscara de tuna roja. La extracción que es llevada a cabo para fines de fabricación de alimentos funcionales. Por lo cual se proponen las siguientes mejoras a prospectiva:

- Un estudio cinético de las extracciones tanto con ultrasonido, como con el sistema de alto corte para encontrar los parámetros cinéticos determinantes de la extracción.
- Realizar un análisis de reología de la mezcla cáscara-solvente para evaluar el desempeño del impulsor y optimizar la extracción desde es punto de vista de la mezcla de extracción.
- Realizar análisis con microscopía óptica o electrónica de barrido para visualizar la morfología de la cáscara antes y después de los procesos extractivos. Con la finalidad de encontrar cual método genera una mayor superficie de contacto de la cáscara con el solvente de extracción.
- Un estudio de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) para obtener una elucidación clara de las moléculas que se están extrayendo. Caracterizando el o los compuestos fenólicos principales en la tuna. Y con ello asegurar la inocuidad alimenticia.

- Realizar un análisis de Química Computacional para esclarecer la forma en la que se comportan las moléculas de lecitina de soya en la red tridimensional del oleogel formado y así predecir el comportamiento macro del oleogel. Y formularlo bajo condiciones controladas de cristalización.

63

---

## REFERENCIAS

- Aires, D., Capdevila, N., & Segundo, M. J. (2005). Ácidos grasos esenciales. *Ámbito Farmacéutico*, 24(4), 96–102.
- Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2018). Soxhlet extraction of phenolic compounds from *Vernonia cinerea* leaves and its antioxidant activity. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 11, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.07.003>
- Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2021a). Extraction of phenolic compounds: A review. In *Current Research in Food Science* (Vol. 4, pp. 200–214). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.011>
- Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2021b). Extraction of phenolic compounds: A review. In *Current Research in Food Science* (Vol. 4, pp. 200–214). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.011>
- Albuquerque, B. R., Heleno, S. A. S., Oliveira, M. B. P. P., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2021). Phenolic compounds: Current industrial applications, limitations and future challenges. In *Food and Function* (Vol. 12, Issue 1, pp. 14–29). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d0fo02324h>

- Alongi, M., Lucci, P., Clodoveo, M. L., Schena, F. P., & Calligaris, S. (2022). Oleogelation of extra virgin olive oil by different oleogelators affects the physical properties and the stability of bioactive compounds. *Food Chemistry*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130779>
- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos* (E. Quintanar Duarte, Ed.; 4th ed.). [www.pearsoneducacion.net](http://www.pearsoneducacion.net)
- Baena Ruiz, R., & Totija Isasa, E. (2001). Riesgos y beneficios de los aditivos alimentarios. *Ámbito Farmacéutico Nutrición*, 20(1), 104–115.
- Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., & Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. In *Ultrasonics Sonochemistry* (Vol. 70). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>
- Cabezas-Zábala, C. C., Hernández-Torres, B. C., & Vargas-Zárate, M. (2016). Fat and oils: Effects on health and global regulation. *Revista Facultad de Medicina*, 64(4), 761–768. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v64n4.53684>
- CODEX ALIMENTARIUS. (1999). *CODEX STAND -192-1995: Norma General para los Aditivos Alimentarios*.
- Duarte V., J., Ramírez Z. Germán, & Castañeda S., R. (2016). Grasa sobrepasante: Aplicaciones y su proceso de obtención para la

---

alimentación de rumiantes en el trópico. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 8(2), 228–242.

<https://doi.org/https://doi.org/10.24188/recia.v8.n2.2016.192>

Espinosa Manfugás, J. (2020). *Evaluación Sensorial de los Alimentos* (Editorial Universitaria, Ed.).

FAO. (2008). *Nutrientes esenciales: Lípidos*.

<https://www.fao.org/3/ab492s/AB492S02.htm#ch3>.

Farrán-Codina., A. (2020). Las grasas en la alimentación. *Pediatría Integral*, 24(3), 175.

Ferrer-González, B. M., García-Martínez, I., & Totosaus, A. (2019). View of Textural properties, sensory acceptance and fatty acid profile of cooked meat batters employing pumpkin seed paste or soybean oil oleogel as fat replacers. *Grasas y Aceites*, 70(3), 1–11.

<https://doi.org/https://doi.org/10.3989/gya.1055182>

Gil Hernández, Á. (2010). Composición y Calidad Nutritiva de los Alimentos. In Editorial Médica Panamericana (Ed.), *Tratado de Nutrición: Vol. II* (2nd ed.).

Gimeno Creus, E. (2004). Compuestos fenólicos: un análisis de sus beneficios para la salud. *Ámbito Farmacéutico Nutrición*, 23, 80–84.

- Gómez-Cortés, P., de la Fuente, M. Á., & Juárez, M. (2018). Ácidos grasos trans y ácido linoleico conjugado en alimentos: origen y propiedades biológicas. *Nutrición Hospitalaria*, 36(2), 479–486.  
<https://doi.org/10.20960/nh.2466>
- Harnby, N., Edwards, M. F., & Nienow, A. W. (1992). *Mixing in the process industries* (Second Edition). Butterworth Heinemann.
- Islam, M. A., Amin, M. N., Siddiqui, S. A., Hossain, M. P., Sultana, F., & Kabir, M. R. (2019). Trans fatty acids and lipid profile: A serious risk factor to cardiovascular disease, cancer and diabetes. *Diabetes and Metabolic Syndrome: Clinical Research and Reviews*, 13(2), 1643–1647.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsx.2019.03.033>
- Jiménez-Aguilar, D. M., López-Martínez, J. M., Hernández-Brenes, C., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Welti-Chanes, J. (2015). Dietary fiber, phytochemical composition and antioxidant activity of Mexican commercial varieties of cactus pear. *Journal of Food Composition and Analysis*, 41, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.01.017>
- Juncos, N. S., Cravero-Ponso, C. F., Olmedo, R. H., & Grosso, N. R. (2021). El sinergismo de aceites esenciales como modelo para prevenir el deterioro oxidativo y microbiano de los alimentos. *Nexo Agropecuario*, 9(1), 52–58.



- Kresisch, T. (2016). Mezclas y grumos. Problemas y soluciones. *España: Ediciones Paraninfo, S.A.*
- Lefebvre, T., Destandau, E., & Lesellier, E. (2021). Selective extraction of bioactive compounds from plants using recent extraction techniques: A review. In *Journal of Chromatography A* (Vol. 1635). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461770>
- Li, Y., Bundeasomchok, K., Rakotomanomana, N., Fabiano-Tixier, A. S., Bott, R., Wang, Y., & Chemat, F. (2019). Towards a zero-waste biorefinery using edible oils as solvents for the green extraction of volatile and non-volatile bioactive compounds from rosemary. *Antioxidants*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/antiox8050140>
- Mouithys-Mickalad, A., Tome, N. M., Boogaard, T., Sertheyn, D., Schmitt, E., & Paul, A. (2021). Evaluation of the fat oxidation quiality of comertial *Hermetia illucens* meal. *Jonural of Insects as Food and Feed*, 7(6), 965–974. <https://doi.org/https://doi.org/10.3920/JIFF2021.0001>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021, July 9). *Obesidad y Sobrepeso*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
- Peñarrieta, J. M., Tejeda, L., Mollinedo, P., Vila, J. L., & Bravo, J. A. (2014). PHENOLIC COMPOUNDS IN FOOD. In *Bolivian Journal of Chemistry* (Vol. 31, Issue 2).

<http://www.bolivianchemistryjournal.org>, <http://www.scribd.com/bolivianjournalofchemistry>

- Plitt, J. J. (1995). Etimología de palabras en griego y en latín de interés en Biología. *Revista Luna Azul* 1, 1, 1–2.  
<https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/1430>
- Ramírez-Muñoz, J., García-Cortés, D., Colín-Luna, J. A., & Tapia-Medina, C. R. (2016). Efecto de la Evolución del Vórtice sobre los Parámetros Hidrodinámicos de un Sistema de Dispersión Mecánica de Pigmentos. *Informacion Tecnologica*, 27(4), 145–154. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000400016>
- Ramírez-Ramos, M., García-Mateos, Ma. del R., Corrales-García, J., Ybarra-Moncada, C., & Castillo\*González, A. Ma. (2015). COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN VARIEDADES PIGMENTADAS DE TUNA (*Opuntia* sp.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 349–357.
- Ramón, C., & Gil-Garzón, M. A. (2021). Efecto de los parámetros de operación de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de polifenoles de uva: una revisión. *TecnoLógicas*, 24(51), e1822.  
<https://doi.org/10.22430/22565337.1822>
- Rojas, T., Fuentes Campos, M. E., Contreras-López, E., Gómez, S., María Muñoz-Jáuregui RESUMEN, A., La Molina Av La Molina, A., & Molina Lima, L. (2019). EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO DE

## COMPUESTOS FENÓLICOS DE LA CÁSCARA DE SANKY

(*Corryocactus brevistylus*). *Revista de La Sociedad de Química Del Perú*, 85(2), 258–267.

SADER. (2017, August 17). *Transformación de aceites, una industria de crecimiento*. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/transformacion-de-aceites-una-industria-en-crecimiento>

Sailema Ortiz, M. L., Salazar Garcés, E. C., Palacios Duchicela, R. H., Carrera Borja, W. X., & Zambrano Mendoza, C. A. (2023). Efecto de solvente y temperatura para la extracción de compuestos fenólicos en hojas de fresa. *Ciencia Latina Internacional*, 7(3), 2563–2575.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i3.6365](https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6365)

Sanhuesa Catalán, J., Durán Agüero, S., & Torres García, J. (2015). Los ácidos grasos dietarios y su relación con la salud. *Nutrición Hospitalaria*, 32(3), 1362–1375.  
<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.3305/nh.2015.32.3.9276>

Secretaría de comercio y fomento industrial. (2019). *NMX-F-808-SCFI-2018: Alimento-aceite vegetal comestible-especificaciones*.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *NOM-161-SEMARNAT-2011: Que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o*

---

*exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.*

[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5367196&fecha=05/11/2014#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5367196&fecha=05/11/2014#gsc.tab=0)

Serrano Maddelainne, H., Calle, R., & Valeria, V. (2014). Lípidos: características principales y su metabolismo. *Revista de Actualización Clínica*, 41, 2142–2415.

Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2021, May). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. SAGARPA. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Shahidi, F., & Oh, W. Y. (2020). Lipid-derived flavor and off-flavor of traditional and functional foods: an overview. *Journal of Food Bioactives*, 10, 20–31.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant physiology: Vol. I* (Inc. Sinauer Associates, Ed.; 3rd ed.). [www.sinauer.com](http://www.sinauer.com)

Totosaus, A., González-González, R., & Fragoso, M. (2016). Influence of the type of cellulosic derivatives on the texture, and oxidative and thermal stability of soybean oil oleogel. *Grasas y Aceites*, 67(3), e-152. <https://doi.org/10.3989/gya.0440161>

Vargas Domínguez, J. (2019). “El alcohol alimento”: historias de las metáforas del motor humano y las calorías entre el siglo XIX y el XX. *INTER*

---

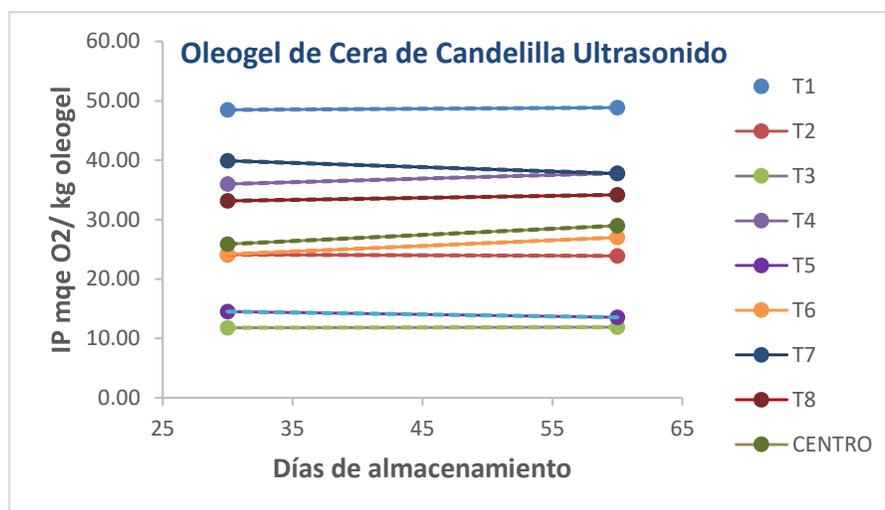
*DISCIPLINA*, 7(19), 139.

<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2019.19.70291>

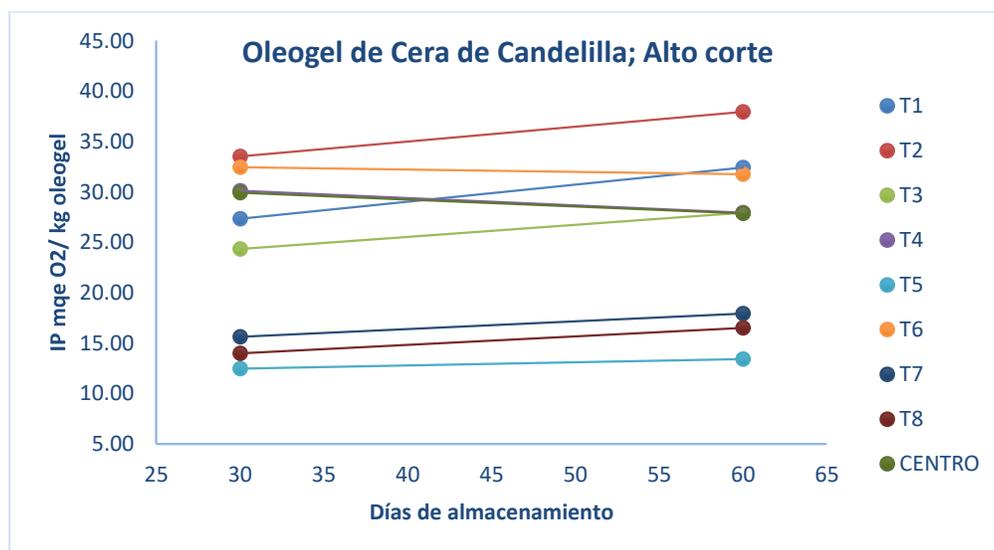
Yara-Varón, E., Li, Y., Balcells, M., Canela-Garayoa, R., Fabiano-Tixier, A. S., & Chemat, F. (2017). Vegetable oils as alternative solvents for green oleo-extraction, purification and formulation of food and natural products. In *Molecules* (Vol. 22, Issue 9). MDPI AG.  
<https://doi.org/10.3390/molecules22091474>

## ANEXOS

**Anexo A.** Gráficos de IP en los oleogeles de cera de candelilla y de soya con cada uno de los sistemas de extracción



**Gráfico A1.** IP del oleogel estructura con cera de candelilla y el aceite proveniente del tratamiento con ultrasonido



**Gráfico A2.** IP del oleogel estructura con cera de candelilla y el aceite proveniente del tratamiento con alto corte

**PRODUCTIVIDAD**

Se otorga la

**Constancia**

**a**  
**Obando-Galicia Yoyce Tania, Totosaus-Sánchez Alfonso.**

Por su destacada participación con el trabajo:  
*Extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos de cáscara de tuna roja.*

**27 Y 28 de octubre del 2022**

**En la presentación de trabajos de investigación modalidad cartel.**

**Del XV Congreso Internacional Virtual, Sobre Inocuidad, Calidad y Funcionalidad de los Alimentos en la Industria y Servicios de Alimentación**












Dra. Mirma E. Santos Lara.  
PRESIDENTA NACIONAL  
SOMEICCA A.C

Q.F.B. Marco A. León Félix  
PRESIDENTE CONSEJO DIRECTIVO.  
SOMEICCA A.C

Dra. Ofelia Araceli López Mejía  
COORDINACIÓN DEL COMITÉ CIENTÍFICO  
SOMEICCA A.C

Dra. Patricia Porrás Loaliza  
COORDINACIÓN DEL COMITÉ CIENTÍFICO  
SOMEICCA A.C

XV CONGRESO INTERNACIONAL "SOBRE INOCUIDAD, CALIDAD Y FUNCIONALIDAD DE LOS ALIMENTOS EN LA INDUSTRIA Y SERVICIOS DE ALIMENTACIÓN"

Oleoextracción de compuestos polifenólicos de cáscara de *Opuntia ficus-indica* mediante ultrasonido o un sistema de alto corte