



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ENERGÍAS RENOVABLES

Producción de biodiésel a partir de aceite de semillas oleaginosas de segunda generación recolectadas en el estado de Puebla

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLES**

PRESENTA

Ing. Fabricio Joseph Honorato Alcántara

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Fortino Bañuelos Romero

Diciembre 2025

Agradecimientos

Mi más profundo, sincero y emocional agradecimiento al Dr. Fortino Bañuelos y Dra. Griselda Corro, por guiarme, motivarme, brindarme de su amplio conocimiento con mucha pasión que me resultará como inspiración para toda la vida. Gracias Dr. Fortino por su excelsa dedicación como mi mentor, sé que sus conocimientos me convirtieron en un mejor estudiante. De igual manera Dra. Griselda su generosidad, enseñanza y disposición enriqueció mi investigación.

A mi Mamá, Angelica, no alcanzan las palabras para agradecer todo lo que haces y has hecho por mí y por las horas de apoyo, sé que dios me habla por tu voz. A mi Papá, Ricardo, gracias por tu apoyo, motivación y enseñanza sobre la vida. El esfuerzo de mis padres ha forjado quien soy.

A mi hermano, Richie, por ser mi compañero de vida, la razón por la que seguiré avanzando y por ser mi motivación para ser mejor persona.

A Mamá Eva, gracias por sus enseñanzas, el amor y momentos especiales que han servido en cada instante de mi vida. A mi abuelo Josafat por sus palabras y siempre querer verme en la cima en cada etapa que me propongo. A mis abuelos paternos por su amor y apoyo en mi crecimiento.

A mi compañera de vida, Alejandra, por motivarme, apoyarme en mis ideas y a ayudarme a visualizar mis metas de manera más clara.

A mi familia materna y paterna por ser parte de mis metas, por su incondicional apoyo y siempre desearme lo mejor.

Su apoyo y amor significan más de lo que mis palabras podrán expresar.

Agradezco a mis compañeros de la Maestría en Ciencias en Energías Renovables y del laboratorio de Catálisis y Energía, por todos los momentos que convivimos, siempre los llevaré en mis recuerdos.

Finalmente, agradezco a la Secretaría de ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo financiero otorgado durante el periodo del proyecto de tesis.

Índice

Tabla de contenido	
Resumen.....	1
Abstract	3
Hipótesis.....	5
Justificación	5
Objetivo	5
Objetivos específicos	6
Capítulo I Marco teórico	7
1.1 Definición de biodiésel	7
1.2 Definición de semillas oleaginosas.....	7
1.3 Historia del biodiésel.....	7
1.4 Proceso para la producción de biodiésel.....	8
1.4.1 Extracción de aceites	8
1.4.1 Extracción de aceite por prensado mecánico e hidráulico.....	8
1.4.2 Extracción con solventes.....	9
1.4.3 Método de extracción soxhlet	9
1.5 Pretratamiento de esterificación ácida	9
1.6 Transesterificación	10
Figura 1. Reacción de transesterificación.....	10
1.7 Clasificación de materias primas	11
1.7.1 Primera generación	11
1.7.2 Segunda generación	11
1.7.3 Tercera generación.....	11
1.7.4 Cuarta generación	11
1.8 Ventajas y características del biodiésel	12
1.9 Clasificación de las materias primas oleaginosas para la producción de biodiésel.	12
1.10 Aceites comestibles primera generación.....	12
Tabla 1. Principales semillas oleaginosas convencionales	13

1.11 Aceites no convencionales de semillas oleaginosas	13
1.12 Semillas no convencionales de fácil adquisición en la región de Puebla	14
Tabla 2. Semillas oleaginosas no convencionales.....	14
Tabla 3. Producción de frutas oleaginosas en México (SIAP)	15
1.13 Parámetros de calidad del biodiésel	16
Tabla 4. Normas para la producción de biodiésel.....	16
Capítulo II Metodología	17
2.1 Tratamiento de las semillas oleaginosas	17
2.2 Determinación del contenido de humedad	17
2.3 Rendimiento de aceite.....	18
2.4 Características del aceite y biodiésel.....	18
2.4.1 Índice de acidez.....	18
2.4.2 Densidad	18
2.4.3 Viscosidad cinemática	19
2.4.4 Punto de inflamación	19
2.4.5 Índice de yodo	20
2.4.6 Número de cetano	21
2.4.7 Cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC – MS).....	21
Capítulo III Experimentación.....	23
3.1 Semillas oleaginosas.....	23
3.1.1 Mamey (<i>Pouteria sapota</i>).....	23
Figura 2. Mamey.....	23
3.1.2 Toloache (<i>Datura stramonium</i>).....	23
Figura 3. <i>Datura stramonium</i> (toloache).....	24
3.1.3 Mango (<i>mangifera indica</i>)	24
Figura 4. Mango.....	25
3.1.4 Aguacate (<i>Persea americana</i>)	25
Figura 5. Aguacate.....	25
3.1 Tratamiento de las semillas oleaginosas.	26

3.2.1 Mamey (<i>Pouteria sapota</i>).....	26
Figura 6. Semilla de mamey	26
3.2.2 Toloache (<i>Datura stramonium</i>).....	27
Figura 7. Semillas de <i>Datura stramonium</i>	27
3.2.3 Mango (<i>Mangifera indica</i>).....	27
Figura 8. Semilla de mango	27
3.2.4 Aguacate (<i>Persea americana</i>)	28
Figura 9. Semilla de aguacate	28
3.3 Métodos de deshidratación.....	28
Figura 10. Horno	29
Figura 11. Parábola solar	29
3.4 Molienda	30
Figura 12. Molino de aspas	30
Figura 13. Semilla molida	31
Figura 14. Criba.....	31
3.6 Métodos de extracción realizados.	32
3.6.1 Prensado mecánico	32
Figura 15. Prensa mecánica	32
3.6.2 Prensado hidráulico	32
Figura 16. Prensa hidráulica	33
3.6.3 Hidrodestilación	33
Figura 17. Hidrodestilación	33
3.6.4 Extracción soxhlet.....	34
Figura 18. Sistema de extracción soxhlet	34
Figura 19. Sistema de destilación	34
3.7 Evaluación de los métodos de extracción de aceite. Selección y justificación del método de extracción.	35
3.7.1 Condiciones de operación del método soxhlet.....	35
3.8 Caracterización de aceites	35
3.8.1 Densidad	35

3.8.2 Viscosidad	36
3.8.3 Índice de acidez.....	37
3.9 Reacción de transesterificación	38
3.10 Reacción de esterificación de mamey.....	43
Capitulo IV Discusión y resultados	44
4.1 Deshidratación de las semillas oleaginosas.....	44
4.2 Deshidratación de las semillas oleaginosas en horno convencional	44
Tabla 5 Contenido de humedad en semillas oleaginosas	45
4.3 Deshidratación de las semillas oleaginosas en parábola solar	46
Grafica 2 Curvas de deshidratación de las semillas en parábola solar.....	47
4.4 Extracción de aceite	48
4.4.1 Rendimiento de aceite	48
Tabla 6. Porcentaje de aceite extraído.....	48
4.3.2 Análisis fisicoquímico de los aceites de las semillas oleaginosas.....	49
Tabla 7. características de los aceites extraídos de las semillas oleaginosas.....	49
4.3.3 Comparación de los aceites obtenidos con el aceite de girasol	51
Grafica 3 Características fisicoquímicas de los aceites obtenidos con un aceite comercial	51
4.4 Producción de biodiésel	53
4.4.1 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de aguacate	53
Tabla 8. Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de aguacate	53
Tabla 9. Biodiésel aguacate.....	53
4.4.2 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de toloache.....	54
Tabla 10 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de toloache	54
Tabla 11 Biodiésel toloache	54
4.4.3 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mango.....	55
Tabla 12 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mango	55
Tabla 13 Biodiésel mango	55
4.4.4 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mamey	56
Tabla 14 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mamey	56

Grafica 4 Producción de biodiésel en función de la variación de metanol.....	57
Tabla 15 Características del biodiésel de aceite de mamey	58
4.5 Propiedades de los biodiésel producidos	59
Tabla 16 Propiedades de la calidad del biodiésel.....	59
4.6 Cromatografía de gases y espectrometría de masas	60
Conclusiones.....	61
Bibliografía.....	62

Figura 1. Reacción de transesterificación.....	10
Figura 2. Mamey.....	23
Figura 3. Datura stramonium (toloache).....	24
Figura 4. Mango.....	25
Figura 5. Aguacate.....	25
Figura 6. Semilla de mamey	26
Figura 7. Semillas de Datura stramonium.....	27
Figura 8. Semilla de mango	27
Figura 9. Semilla de aguacate	28
Figura 10. Horno	29
Figura 11. Parábola solar	29
Figura 12. Molino de aspas	30
Figura 13. Semilla molida	31
Figura 14. Criba.....	31
Figura 15. Prensa mecánica	32
Figura 16. Prensa hidráulica	33
Figura 17. Hidrodestilación	33
Figura 18. Sistema de extracción soxhlet	34
Figura 19. Sistema de destilación	34
Tabla 1. Principales semillas oleaginosas convencionales	13
Tabla 2. Semillas oleaginosas no convencionales.....	14
Tabla 3. Producción de frutas oleaginosas en México (SIAP)	15
Tabla 4. Normas para la producción de biodiésel.....	16
Tabla 5 Contenido de humedad en semillas oleaginosas	45
Tabla 6. Porcentaje de aceite extraído.....	48
Tabla 7. características de los aceites extraídos de las semillas oleaginosas.....	49
Tabla 8. Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de aguacate	53
Tabla 9. Biodiésel aguacate.....	53

Tabla 10 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de toloache	54
Tabla 11 Biodiésel toloache	54
Tabla 12 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mango	55
Tabla 13 Biodiésel mango	55
Tabla 14 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mamey	56
Tabla 15 Características del biodiésel de aceite de mamey	58
Tabla 16 Propiedades de la calidad del biodiésel.....	59
Grafica 2 Curvas de deshidratación de las semillas en parábola solar.....	47
Grafica 3 Características fisicoquímicas de los aceites obtenidos con un aceite comercial	51
Grafica 4 Producción de biodiésel en función de la variación de metanol.....	57

Resumen

La demanda energética mundial debido al incremento de la actividad humana, sumada a los impactos ambientales asociados al uso intensivo de combustibles fósiles, ha impulsado la búsqueda de fuentes alternativas de energía renovable y sostenible. Entre estas, los biocombustibles han emergido como una alternativa viable para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir la dependencia del petróleo. En particular, el biodiésel definido como una mezcla de esteres alquílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés) obtenidos mediante la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales se ha consolidado como un biocombustible de gran potencial técnico, ambiental y económico.

Sin embargo, la viabilidad comercial del biodiésel sigue enfrentando desafíos importantes, siendo el más crítico el alto costo de la materia prima, que representa entre el 70 y 95% del costo total de producción. Esta situación ha motivado la exploración de materias primas no convencionales, especialmente aquellas que no compiten con la cadena alimentaria ni requieren tierras agrícolas adicionales. En este contexto, las semillas oleaginosas de residuos agroindustriales y especies silvestres no comestibles ofrecen una oportunidad estratégica para la producción sostenible de biodiésel, al aprovechar subproductos actualmente desechados o infrautilizados.

En el estado de Puebla, México, se generan anualmente grandes volúmenes de residuos de frutas como el mango (*Mangifera indica*) y mamey (*Pouteria sapota*), cuyas semillas poseen un alto contenido lipídico, pero son habitualmente descartadas en vertederos o utilizadas como forraje de bajo valor. Además, especies silvestres como el toloache (*Datura stramonium*), que crece de forma natural en campos marginados, también han sido reportadas con contenido significativo de aceite en sus semillas, aunque su aprovechamiento energético ha sido poco estudiado. Estas fuentes

representan una oportunidad para desarrollar una cadena de valor local basada en la economía circular y valorización de residuos.

No obstante, el uso de estas materias primas requiere una evaluación rigurosa de su composición fisicoquímica, rendimiento de extracción y calidad del aceite, especialmente en cuanto al índice de acidez, que determina la ruta de procesamiento necesaria (esterificación previa o transesterificación directa). Asimismo, es fundamental optimizar las etapas previas al proceso de conversión, como la deshidratación y la extracción, considerando tanto la eficiencia técnica o el impacto ambiental y energético.

Con base en lo anterior, esta investigación parte de la hipótesis de que algunas semillas oleaginosas disponibles en la región de Puebla específicamente mango, aguacate mamey y toloache presentan un contenido de aceite y características de calidad suficientes para la producción de biodiésel que cumpla con las normas internacionales (ASTM D6751 y EN 14214).

El objetivo general de este trabajo es evaluar el contenido, calidad y viabilidad de los aceites extraídos de semillas de mango, aguacate, mamey y toloache para la producción de biodiésel. Para ello, se compararon distintos métodos de extracción, se caracterizaron fisicoquímicamente los aceites obtenidos, se optimizaron las condiciones de reacción (esterificación y transesterificación), y se validó la calidad del biodiésel mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS).

Abstract

The global energy demand due to the increase in human activity, coupled with the environmental impacts associated with the intensive use of fossil fuels, has driven the search for alternative, renewable, and sustainable energy sources. Among these, biofuels have emerged as a viable alternative to mitigate greenhouse gas emissions and reduce dependence on petroleum. Biodiesel, defined as a mixture of vegetable oils or animal fats, has established itself as a biofuel with great technical, environmental, and economic potential.

However, the commercial viability of biodiesel continues to face significant challenges, the most critical being the high cost of raw materials, which accounts for between 70 % and 95 % of the total production cost. This situation has motivated the exploration of non-conventional feedstocks, especially those that do not compete with the food supply chain or require additional agricultural land. In this context, oleaginous seed from industrial waste and non-edible wild species offer a strategic opportunity for the sustainable production of biodiesel, by utilizing by-products that are currently discarded or underutilized.

In the state of Puebla, México, large volumes of fruit waste such as mango (*Mangifera indica*) mamey (*Pouteria sapota*) are generated annually. Their seeds possess a high lipid content but are usually discarded in landfills or used as low-value fodder. Furthermore, wild species such as jimson weed (*Datura stramonium*), which grows naturally in marginal lands, have also been reported to have significant oil content in their seeds, although their energy use has been poorly studied. These sources represent an opportunity to develop a local value chain based on the circular economy and waste valorization.

However, the use of these feedstocks requires a rigorous evaluation of their physicochemical composition, extraction yield, and oil quality – particularly regarding the acid

value, which determines the necessary processing route (either pre-esterification or direct transesterification). Likewise, it is essential to optimize the stages prior to the conversion process, such as dehydration and extraction, considering not only technical efficiency but also the environmental and energy efficiency impact.

Based on the above, this research starts from the hypothesis that certain oleaginous seeds available in the region of Puebla – specifically mango, avocado, mamey and jimson weed – possess sufficient oil content and quality characteristics to produce biodiesel that complies with international standards (ASTM D6751 and EN 14214).

The general objective of this work is to evaluate the content, quality, and viability of oils extracted from mango, avocado, mamey and jimson weed seeds for biodiesel production. To achieve this, different extraction methods were compared, the obtained oils were physicochemically characterized, the reaction conditions (esterification and transesterification) were optimized, and the biodiesel quality was validated using gas chromatography coupled with mass spectrometry (GS-MS).

Hipótesis

Algunas semillas oleaginosas en la región de Puebla contienen aceite de calidad para la producción de biodiésel.

Justificación

La producción de biodiésel está limitada por la necesidad de sustituir las materias primas de primera generación que son aceites comestibles, los altos costos de las materias primas, que representa aproximadamente el 60 al 80% del costo total de producción [36]. El aprovechamiento de semillas oleaginosas de segunda generación ofrece una alternativa de bajo costo y valorizar lípidos residuales de desecho.

El uso de residuos agroindustriales no comestibles evita la competencia con la cadena alimentaria reduciendo el costo de los insumos. Su aplicabilidad depende del rendimiento lipídico y el índice de acidez, que determinan la ruta de conversión (esterificación previa o transesterificación directa) y la conformidad del biocombustible con las normas ASTM D6751 Y EN 14214, para validar la viabilidad del aceite de semillas oleaginosas en el estado de Puebla.

Objetivo

Evaluar el contenido, calidad y disponibilidad de aceite en semillas oleaginosas disponibles en el estado de Puebla para la producción de biodiésel.

Objetivos específicos

Evaluar métodos de extracción de aceite en semillas oleaginosas, comparando su eficiencia y costos operativos.

Diseñar y construir una prensa hidráulica para la extracción mecánica de aceites.

Caracterizar la composición fisicoquímica de las semillas oleaginosas mediante técnicas analíticas estandarizadas.

Determinar la calidad de los aceites extraídos

Cuantificación de los ácidos grasos libres (índice de acidez)

Determinar la calidad del biodiésel

Capítulo I Marco teórico

1.1 Definición de biodiésel

De acuerdo con las normas ASTM D6751 y EN 14214 el biodiésel se define como la mezcla de esteres alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales, también denominado B100 (Shanthini et al., 2025).

La química lo define como monoéster alquílico de ácidos grasos (FAME por sus siglas en inglés), que se obtiene de por medio de la reacción de transesterificación catalítica de lípidos naturales presentes en aceites vegetales, grasas animales con alcoholes de cadena corta como el etanol o metanol. Su producción y calidad están estandarizadas mediante las normas internacionales (Anwar, 2021; Melikoglu, 2025; Prajapati et al., 2026).

1.2 Definición de semillas oleaginosas

Las semillas oleaginosas conocidas como plantas oleaginosas, es un tipo de cultivo vegetal que se utiliza debido a su alto contenido de aceite y puede utilizarse para consumo humano, industrial o energético (Kabutey et al., 2024). Aunque su composición química varía según la especie todas contienen grasas, nutrientes y proteínas (M. Zhang et al., 2023).

1.3 Historia del biodiésel

La primera transesterificación documentada ocurrió en el año de 1853, por los científicos E. Duffy y J. Patrick usando aceite vegetal. En 1900, Rudolf Diesel demostró su motor con un combustible que solo era aceite de cacahuete, anticipando el uso de los biocombustibles (Bajpai & Tyagi, 2006).

A principios del siglo XX con la expansión de la industria petrolera, el diésel de origen fósil era más barato, estable y con menor viscosidad, es por ello por lo que los fabricantes de motores adaptaron sus diseños a estos parámetros (Balat & Balat, 2010).

En el año de 1970, por efecto de la crisis petrolera ocasionada por la volatilidad de los precios, y con el incremento de la dependencia energética, provocó que se buscaran alternativas renovables, de esta forma los investigadores retoman la posibilidad de modificar los aceites vegetales para obtener un combustible compatible con los motores diésel modernos. La solución llegó con la transesterificación alcalina, este proceso convierte los triglicéridos de los aceites en esteres metílicos de ácidos grasos (FAME), reduciendo drásticamente la viscosidad y mejorando las propiedades de combustión. Este método, eficiente y escalable, se convirtió en la base de la producción industrial de biodiésel a partir de la década de 1980 (Naseef & Tulaimat, 2025).

1.4 Proceso para la producción de biodiésel

1.4.1 Extracción de aceites

La extracción de aceites es un proceso unitario fundamental para la producción de biocombustibles, se define como la separación y recuperación del contenido lipídico, el rendimiento de aceite se calcula con la masa de aceite obtenida respecto a la masa inicial seca. Los principales métodos de extracción de aceites son:

1.4.1 Extracción de aceite por prensado mecánico e hidráulico

Es la técnica más común para la extracción de aceite y consiste en utilizar una prensa de pistón que requiere fuerza humana o de un motor. Por lo general, la prensa mecánica está diseñada para ser utilizada con un solo tipo de semilla y, dependiendo de esta, se puede extraer entre un 60 a 80% de aceite en peso, utilizando una presión entre 10 MPa y 20 MPa. No obstante, el aceite obtenido puede contener compuestos no deseados (Mohd Nurfirdaus Bin Mohiddin et al., 2021).

La presión estimada para la obtención de aceite mediante este método se encuentra entre el intervalo de 10 a 20 MPa (Subroto et al., 2015).

1.4.2 Extracción con solventes

Los solventes que se utilizan habitualmente para el método de extracción con solventes es el diclorometano, isopropanol, éter de petróleo y hexano. Este último es la opción preferida por su baja toxicidad, bajo punto de ebullición de 69°C y alta selectividad lipídica, es soluble en aceite, no reacciona con él y es económico (Sebayang et al., 2023).

1.4.3 Método de extracción soxhlet

Es considerado el método de referencia para la extracción cuantitativa en la extracción sólido-líquido, la extracción de aceites por el método Soxhlet involucra solventes de naturaleza no polar, como el hexano o éter de petróleo. El método Soxhlet tiene como ventaja el contacto repetitivo entre la muestra y solvente; estas repeticiones aumentan el rendimiento de extracción de aceite en la materia prima (Tayib et al., 2024).

1.5 Pretratamiento de esterificación ácida

La reacción:



La reacción se lleva a cabo a 60°C en una relación molar 1:6 (aceite metanol) 1% peso de NaOH y 60 minutos de agitación en un intervalo de 300 a 600 rpm, con estas condiciones se obtiene más del 95% de conversión.

El contenido límite aceptable de ácidos grasos libres en los aceites se encuentra entre 2 a 5%. Si el aceite presenta una alta acidez, es recomendable esterificarlo (Tayib et al., 2024).

Para este proceso se utiliza metanol o etanol y un catalizador como H_2SO_4 con el 1 a 5% en peso, esta reacción se realiza en presencia de temperatura y tiempo. Una vez esterificado el aceite, es apto para la producción de biodiésel (Hoque et al., 2025).

1.6 Transesterificación

El biodiésel se obtiene mediante la reacción de transesterificación de aceite vegetales o grasas, se trata de una reacción química y económica que convierte a los triglicéridos presentes los aceites y grasas en ésteres alquílicos, reduciendo su viscosidad hasta alcanzar niveles similares a los del biodiésel. Esto permite su uso en motores diésel convencionales sin necesidad de realizar modificaciones. Este proceso puede llevarse a cabo mediante catálisis con bases, ácidos, enzimas o fluidos supercríticos (Bajpai & Tyagi, 2006; Balat & Balat, 2010; Iano et al., 2019; Knothe & Razon, 2017).

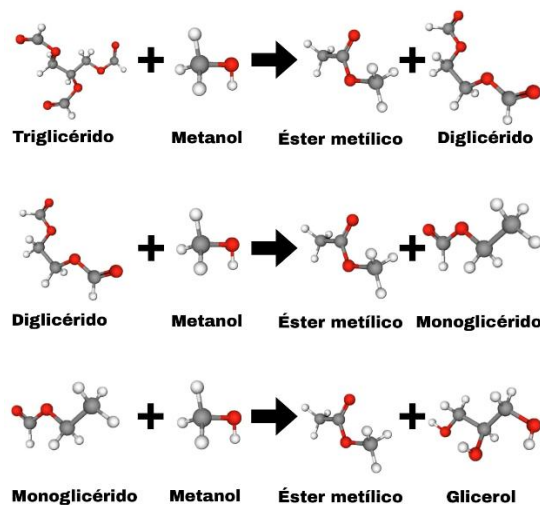


Figura 1. Reacción de transesterificación

1.7 Clasificación de materias primas

1.7.1 Primera generación

Las materias primas de primera generación de biodiésel están definidas por utilizar aceites de cultivos oleaginosos comestibles y biomasa rica en almidón o sacarosa, el principal inconveniente es el impacto adverso en la seguridad alimentaria debido a la alta demanda de tierras para su cultivo generando problemas ambientales como son la pérdida de biodiversidad y la degradación del suelo (Prajapati et al., 2026; Shanthini et al., 2025).

1.7.2 Segunda generación

Las materias primas de segunda generación se basan en el uso de aquellas que no compiten con la producción de alimentos. Además, son materias primas de bajo costo con un alto porcentaje de ácidos grasos libres (AGL). Los aceites no comestibles más conocidos son los de jatropha, ricino, aceite de la semilla de caucho, aceite de cocina usado, grasas animales y biomasa lignocelulósica o residuos agrícolas, como la paja y astillas de madera (Wang et al., 2012).

1.7.3 Tercera generación

Utiliza algas y microorganismos fotosintéticos como sustrato lipídico. Esta fuente es prometedora debido a su alto contenido de aceites, las microalgas tienen de 15% a 77% de aceite de respecto a su peso y especie (Chisti, 2007; Shanthini et al., 2025).

1.7.4 Cuarta generación

Esta tecnología es el logro más destacado de la biotecnología aplicada a la producción de lípidos y utiliza microalgas, macroalgas y cianobacterias genéticamente modificadas como materia prima (Prajapati et al., 2026).

1.8 Ventajas y características del biodiésel

El biodiésel se considera un sustituto viable del diésel, ya que es renovable y biodegradable, no tóxico, presenta bajas emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, y reduce las emisiones de material particulado cuando se utiliza biodiésel de jatrofa. Además, no contiene azufre ni aromáticos y las mezclas de biodiésel B60 han demostrado una reducción significativa de las emisiones ácidas (Banković-Ilić et al., 2012; Namini et al., 2025; Shanthini et al., 2025).

1.9 Clasificación de las materias primas oleaginosas para la producción de biodiésel.

Los cultivos oleaginosos ocupan el segundo lugar en importancia a nivel mundial y son esenciales para la producción humana y animal, así como para la industria, donde se utilizan para producir diversos artículos, incluidos biodiésel (Kephe et al., 2024). La selección de la materia prima en la fase inicial es el proceso más importante ya que representa aproximadamente dos tercios del costo total de producción de biodiésel (Pasha et al., 2021; M. Zhang et al., 2023). Los aceites vegetales suponen la mayor parte de las materias primas utilizadas, hasta un 90% del total. Se han identificado más de 350 especies de plantas oleaginosas que podrían utilizarse de forma potencial para producir biodiésel (Anwar, 2021).

1.10 Aceites comestibles primera generación

Tradicionalmente, la producción industrial ha utilizado aceites comestibles como el aceite de soya (EE. UU, Brasil), el de colza (Europa), girasol (Francia e Italia), y el de palma (Malasia e Indonesia) (Bajpai & Tyagi, 2006; Yaşar, 2020)

Tabla 1. Principales semillas oleaginosas convencionales

Semilla	Porcentaje de aceite	Ácidos grasos dominantes	Referencia
Girasol	35-50%	Ácido palmítico 5-7.6%	(Ebrahimian et al., 2019)
		Ácido esteárico 2.7-6.5%	(Murat Reis Akkaya, 2018)
Soja	18%	Ácido palmítico 11%	(Pachiannan et al., 2025)
		Ácido esteárico 4%	(Mirdoraghi et al., 2024)
Canola	40-45%	Ácido palmítico 3%	(Mirdoraghi et al., 2024)
		Ácido esteárico 2%	(Szymczyk et al., 2025)
Cártamo	35-50%	Ácido palmítico 6-8%	(Mirdoraghi et al., 2024)
		Ácido esteárico 2.3%	
Algodón	20-40%	Ácido linoleico 55%	(Mirdoraghi et al., 2024)
		Ácido oleico 15%	(Sharif et al., 2019)
Cacahuete	50%	Ácido palmítico 9.6%	(Mirdoraghi et al., 2024)
		Ácido oleico 37.7%	(Huang et al., 2025)

1.11 Aceites no convencionales de semillas oleaginosas

Se trata de aceites vegetales extraídos de semillas que no se utilizan en la industria alimentaria y que provienen de fuentes menos exploradas que los aceites tradicionales. Los aceites no convencionales más relevantes son: *Jatropha*, *karanja*, *mahua*, *ricino*, *moringa oleífera*,

argemone mexicana, thevetia peruviana, thlaspi arvense, euphorbia lathyris y datura stramonium (Banković-Ilić et al., 2012).

1.12 Semillas no convencionales de fácil adquisición en la región de Puebla

La elección de las especies (Mango, Datura stramonium, mamey y aguacate) para realizar esta investigación se basó en su alta disponibilidad en el estado de Puebla, se caracteriza por ser una importante entidad de producción de frutas, por lo que sus semillas son de bajo costo dado que son subproductos de frutas de consumo común y fáciles de adquirir, lo que facilita la replicabilidad del estudio y su posible aplicación local.

Tabla 2. Semillas oleaginosas no convencionales

Semilla	Porcentaje de aceite	Ácidos grasos predominantes	Referencia
Mango	6-16 %	Palmítico 8.97% Esteárico 37.37%	(Córdova Córdova A. M & Mendoza Mendoza, C. H., 2021)
Datura	16-25%	Ácido palmítico 12% Ácido esteárico 1.9%	(Yuldasheva et al., 2020) (Wang et al., 2012)
Mamey	40-55%	Ácido palmítico 7.22% Ácido esteárico 25.95%	(Navarro-Flores et al., 2024) (Moo-Huchin et al., 2013)
Aguacate	1.87%	Ácido palmítico 20.8% Ácido oleico 15.4%	(Bora et al., 2001)

De acuerdo con los datos del anuario estadístico de la producción agrícola del gobierno de México, publicado por el Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP), existe una alta disponibilidad regional de los frutos que se muestran en la tabla 3. Estas plantas generan toneladas de semillas que se desaprovechan, sin embargo, podrían emplearse para la producción de biodiésel (SIAP, 2023) (*Anuario Estadístico de La Producción Agrícola*, n.d.)

Tabla 3. Producción de frutas oleaginosas en México (SIAP)

Semilla	Temporada principal	Región clave	Producción
Mango	Marzo-septiembre	Chiapas, Michoacán, Sinaloa	2,299,983.41
Mamey	Diciembre-mayo	Guerrero, Chiapas, Veracruz	30,076.55
Toloache	Junio-noviembre	Estado de México, Puebla, Morelos	
Aguacate		Michoacán, Jalisco, Estado de México	2,540,157

1.13 Parámetros de calidad del biodiésel

La tabla 4 muestra los parámetros que regulan la calidad del biodiésel según las normas internacionales.

Tabla 4. Normas para la producción de biodiésel

Parámetro	ASTM D6751	EN 14214	Referencia
Índice de acidez	0.80 máximo	0.5 máximo	(Asadollahi, 2024)
Viscosidad cinemática	1.9 - 6.0	3.5 - 5.0	(Asadollahi, 2024)
Densidad (15°C)	870 - 890	860 - 900	(Anwar, 2021) (Asadollahi, 2024)
Punto de inflamación	93°C mínimo	101°C mínimo	(Lie et al., 2018) (Anwar, 2021)
Índice de yodo	120 máximo	120 máximo	(Asadollahi, 2024)
Número de cetano	47 mínimo	51 mínimo	(Asadollahi, 2024)

Capítulo II Metodología

2.1 Tratamiento de las semillas oleaginosas

El tratamiento de las semillas oleaginosas inicia con el descortezado, ya que así se reduce el contenido de pigmentos como la clorofila y mejora la calidad del aceite. Para optimizar el proceso de extracción de aceite, es fundamental controlar la humedad mediante el proceso de deshidratación, de esta manera se promueve la evaporación de agua, aumentando la presión interna en la semilla ocasionando el rompimiento las paredes celulares, formando poros. El incremento de la temperatura reduce la viscosidad del aceite, lo que facilita su flujo y mejora el proceso de extracción. (Y. Zhang et al., 2021)

2.2 Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad mide la cantidad de agua presente en las semillas y se expresa en porcentaje del peso total. Es un factor clave para la extracción y calidad de aceite. Un mayor contenido de agua disminuye el rendimiento de extracción de aceite, existe una correlación inversa entre el contenido de humedad y el rendimiento de extracción de aceite. (Savoire et al., 2013)

Para determinar el contenido de humedad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$MC = \left[\left(\frac{m_b - m_a}{m_b} \right) * 100 \right] \quad (1)$$

Donde MC es el contenido de humedad, m_a y m_b es el peso de la masa de las muestras antes y después a la deshidratación. (Kabutey et al., 2024)

2.3 Rendimiento de aceite

Se utiliza para determinar la eficiencia de la extracción de lípidos de las semillas oleaginosas o biomasa. Este valor es importante para conocer la viabilidad de un aceite para la producción de biocombustibles (Kabutey et al., 2024).

El rendimiento de aceite se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento de aceite (\%)} = \frac{m_{\text{aceite extraido}}}{m_{\text{muestra}}} * 100 \quad (2)$$

El rendimiento en porcentaje de aceite, M_a es la masa de aceite obtenida como diferencia entre la masa de la torta de semillas y la masa inicial de la muestra M_m . (Kabutey et al., 2024)

2.4 Características del aceite y biodiésel

2.4.1 Índice de acidez

Se define como el peso de KOH en miligramos, que son necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en cada gramo (g) de aceite vegetal. (Aslan, 2023; Tayib et al., 2024)

El índice de acidez se calcula mediante el método ASTM D-664 o EN 14104 (Asfaw et al., 2025), la fórmula es la siguiente:

$$AV = \frac{V \times N \times 56.1}{m} \left(\frac{mg \text{ KOH}}{g} \right) \quad (3)$$

2.4.2 Densidad

La densidad en el contexto de biocombustibles y aceites es una magnitud física definida como la masa por unidad de volumen. Se mide utilizando un picnómetro de 10 ml los métodos

estándar que incluyen su medición son ASTM D-1298 y EN ISO 1676 a 15°C (Iano et al., 2019; Mahmudul et al., 2017).

Una densidad elevada puede provocar un incremento en el tamaño de las gotas de combustible inyectadas, esto puede llevar a una combustión incompleta y un aumento en las emisiones, en particular el material particulado (PM) y los NOx (Aslan, 2023; Mahmudul et al., 2017).

2.4.3 Viscosidad cinemática

Se define como la resistencia de un líquido a fluir e indica la viscosidad del aceite (Mahmudul et al., 2017). Es una propiedad fisicoquímica utilizada para determinar la calidad de los biocombustibles y aceites, esta directamente relacionada con el flujo y desempeño en los motores (Asfaw et al., 2025; Shanthini et al., 2025).

La viscosidad cinemática se mide en mm^2/s o en centistokes (cSt) de acuerdo con las normas ASTM D455 o ISO 3104 (Knothe & Razon, 2017).

Una viscosidad alta puede causar una mala atomización resultando en una combustión incompleta, aumentando las emisiones como el humo negro, obstrucción de inyectores y carbonización en el motor. Una viscosidad baja provoca una lubricación insuficiente en la bomba de inyección provocando fugas y mayor desgaste (Asadollahi, 2024; Asfaw et al., 2025; Lie et al., 2018).

2.4.4 Punto de inflamación

Es una propiedad fisicoquímica que se utiliza para evaluar la inflamabilidad y la seguridad de los biocombustibles (Asfaw et al., 2025; Mahmudul et al., 2017). Representa la temperatura

mínima a la que un combustible líquido forma una mezcla con aire y puede prenderse con una chispa o flama (Aslan, 2023). Existe un intervalo del punto de inflamación para el biodiésel de 160 a 170°C.(Tayib et al., 2024)

El punto de inflamación refleja la volatilidad y seguridad de combustible, la cual se puede determinar mediante el método de copa cerrada Pensky Martens en la norma ASTM D93, el método de copa abierta Cleveland con la norma ASTM D92, o el método ASTM D6450 (Shanthini et al., 2025; Subroto et al., 2015).

2.4.5 Índice de yodo

Es un parámetro fisicoquímico que permite conocer el grado de insaturación de sus componentes líquidos en grasas, aceites y combustibles, se define como la cantidad de yodo en gramos que es absorbida por 100 gramos de muestra, cuando mayor sea el número de enlaces dobles, mayor es el índice de yodo (Aslan, 2023).

La presencia de ácidos grasos insaturados puede influir negativamente en las propiedades fisicoquímicas y lubricantes de aceite. El índice de yodo se determina mediante los métodos estándar ASTM D1959, ASTM D6751 o ISO 3961-1996

El índice de yodo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IV = \frac{N \times 12.69 \times (Vb - Va)}{m} \quad (4)$$

Donde N es la normalidad de la solución de tiosulfato de sodio, Vb es el volumen de tiosulfato de sodio en ml utilizado para el blanco (sin muestra), Va es el volumen de tiosulfato de sodio en ml utilizado para la prueba de la muestra, m es la masa de la muestra en gramos y 12.69

es el factor de conversión mEq de tiosulfato de sodio a gramos de yodo que se basa en el peso molecular de yodo de 129.6 g/mol (Asadollahi, 2024; Asfaw et al., 2025; Wang et al., 2012).

2.4.6 Número de cetano

Es un parámetro de calidad para el combustible diésel para determinar la calidad de ignición y su retraso, es decir, es el tiempo en que tarda el combustible líquido en autoencenderse después de ser suministrado en el motor (Tayib et al., 2024).

Un número de cetano alto presenta menor tiempo para realizar la ignición, ocasionando que el combustible se detone fácilmente a baja presión, causando que el rendimiento del motor sea más eficiente, con mayor potencia, mejor arranque en frío, menor emisión de humo y ruido de combustión (Asfaw et al., 2025; Yaşar, 2020).

Un número de cetano bajo puede provocar en el motor mal funcionamiento y daños a largo plazo, presentando dificultades de arranque en frío, ruido excesivo y aumentando las emisiones de material particulado (Aslan, 2023).

Las normas internacionales establecen el límite mínimo de número de cetano en el biodiésel, la norma ASTM D6751 requiere un mínimo 47 cetanos, mientras que la norma EN 14214 requiere mínimo 51 cetanos (Knothe & Razon, 2017; Ozdemir et al., 2025).

2.4.7 Cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC – MS)

La GC-MS es una potente técnica analítica para separar e identificar compuestos en una muestra. Se utiliza para analizar los FAME obtenidos mediante la transesterificación. La GC separa los FAME individualmente según sus propiedades químicas, mientras que la MS identifica y cuantifica cada FAME mediante su espectro de masas (Kirrolia et al., 2025).

La calidad y origen del biodiésel, determinado por el tipo de materia prima, se evalúa mediante el perfil de sus componentes primarios como los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME). Estos compuestos, generados por la transesterificación de aceites o grasas con un alcohol, se separan y cuantifican mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC-MS)(Shanthini et al., 2025).

Capítulo III Experimentación

3.1 Semillas oleaginosas

Se recolectaron diversas frutas con semillas oleaginosas disponibles en el estado de Puebla, las semillas más representativas son de mango (*Mangifera indica*), toloache (*Datura stramonium*), mamey (*Pouteria sapota*) y aguacate (*persea americana*).

3.1.1 Mamey (*Pouteria sapota*)

Se recolectaron desperdicios de frutos de mamey en locales comerciales de los mercados de la ciudad de Puebla, tienen una apariencia ovalada, pueden llegar a medir de 12 a 20 cm; la piel de esta fruta es áspera y gruesa, de color marrón con similitud a la corteza de un árbol.

La pulpa es de color rojizo, con algunos matices anaranjados, de textura suave y cremosa.



Figura 2. Mamey

3.1.2 Toloache (*Datura stramonium*)

Crece de forma silvestre, en el estado de Puebla, no es comestible, es de forma ovalada y del tamaño de una nuez, está cubierta de espinas largas, gruesas y afiladas; es de color verde

oscuro, al madurar se seca cambiado a color marrón. En su interior contiene numerosas semillas como se muestra en la figura 3.



Figura 3. *Datura stramonium* (toloache)

3.1.3 Mango (*mangifera indica*)

La fruta de mango se recolecto de los desechos generados en locales comerciales de los mercados, que se dedican a la venta de frutas es de apariencia ovalada, su tamaño es de 7 cm a 12 cm de largo.

La piel de este resistente, de color amarillo, con matices que varían de naranja a rojo.



Figura 4. Mango

3.1.4 Aguacate (*Persea americana*)

Se recolecto en los locales comerciales como desechos, de apariencia ovalada, llega a medir de 8 a 11 cm. Piel, es de textura gruesa, resistente y de color marrón oscuro.

La pulpa es de color verde, con textura suave y cremosa; la semilla es grande, redonda y dura, de color marrón claro.

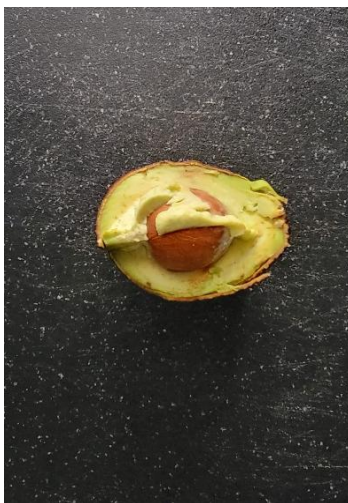


Figura 5. Aguacate

3.1 Tratamiento de las semillas oleaginosas.

3.2.1 Mamey (*Pouteria sapota*)

Se realiza el proceso de limpieza de la semilla de forma manual, la apertura de la cascara que recubre la semilla se realiza de manera mecánica, debido a sus características de espesor, dureza y adherencia de la semilla.



Figura 6. Semilla de mamey

3.2.2 Toloache (*Datura stramonium*)

La figura 7 muestra la forma de la semilla de Toloache, se procede a la limpieza mediante un corte transversal en la cascara para extraer las semillas.



Figura 7. Semillas de *Datura stramonium*

3.2.3 Mango (*Mangifera indica*)

En la figura 8 se muestra a la semilla de mango y la pulpa que la envuelve, para su limpieza, se abre la cascara por medios mecánicos y se realiza una incisión longitudinal, exponiendo la semilla, de esta forma es fácil extraer la semilla

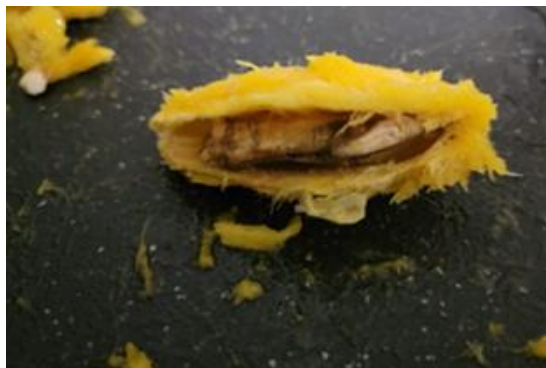


Figura 8. Semilla de mango

3.2.4 Aguacate (*Persea americana*)

En la figura 9 se muestra las semillas de aguacate, su limpieza es la más fácil comparada con las otras semillas; debido a que solo se retira la cascara y la pulpa.



Figura 9. Semilla de aguacate

3.3 Métodos de deshidratación

Una vez limpias y descascarilladas las semillas oleaginosas, se sometieron a un proceso de deshidratación en un horno convencional a temperatura constante de 93.3°C, cada semilla presentara distintos tiempos para su deshidratación.



Figura 10. Horno

Se utilizó una parábola solar, que emplea un reflector parabólico cuya función es focalizar los rayos solares en un punto específico, lo que permite alcanzar temperaturas de entre 80 y 150°C dependiendo de las condiciones climáticas, lo que aumenta significativamente la temperatura y acelera el proceso de deshidratación.



Figura 11. Parábola solar

3.4 Molienda

Una vez deshidratadas las semillas oleaginosas se realiza la molienda, que fue realizada con un molino de cuchillas.



Figura 12. Molino de aspas

La molienda es un factor determinante para lograr un rendimiento óptimo, debido a que, al molerlas, se rompen las paredes celulares, exponiendo los triglicéridos y facilitando su disolución, lo cual incrementa la eficiencia de extracción debido a que hay mayor superficie de contacto y reduce el tiempo requerido.



Figura 13. Semilla molida

La semilla molida conocida como “harina”, es tamizada a través de una criba para homogeneizar el tamaño de las semillas molidas; la criba es de característica metálica con aberturas de 1 mm.



Figura 14. Criba

3.6 Métodos de extracción realizados.

Se llevo a cabo distintos métodos de extracción, como la extracción mecánica, hidráulica, hidrodestilación y soxhlet.

3.6.1 Prensado mecánico

Se empleó una prensa que tiene un tonillo sin fin o expeller el cual ayuda a ejercer presión de manera progresiva en las semillas, rompiendo la estructura de la semilla permitiendo la extracción de aceite, sin embargo, este método se vio limitado debido a que solo funciona para algunas semillas oleaginosas, es por ello por lo que se descarta este método.



Figura 15. Prensa mecánica

3.6.2 Prensado hidráulico

Debido al diseño de la prensa, se realizó una modificación al gato hidráulico (tipo botella) para que funcionara en una posición invertida sin perder su presión uniforme y controlada sobre las semillas oleaginosas. Sin embargo, este método fue descartado debido a que no se genera la presión suficiente sobre las semillas oleaginosas.



Figura 16. Prensa hidráulica

3.6.3 Hidrodestilación

Para la extracción de aceite con agua caliente, la materia vegetal se sumerge en agua hirviendo y se agita de manera constante para liberar los aceites, que luego se condensan y se separa del agua.



Figura 17. Hidrodestilación

3.6.4 Extracción soxhlet

En este método de extracción, la semilla debe estar previamente molida y dentro de una bolsa de papel filtro con un tamaño de poro de 20 micrómetros. El solvente se evapora y se condensa mediante una percolación repetitiva sobre la materia prima, extrayendo los lípidos.



Figura 18. Sistema de extracción soxhlet

Utilizando la operación unitaria de destilación se recupera el hexano.

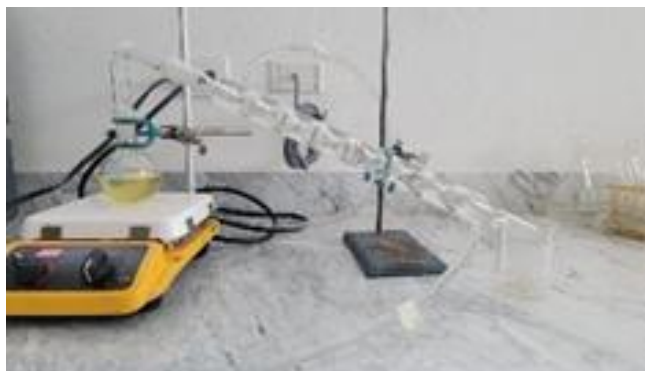


Figura 19. Sistema de destilación

3.7 Evaluación de los métodos de extracción de aceite. Selección y justificación del método de extracción.

Extracción mecánica: Este método es capaz de obtener aceite con fragmentos de semilla, requiriendo un proceso de refinamiento adicional, además solamente funciona para algunas semillas, requiere de altas presiones.

Hidrodestilación: Es un método accesible, pero tiene bajo rendimiento de extracción, por lo que requiere de grandes cantidades de agua para obtener un volumen significativo de aceite.

Método de extracción Soxhlet: Este método trabaja de forma autónoma, el solvente se recicla continuamente pasando sobre la muestra, así mismo se recupera el solvente y el rendimiento de extracción de aceite es mayor a los otros métodos.

Por lo tanto, en esta investigación se utilizará el método Soxhlet por sus ventajas.

3.7.1 Condiciones de operación del método soxhlet

Se pesa 1 Kg de semilla previamente molida y deshidratada, se introduce dentro de una bolsa de papel filtro. Como solvente se utiliza hexano en una relación molar 1:5 (muestra/solvente) durante 26 ciclos en 6 h a 69°C. Posteriormente el aceite es recuperado mediante la evaporación del hexano a 69°C y su condensación a 3°C.

3.8 Caracterización de aceites

3.8.1 Densidad

La medición de densidad se realiza pesando un volumen de 10 ml en un picnómetro como se muestra en la figura 20 y 21.



Figura 20. Balanza pesando 10 ml de aceite

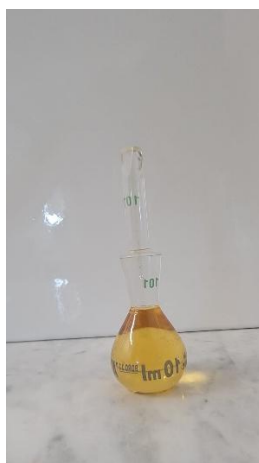


Figura 21. Picnómetro

3.8.2 Viscosidad

Se utilizó a un viscosímetro de tubo capilar como se muestra en la figura 22, el cual mide el tiempo que presenta la resistencia interna de un fluido por efecto de la gravedad a través del tubo capilar.



Figura 22. Viscosímetro

3.8.3 Índice de acidez

Es el contenido de ácidos grasos libres en aceites, se considera uno de los principales parámetros que reflejan la calidad de los aceites, para realizar esta medición se utiliza el método oficial (AOCS, 1989) el cual consta de un análisis mediante titulación, basada en la reacción química entre los ácidos grasos libres y el hidróxido de potasio.

Se miden 4 ml de una mezcla de alcohol etílico y éter etílico con relación 1:1, mezclando con un volumen de 1.25 ml de aceite y se titula con una solución de 0.1 M de KOH



Figura 22. Prueba para determinar el índice de acidez

3.9 Reacción de transesterificación

Se miden 25 ml de aceite en una probeta, para realizar la reacción de transesterificación se debe realizar en presencia de un alcohol como el metanol y NaOH que intervendrá como catalizador.



Figura 23. Aceite

Se realiza la mezcla de aceite, NaOH y metanol en distintos porcentajes (20, 30, 40, 50 y 60 %) respecto al volumen de aceite, con el propósito de encontrar la relación óptima para la conversión a biodiésel.



Figura 24. Aceite y metanol

El reactor debe ser hermético para evitar la fuga del metanol y que la reacción no se lleve a cabo, es por ello que el reactor utilizado es de rosca y se encuentra modificado/optimizado de manera que se pueda utilizar un termómetro para tener control de la temperatura, sellado en la unión permitiendo la hermeticidad del sistema.

Se vierten la mezcla de aceite, metanol y NaOH, la reacción de transesterificación se lleva a cabo a 60°C con agitación vigorosa y constante con una duración de una hora.

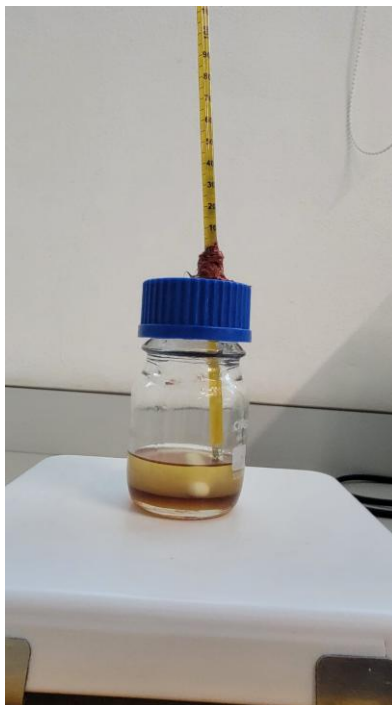


Figura 25. Reacción de transesterificación

Una vez transcurrida la hora donde se efectuó la reacción de transesterificación, se obtendrán dos fases que mediante un embudo de separación se puede retirar el subproducto de la parte inferior que corresponde al glicerol y la parte superior al biodiésel producido el cual se somete al proceso de lavado y secado.



Figura 26. Embudo de separación, biodiésel y glicerina

Finalmente se obtiene un biodiésel que se somete al lavado y secado con el fin de mejorar su calidad; la calidad del biocombustible se medirá con la técnica analítica de cromatografía de gases y espectrometría de masas.



Figura 27. Medición del volumen de Biodiésel obtenido

La calidad se medirá con la técnica de cromatografía de gases y espectrometría de masas



Figura 28. Cromatógrafo de gases.

3.10 Reacción de esterificación de mamey

Se realizó una mezcla de aceite proveniente de la semilla de mamey y metanol en una proporción de 1:1, a una temperatura de 60 °C durante 3 horas. Con el propósito de reducir los ácidos grasos libres que pueden interferir en la reacción de transesterificación.

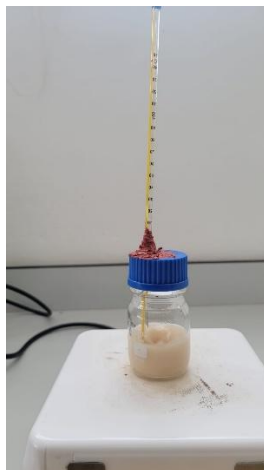


Figura 29. Reacción de esterificación

Una vez transcurridas las 3 horas, se puede percibir 2 fases, de las cuales, la fase superior corresponde a esteres metílicos de ácidos grasos y la parte inferior corresponde al subproducto glicerol.

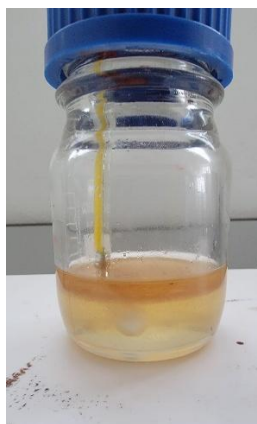


Figura 30. Aceite esterificado

Capítulo IV Discusión y resultados

Los resultados obtenidos se centran en la evaluar la viabilidad de las semillas de Mango, Toloache, Aguacate y Mamey para la producción de biodiésel.

4.1 Deshidratación de las semillas oleaginosas.

La cinética de pérdida de peso para las diferentes semillas en función del tiempo es un factor fundamental previo a la extracción de aceite, con el fin de controlar la humedad de las semillas debido a que un alto contenido de agua disminuye el rendimiento de extracción de aceite.

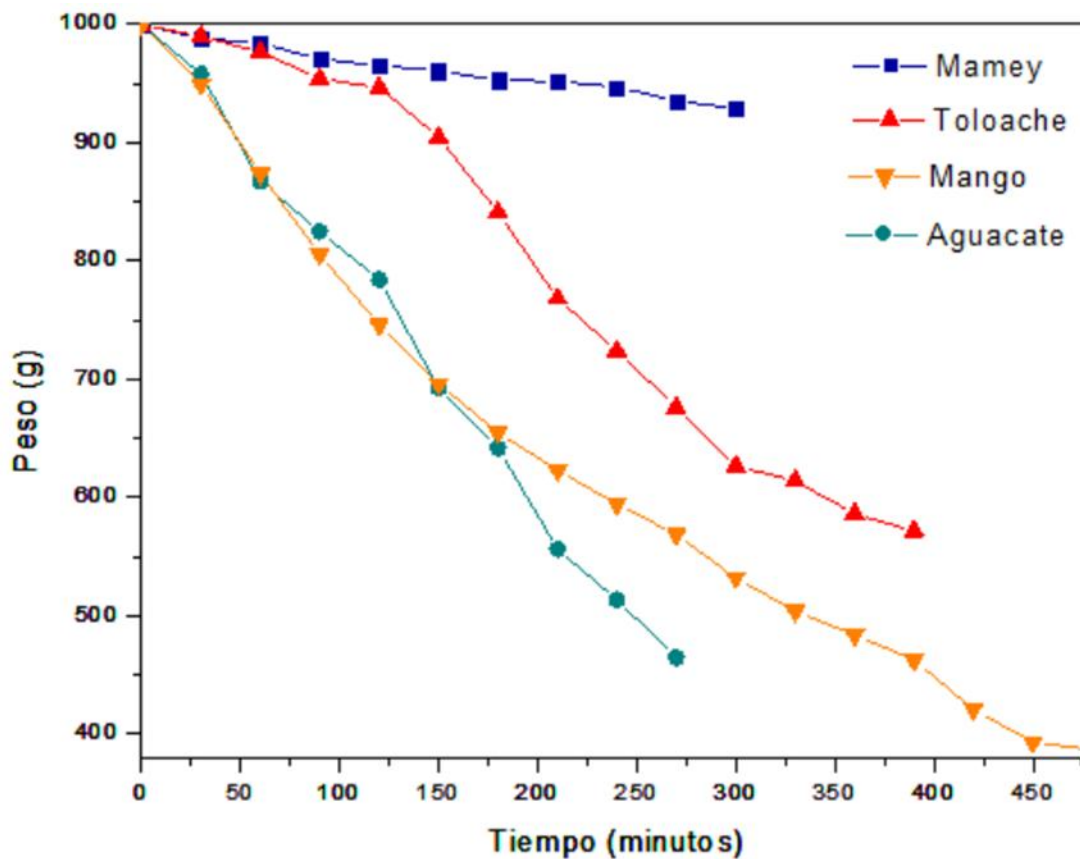
Los métodos de extracción utilizados para este proceso son mediante una parábola solar y mediante un horno convencional.

4.2 Deshidratación de las semillas oleaginosas en horno convencional

La cinética de pérdida de peso de las semillas oleaginosas utilizando un horno convencional se muestra en la gráfica 1, en la que se muestra el peso en gramos contra el tiempo de deshidratación a temperatura constante a 95°C y para 1 kilogramo de muestra. Conforme avanza el tiempo, el peso de las semillas disminuye por efecto de la eliminación de agua; sin embargo, la tasa de pérdida de peso es diferente para cada una de las semillas.

1. Las semillas de aguacate presentan una pérdida de peso más rápida, ya que tiene una pendiente pronunciada en los primeros 200 minutos llegando a un peso final de 460 gramos.
2. La semilla de mango pierde peso rápidamente, aunque no tanto como la semilla de aguacate, llegando a un peso final de 390 gramos.
3. La semilla de toloache presenta una pérdida de peso intermedia en comparación con las otras semillas, obteniendo un peso final de 570 gramos.

4. La semilla de mamey pierde menos peso, su curva de deshidratación es la más plana, lo cual indica una pérdida de humedad más lenta, esto indica que es la semilla más resistente al proceso de deshidratación obteniendo un peso final de 920 gramos.



Grafica 1 Curvas de deshidratación de las semillas en horno convencional

Tabla 5 Contenido de humedad en semillas oleaginosas

Semilla	Tiempo de deshidratación en horno convencional	Porcentaje de humedad
Mango	8.5 h	61.29%
Toloache	7.5 h	42.82%
Aguacate	5.5 h	53.51%

Mamey

7.5 h

7.12%

De acuerdo con la tabla 5, el mango presenta mayor pérdida de humedad 61.29% en un tiempo de 8 horas, esto es debido a que tiene una estructura permeable y un bajo contenido en lípidos, facilitando el proceso de deshidratación. Las semillas de aguacate muestran una deshidratación rápida, su peso tiene una estabilidad a partir de las 4.5 horas. Las semillas de toloache tienen una tasa de pérdida de masa moderada de 42.82% con una cinética de deshidratación más uniforme. Las semillas de mamey presentan una tasa de pérdida de masa de 7.12% a pesar de un tiempo prolongado de exposición a la deshidratación, esto puede sugerir un alto contenido de lípidos, lo cual limita la deshidratación en menor tiempo, requiriendo un tiempo de 7.5 horas para que el peso alcance la estabilidad.

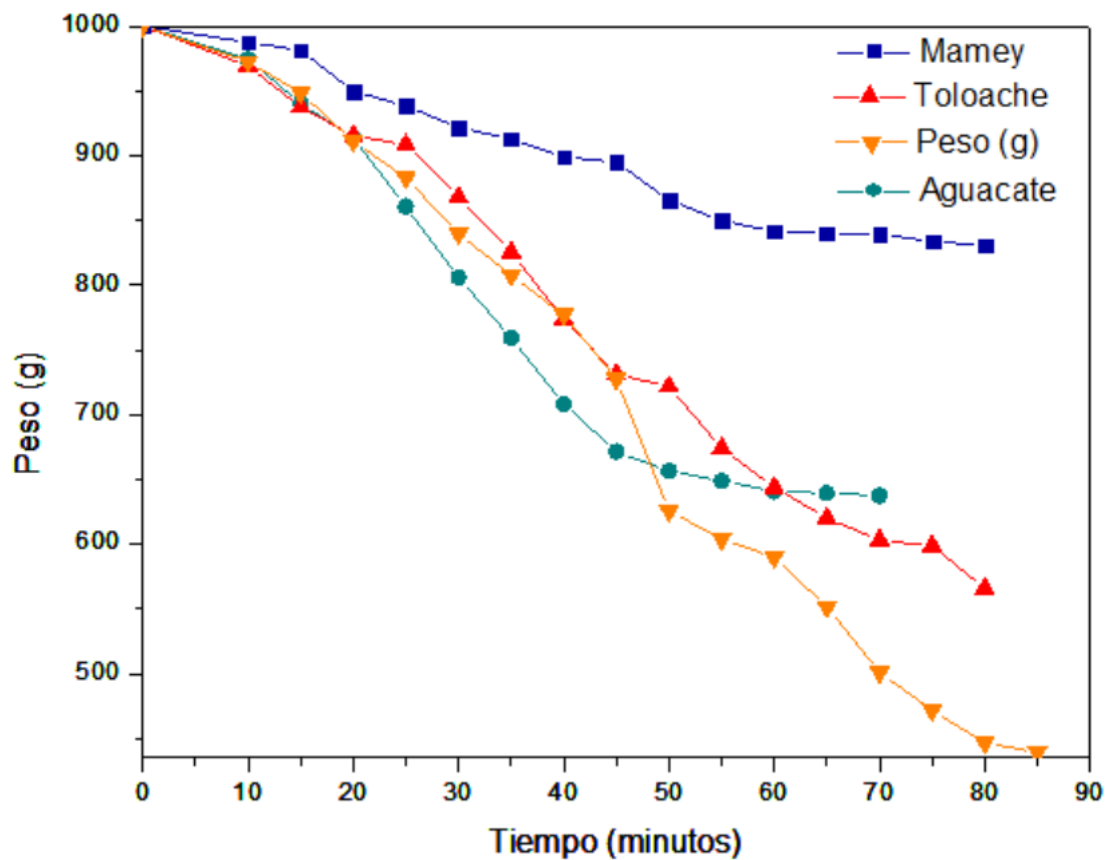
4.3 Deshidratación de las semillas oleaginosas en parábola solar

El método de deshidratación utilizando una parábola solar, que es un reflector parabólico diseñado para focalizar los rayos solares, esta concentración de energía permite alcanzar temperaturas de 80°C a 150°C dependiendo de las condiciones climáticas.

La gráfica 2 muestra el peso en gramos en función del tiempo en minutos, partiendo de una masa inicial de 1 Kg de muestra para cada semilla. Obteniendo los siguientes resultados:

1. La semilla de aguacate presenta una rápida pérdida de peso.
2. La semilla de mango presenta mayor pérdida de peso de 61.29% en poco tiempo, esto se atribuye a que tiene una estructura permeable y un bajo contenido de aceite, que facilita la eliminación de agua.
3. La semilla de toloache presenta una pérdida de peso moderado.

4. La semilla de mamey presenta la curva más plana, es la más resistente al proceso de deshidratación, esto se atribuye a su alto contenido de aceite.



Grafica 2 Curvas de deshidratación de las semillas en parábola solar

4.4 Extracción de aceite

4.4.1 Rendimiento de aceite

La cuantificación de aceite extraído por el método soxhlet de las semillas oleaginosas no convencionales que se muestran se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de aceite extraído

	Mango	Toloache	Aguacate	Mamey
Porcentaje de extracción de aceite	15.03%	23.6%	7.46%	40.3%
Aceite extraído en ml	150 ml	236 ml	74.6 ml	403 ml

La semilla de mango alcanzó un porcentaje de extracción de aceite de 15.03 %, según lo reportado en la bibliografía está en el límite superior que es del **6 - 16%** (Córdova Córdova A. M & Mendoza Mendoza, C. H., 2021) , logrando un rendimiento aceptable y esperado.

La semilla de toloache alcanzó un porcentaje de extracción de aceite de 23.6%, es un valor esperado de acuerdo con lo reportado en la bibliografía **16 - 25%** (Yuldasheva et al., 2020).

La semilla de aguacate alcanzó un porcentaje de extracción de aceite del 7.46%, siendo un porcentaje que es superior a lo que se reporta en la bibliografía **1.87%** (Bora et al., 2001), esta diferencia puede atribuirse a la variedad de aguacate y madurez de la semilla. Para este estudio se utilizó el aguacate tipo “Fuerte” es común en el estado de Puebla.

La semilla de mamey alcanzó un porcentaje de extracción de aceite del 40.3%, este valor se encuentra en el límite inferior del intervalo a lo reportado en la bibliografía que es del **40 – 55 %** (Navarro-Flores et al., 2024), por lo que su alto porcentaje de aceite lo convierte en una semilla muy valiosa y prometedora para la producción de biodiésel.

4.3.2 Análisis fisicoquímico de los aceites de las semillas oleaginosas

Con este método se evalúa el aceite extraído de las semillas oleaginosas como se muestra en la tabla 7, además, se determinan parámetros reológicos, como la viscosidad dinámica y cinemática. Y otras características que garantizan la calidad y seguridad de los aceites como lo son la temperatura de inflamación e índice de acidez.

Tabla 7. características de los aceites extraídos de las semillas oleaginosas

	Aceite de mango	Aceite de toloache	Aceite de mamey	Aceite de aguacate
Densidad a 15°C ρ_{15}	920.33	915.12	911.98	925
Viscosidad cinemática ν	31.14	35.12	34.04	48
Temperatura de inflamación °C	240	260	227	250
Índice de acidez	8.49	5.2	1.8436	4

La densidad del aceite de aguacate es la más alta 925 Kg/m³, mientras que el aceite de mamey tiene la menor densidad 911.98 Kg/m³

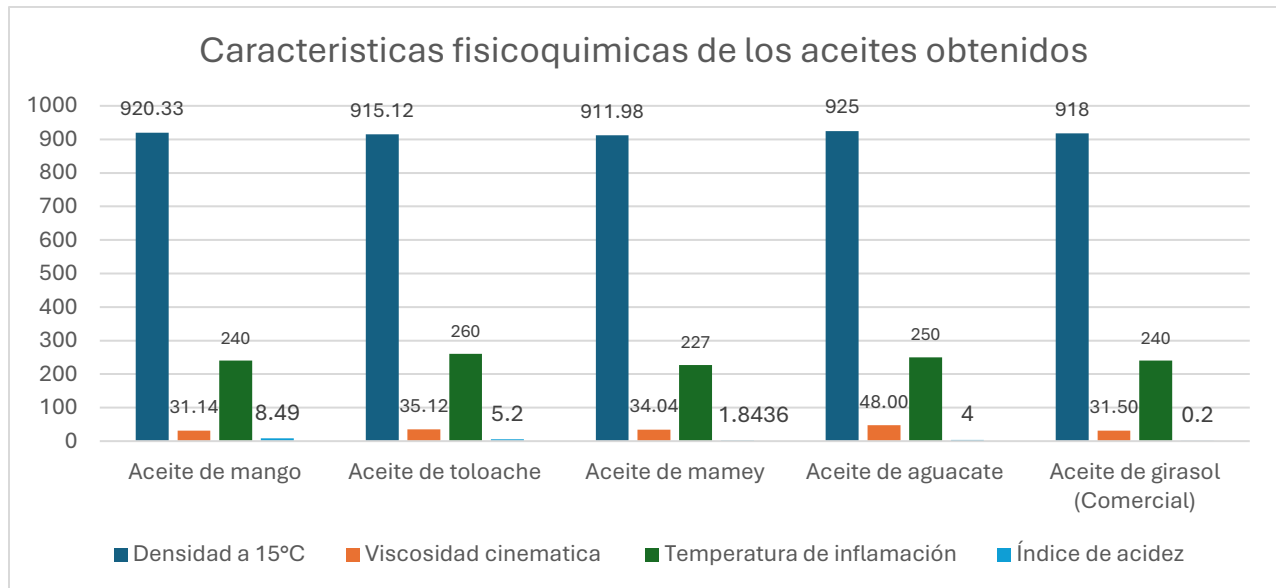
La viscosidad cinemática muestra que el aceite de aguacate es el más viscoso, mientras que el aceite de mango es el menor.

La temperatura de inflamación más alta le corresponde al aceite de Toloache, por otro lado, el aceite de mamey tiene la temperatura de inflamación más baja.

El índice de acidez es el parámetro que define si un aceite debe pretratarse con la esterificación antes de realizar la transesterificación. El aceite de mamey tiene el índice de acidez de 1.8436, está por debajo del umbral de 2.5%, por lo que se puede desarrollar el proceso en un solo paso de acuerdo con (Asfaw et al., 2025), lo que sugiere una mayor calidad y estabilidad para la producción de biodiésel

4.3.3 Comparación de los aceites obtenidos con el aceite de girasol

Se realiza un análisis comparativo de cuatro parámetros, densidad a 15°C, viscosidad cinemática, temperatura de inflamación e índice de acidez. Se comparan los aceites obtenidos con un aceite de girasol comercial (refinado) que se utiliza en la elaboración de alimentos.



Grafica 3 Características fisicoquímicas de los aceites obtenidos con un aceite comercial

Densidad:

En comparación con el aceite de girasol que tiene una densidad de 918, los aceites obtenidos muestran una variación moderada.

El aceite de aguacate tiene la densidad más alta de 925. El aceite de mango presenta una densidad ligeramente mayor al aceite de girasol con un valor de 920.33. Sin embargo, los aceites de toloache y de mamey presentan densidades más bajas de 915.12 y 911.98 respectivamente.

Viscosidad cinemática:

El aceite de girasol posee una viscosidad de 31.50.

El aceite de aguacate tiene una viscosidad significativamente mayor de 48, lo cual se atribuye a un mayor grado de saturación o triglicéridos de cadena larga. Los aceites de toloache y mamey presentan valores superiores al aceite de girasol, 35.12 y 34.04 respectivamente. El aceite de mango tiene la viscosidad cinemática más baja, de 31.14.

Temperatura de inflamación:

Este parámetro indica la seguridad y estabilidad térmica de los aceites, el cual el aceite de girasol se inflama a 240°C.

El aceite de toloache presenta mayor estabilidad, con un punto de inflamación de 260°C. El aceite de aguacate muestra una mayor estabilidad que el aceite de girasol, con 250°C. El aceite de mango tiene una temperatura de inflamación igual al aceite de girasol. El aceite de mamey tiene la menor temperatura de inflamación presentando 227°C

Índice de acidez:

El aceite de girasol tiene el índice de acidez más bajo 0.2, este valor se debe a que es un producto refinado debido a que es de carácter comercial y de aplicación en la elaboración de alimentos. En este contexto, el aceite de mamey presenta el índice de acidez más bajo 1.8436, sin haber sido procesado a un refinamiento. El aceite de mango tiene el índice de acidez más elevado, seguido por el aceite de toloache y aceite de aguacate.

4.4 Producción de biodiésel

4.4.1 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de aguacate

Para la producción de biodiésel se muestran las condiciones utilizadas en la parte experimental correspondientes a la operación del reactor, tal y como se indican en la tabla 8.

Tabla 8. Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de aguacate

Temperatura de reacción	Volumen de aceite	Volumen de metanol	NaOH	Tiempo de reacción
60°C	100 ml	50%	0.2 g	1 hora

Los resultados de la calidad de biodiésel procedente del aceite de aguacate se presentan en la tabla 9 de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido.

Tabla 9. Biodiésel aguacate

Índice de acidez	0.33
Densidad a 15°C ρ_{15}	878.71
Viscosidad cinemática ν	4.3
Temperatura de inflamación °C	170

4.4.2 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de toloache

Para la producción de biodiésel se muestran las condiciones utilizadas en la parte experimental correspondientes a la operación del reactor, tal y como se indica en la tabla 10.

Tabla 10 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de toloache

Temperatura de reacción	Volumen de aceite	Volumen de metanol	NaOH	Tiempo de reacción
60°C	100 ml	50%	0.2 g	1 hora

Los resultados de la calidad de biodiésel procedente del aceite de toloache se presentan en la tabla 11 de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido.

Tabla 11 Biodiésel toloache

Índice de acidez	0.5
Densidad a 15°C ρ_{15}	878
Viscosidad cinemática ν	4
Temperatura de inflamación °C	160

4.4.3 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mango

Para la producción de biodiésel se muestran las condiciones utilizadas en la parte experimental correspondiente a la operación del reactor, tal y como se indica en la tabla 12.

Tabla 12 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mango

Temperatura de reacción	Volumen de aceite	Volumen de metanol	NaOH	Tiempo de reacción
60°C	100 ml	50%	0.2 g	1 hora

Los resultados de calidad de biodiésel procedentes del aceite de mango se presentan en la tabla 13 de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido.

Tabla 13 Biodiésel mango

Índice de acidez	0.4
Densidad a 15°C ρ_{15}	880
Viscosidad cinemática ν	4.48
Temperatura de inflamación °C	169

4.4.4 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mamey

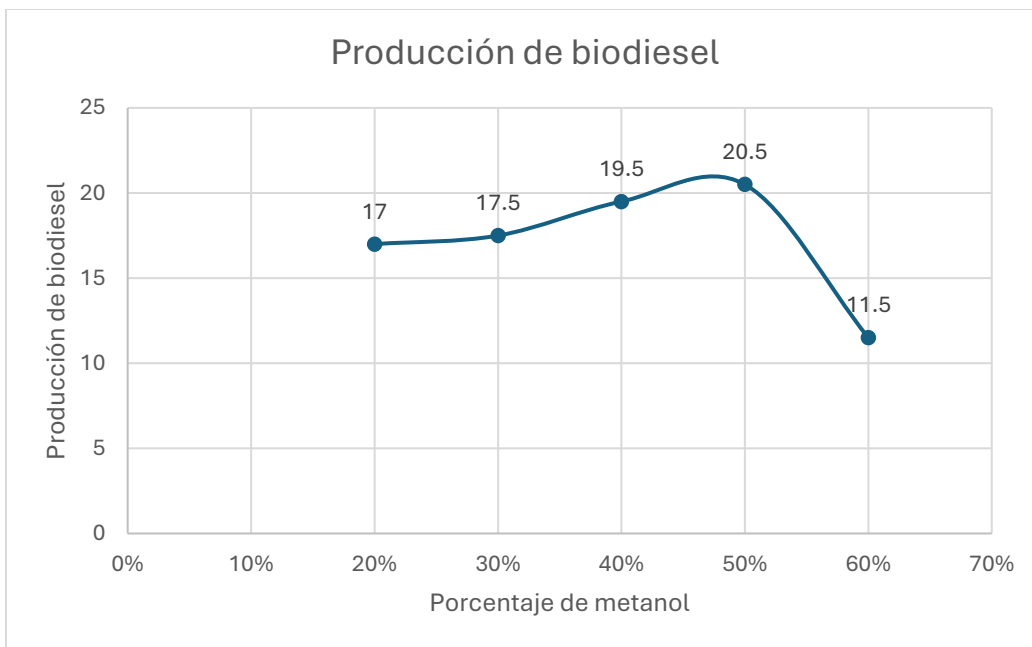
La tabla 14 describe el estudio experimental para evaluar el efecto de la concentración de metanol con la finalidad de encontrar la relación molar adecuada para la producción de biodiésel. Manteniendo la temperatura, volumen constante, la cantidad de catalizador 0.2 g de NaOH y una hora de reacción constante.

Tabla 14 Condiciones para la reacción de transesterificación de aceite de mamey

Temperatura de reacción	Volumen de aceite	Volumen de metanol	NaOH	Tiempo de reacción
60°C	100 ml	20%	0.2 g	1 hora
		30%		
		40%		
		50%		
		60%		

Se evaluaron variaciones de volumen de metanol en la reacción de transesterificación en la gráfica 4 que representa la producción de biodiésel en función del porcentaje de metanol.

Sin embargo, como se observa en la gráfica 4, las muestras con un 40 % y 50 % de metanol respecto al volumen de aceite generan la mayor producción de biodiésel en función del porcentaje de metanol utilizado. No obstante, se considera que la muestra con un 40% es más viable, ya que la muestra con un 50 % solo produce 1 ml más.



Grafica 4 Producción de biodiésel en función de la variación de metanol

Los resultados de la producción de biodiésel se presentan en la tabla 15, mostrando una comparación de la calidad del biodiésel mediante el aceite de mamey utilizando dos rutas de procesamiento.

Tabla 15 Características del biodiésel de aceite de mamey

	Transesterificación	Biodiésel (Esterificado y transesterificado)
Índice de acidez	4.9646	.4965
Densidad a 15°C ρ_{15}	867.23	873.23
Viscosidad cinemática ν	7.79	7.71
Temperatura de inflamación °C	160	162

Índice de acidez.

La transesterificación directa resultó en un índice de acidez de 4.96 mg KOH/g, mientras que el proceso de esterificación previa a la transesterificación reduce drásticamente el índice de acidez a 0.49 mg KOH/g.

Densidad

Aumenta ligeramente con el pretratamiento de esterificación, pasando de 867.23 Kg/m³ a 873.23 Kg/m³.

Viscosidad cinemática:

Se reduce marginalmente con el pretratamiento pasando de 7.79 mm²/s a 7.71 mm²/s.

Temperatura de inflamación:

Se mantiene prácticamente constante pasando de 160°C a 162°C.

4.5 Propiedades de los biodiéselos producidos

La tabla 16 presenta el resumen de los resultados y se comparan las propiedades fisicoquímicas de todos los biodiéselos producidos a partir de las semillas oleaginosas

Tabla 16 Propiedades de la calidad del biodiésel

	Mamey (Transesterificación)	Mamey (Esterificación previa a la transesterificación)	Toloache	Mango	Aguacate
Densidad 15°C	867.23	873.23	878	880	878.71
Viscosidad cinemática	7.79	7.71	4.0	4.48	4.3
Temperatura de inflamación	160	162	160	169	170
Índice de acidez	4.96	0.4965	0.5	0.4	0.51

Índice de acidez:

El biodiésel de mamey, incluso después de la esterificación presenta una viscosidad alta 7.71 mm²/s, los biodiéselos de toloache, mango y aguacate, presentan valores más bajos y similares de 4.0 mm²/s, 4.48 mm²/s, 4.3 mm²/s respectivamente. Es importante conocer que una viscosidad cinemática adecuada es importante para el buen desempeño del motor.

Temperatura de inflamación

El biodiésel de aguacate presenta la temperatura de inflamación más elevada de 170°C, mientras que el biodiésel de mamey y de toloache tienen un valor más bajo de 160°C, el intervalo aceptable para el biodiésel se encuentra en 160°C a 170°C.

4.6 Cromatografía de gases y espectrometría de masas

Mediante la técnica de cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC-MS), se determina la composición de las muestras, como muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Calidad de biodiésel a partir del aceite de las semillas oleaginosas

	Biodiésel de mamey	Biodiésel de mamey (Pretratado)	Biodiésel de toloache	Biodiésel de mango	Biodiésel de aguacate
Contenido de FAME (%)	89.68	93.64	96.23	84.53	83.11

El biodiésel producido a partir de aceite de toloache presenta mayor contenido de FAME (96.23%).

El biodiésel producido a partir de aceite de mamey previamente esterificado alcanza un contenido de FAME 93.64 % mayor a su transesterificación directa 89.68 %.

Los contenidos de FAME con menor porcentaje corresponden a el biodiésel de mango con 84.53 % y el biodiésel de aguacate 83.11 %.

Conclusiones

1. La semilla de mamey (*Pouteria sapota*) demostró ser la materia prima más prometedora, ya que se obtuvo un alto porcentaje de extracción de aceite, del 40,3 %, mediante el método de Soxhlet. Este porcentaje es comparable al de cultivos oleaginosos como la soja o el girasol.
2. El toloache (*Datura stramonium*) alcanzó un porcentaje de extracción de aceite del 23,6 %, valor considerado aceptable, ya que se sitúa entre el 16 % y el 25 % indicado en la bibliografía.
3. El rendimiento de aceite de la semilla de aguacate fuerte (*Persea americana*) es del 7,43 %, un valor superior al reportado en la bibliografía (1,87 %). Esto se debe al tipo de semilla.
4. Entre los aceites evaluados, el de mamey es el único que tiene un índice de acidez bajo, de 1,84 mg KOH/g, por debajo del umbral de 2,5 % reportado en la bibliografía, por lo que se sugiere que se puede realizar el proceso de transesterificación directa.
5. En comparación con un horno convencional, la implementación de la parábola solar para el proceso de deshidratación de semillas reduce drásticamente el tiempo de secado, hasta en un 80 %.
6. La transesterificación directa del aceite de mamey produce un índice de acidez de 4,96 mg/KOH. Sin embargo, si se realiza primero un proceso de esterificación, este valor se reduce significativamente a 0,4965 mg KOH/g, obteniendo un biocombustible que cumple los estándares de calidad.
7. El biodiésel producido a partir de aceite de toloache presenta un mayor contenido de ésteres metílicos de ácidos grasos, con un 96,23 %, que se cuantificó mediante la técnica analítica de cromatografía de gases.

Bibliografía

- Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. (n.d.). Retrieved July 11, 2025, from https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Anwar, M. (2021). Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects. *Fuel*, 283, 119204. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119204>
- Asadollahi, M. A. (2024). *Sustainable Production of Biobutanol and Biodiesel from Municipal Solid Waste: Optimization and Process Integration*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4875866>
- Asfaw, M. D., Yadeta, A. T., Yewalie, B. G., & Negash, Y. W. (2025). Production and characterization of biodiesel from Argemone mexicana seed oil. *Results in Chemistry*, 13, 102055. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102055>
- Aslan, V. (2023). Fuel characterization, engine performance characteristics and emissions analysis of different mustard seed biodiesel: An overview. *Journal of Biotechnology*, 370, 12–30. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.05.006>
- Bajpai, D., & Tyagi, V. K. (2006). Biodiesel: Source, Production, Composition, Properties and Its Benefits. *Journal of Oleo Science*, 55(10), 487–502. <https://doi.org/10.5650/jos.55.487>
- Balat, M., & Balat, H. (2010). Progress in biodiesel processing. *Applied Energy*, 87(6), 1815–1835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.01.012>
- Banković-Ilić, I. B., Stamenković, O. S., & Veljković, V. B. (2012). Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3621–3647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.002>

- Bora, P. S., Narain, N., Rocha, R. V. M., & Paulo, M. Q. (2001). Characterization of the oils from the pulp and seeds of avocado (cultivar: Fuerte) fruits. *Grasas y Aceites*, 52(3–4), 171–174. <https://doi.org/10.3989/gya.2001.v52.i3-4.353>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Córdova Córdova A. M & Mendoza Mendoza, C. H. (2021). Revisión de literatura sobre el aprovechamiento de la semilla de mango para la extracción de aceite y sus potenciales aplicaciones en diversas industrias. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2021.n41.5547>
- Ebrahimian, E., Seyyedi, S. M., Bybordi, A., & Damalas, C. A. (2019). Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. *Agricultural Water Management*, 218, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.031>
- Hoque, E., Emon, M. I. H., Anik, Md. T., Islam, M. A., Hasan, I., Ahmed, T., Arif, Z. U., Hossain, M., & Ismail, M. (2025). A Review of non-edible indigenous seeds feedstock in Bangladesh for biodiesel: Production, fuel properties and combustions performance. *Green Technologies and Sustainability*, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100240>
- Huang, B., Liu, H., Fang, Y., Miao, L., Qin, L., Sun, Z., Qi, F., Chen, L., Zhang, F., Li, S., Zheng, Q., Shi, L., Wu, J., Dong, W., & Zhang, X. (2025). Identification of oil content QTLs on Arahy12 and Arahy16, and development of KASP markers in cultivated peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 24(6), 2096–2105. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.11.010>

- Iano, Y., Arthur, R., Saotome, O., Vieira Estrela, V., & Loschi, H. J. (Eds.). (2019). *Proceedings of the 4th Brazilian Technology Symposium (BTSym '18): Emerging Trends and Challenges in Technology* (Vol. 140). Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-16053-1>
- Kabutey, A., Mizera, Č., & Herák, D. (2024). Evaluation of percentage oil yield, energy requirement and mechanical properties of selected bulk oilseeds under compression loading. *Journal of Food Engineering*, *360*, 111719.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111719>
- Kephe, P. N., Mkuhlani, S., Rusere, F., & Chemura, A. (2024). Use of modelling tools to assess climate change impacts on smallholder oil seed yields in South Africa. *PLOS ONE*, *19*(5), e0301254. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301254>
- Kirrolia, A. S., Bishnoi, N. R., Kumar, A., & Brindhadevi, K. (2025). Response surface methodology as a statistical tool for optimization and FAME profile by GC-MS for assessing microalgae *Scenedesmus quadricauda* as a potential biodiesel feedstock. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *166*, 105415.
<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105415>
- Knothe, G., & Razon, L. F. (2017). Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, *58*, 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>
- Lie, J., Rizkiana, M. B., Soetaredjo, F. E., Ju, Y.-H., & Ismadji, S. (2018). Production of biodiesel from sea mango (*Cerbera odollam*) seed using in situ subcritical methanol–water under a non-catalytic process. *International Journal of Industrial Chemistry*, *9*(1), 53–59. <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0138-3>

- Mahmudul, H. M., Hagos, F. Y., Mamat, R., Adam, A. A., Ishak, W. F. W., & Alenezi, R. (2017). Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 497–509.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001>
- Melikoglu, M. (2025). Sustainable biodiesel production: Forecasting agricultural waste utilization in Türkiye’s oilseed industry. *Biomass and Bioenergy*, 199, 107953.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107953>
- Mirdoraghi, M., Maleki Farahani, S., & Rezazadeh, A. (2024). Oilseeds in intercropping systems: Strategies to increase oil quality and fatty acid profile, a review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17, 101229. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101229>
- Mohd Nurfirdaus Bin Mohiddin, Yie Hua Tan, Yee Xuan Seow, Jibrail Kansedo, NM Mubarak, Mohammad Omar Abdullah, Yen San Chan, & Mohammad Khalid. (2021). Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 98, 60–81.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.036>
- Moo-Huchin, V., Estrada-Mota, I., Estrada-León, R., Cuevas-Glory, L. F., & Sauri-Duch, E. (2013). Chemical composition of crude oil from the seeds of pumpkin (*Cucurbita* spp.) and mamey sapota (*Pouteria sapota* Jacq.) grown in Yucatan, Mexico. *CyTA - Journal of Food*, 11(4), 324–327. <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.761652>
- Murat Reis Akkaya. (2018). (PDF) Fatty acid compositions of sunflowers (*Helianthus annuus* L.) grown in east Mediterranean region. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/328143287_Fatty_acid_compositions_of_sunflowers_Helianthus_annuus_L_grown_in_east_Mediterranea_region

- Namini, A. S., Jung, S., Altınçekiç, N. G., Noh, H., Khalilzadeh, M. A., Liu, Z., Varma, R. S., Jang, H. W., Kim, D., & Shokouhimehr, M. (2025). Utilization of sustainable nanocatalysts for the conversion of vulnerable waste oil into biodiesel. *Journal of Molecular Structure*, 1338, 142166. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142166>
- Naseef, H. H., & Tulaimat, R. H. (2025). Transesterification and esterification for biodiesel production: A comprehensive review of catalysts and palm oil feedstocks. *Energy Conversion and Management: X*, 26, 100931. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100931>
- Navarro-Flores, M. J., García-Pérez, C., Torres-Ramón, E., Rodríguez-Jimenes, G. C., & García-Alvarado, M. A. (2024). Modelación matemática de la extracción sólido-líquido de aceite de semillas de zapote mamey (*Pouteria sapota*) con hexano. *Journal of Food Engineering*, 368, 111910. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111910>
- Ozdemir, S., Ozer, H., Ozdemir, S., & Dede, O. H. (2025). Sustainable biodiesel production from oil crops: The impact of bio-nutrient recycling on yield and farmer technology acceptance. *Industrial Crops and Products*, 225, 120541. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120541>
- Pachiannan, T., Zhong, W., He, Z., Alharbi, S. A., & Brindhadevi, K. (2025). Assessing the performance, and emissions characteristics of a diesel engine fueled with soya seed biodiesel blended with oxy-hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 139, 1008–1014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.120>
- Pasha, M. K., Dai, L., Liu, D., Guo, M., & Du, W. (2021). An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 129. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01977-z>

- Prajapati, A. K., Mahajan, A., Jadhav, S. M., & Kumar, K. (2026). Fourth-generation (4G) biodiesel: Paving the way for a greener and sustainable energy future in emerging economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *225*, 116103.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116103>
- Savoire, R., Lanoisellé, J.-L., & Vorobiev, E. (2013). Mechanical Continuous Oil Expression from Oilseeds: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, *6*(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1007/s11947-012-0947-x>
- Sebayang, A. H., Ideris, F., Silitonga, A. S., Shamsuddin, A. H., Zamri, M. F. M. A., Pulungan, M. A., Siahaan, S., Alfansury, M., Kusumo, F., & Milano, J. (2023). Optimization of ultrasound-assisted oil extraction from *Carica candamarcensis*; A potential Oleaginous tropical seed oil for biodiesel production. *Renewable Energy*, *211*, 434–444.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.099>
- Shanthini, V. S., Chitra, D., & Ganesh Moorthy I. (2025). Biodiesel: A comprehensive review of properties, catalyst types, and feedstock sources. *Results in Chemistry*, *18*, 102678.
<https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102678>
- Sharif, I., Farooq, J., Chohan, S. M., Saleem, S., Kainth, R. A., Mahmood, A., & Sarwar, G. (2019). Strategies to enhance cottonseed oil contents and reshape fatty acid profile employing different breeding and genetic engineering approaches. *Journal of Integrative Agriculture*, *18*(10), 2205–2218. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62139-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62139-2)
- Subroto, E., Manurung, R., Heeres, H. J., & Broekhuis, A. A. (2015). Optimization of mechanical oil extraction from *Jatropha curcas* L. kernel using response surface method. *Industrial Crops and Products*, *63*, 294–302.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.050>

- Szymczyk, K., Zdziennicka, A., Jańczuk, B., Lubas, J., Jaworski, A., Kuszewski, H., Woś, P., Longwic, R., & Sander, P. (2025). Influencia del n -hexano en la adhesión y las propiedades volumétricas del aceite de canola. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *140*, 103990. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.103990>
- Tayib, Y. M., Al-Sheikh, F., Shakor, Z. M., & Anderson, W. A. (2024). Biodiesel production from fish oil: A review. *Biofuels*, *15*(1), 115–128. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2214417>
- Wang, R., Zhou, W.-W., Hanna, M. A., Zhang, Y.-P., Bhadury, P. S., Wang, Y., Song, B.-A., & Yang, S. (2012). Preparación, optimización y propiedades del combustible de biodiésel a partir de materia prima no comestible, *Datura stramonium* L. *Fuel*, *91*(1), 182–186. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.001>
- Yaşar, F. (2020). Comparison of fuel properties of biodiesel fuels produced from different oils to determine the most suitable feedstock type. *Fuel*, *264*, 116817. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116817>
- Yuldasheva, N. K., Kadirova, D. B., Ibotov, Sh. Kh., Gusakova, S. D., & Aripova, S. F. (2020). Lipids from Seeds of *Datura Stramonium*. *Chemistry of Natural Compounds*, *56*(2), 303–304. <https://doi.org/10.1007/s10600-020-03013-2>
- Zhang, M., Wang, O., Cai, S., Zhao, L., & Zhao, L. (2023). Composition, functional properties, health benefits and applications of oilseed proteins: A systematic review. *Food Research International*, *171*, 113061. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113061>
- Zhang, Y., Li, X., Lu, X., Sun, H., & Wang, F. (2021). Effect of oilseed roasting on the quality, flavor and safety of oil: A comprehensive review. *Food Research International*, *150*, 110791. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110791>

