



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Energía Renovable

Estudio del potencial del corozo [*Attalea guacuyule*
(Liebmann. Ex Mart.) S. Zona] como materia prima para la
producción de biodiesel

Tesis que presenta

NANCY GUADALUPE EB REJÓN

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida, Yucatán. Octubre 2012

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presentación Declaración.

Mérida, Yucatán, México.

Octubre de 2012

I.Q. Nancy Guadalupe Eb Rejón

El trabajo de tesis titulado “Estudio del potencial del corozo [*Attalea guacuyule* (Liebmann Ex Mart.) S. Zona] como materia prima para la producción de biodiesel”, fue desarrollado por la estudiante Nancy Guadalupe Eb Rejón en el laboratorio USF15 de la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Luis Felipe Barahona Pérez y del Dr. Roger A. Orellana Lanza, en el programa de Maestría en Ciencias en Energía Renovable de este Centro.

Dr. Oscar A. Moreno Valenzuela
Director Académico
Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a MIS PADRES, pilares fundamentales en mi vida, quienes me han enseñado a encarar las adversidades sin perder la dignidad ni desfallecer en el intento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi capacidad. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir, no solo para mí, sino también para mis hermanos. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con todo mi corazón y este trabajo es para ustedes.

A MIS HERMANOS: Jael, Sugelly y Jesús por confiar en mí, logro que comparto con ustedes. Los amo mucho.

Agradecimientos

La presente Tesis es un esfuerzo colectivo, en donde participaron varias personas directa o indirectamente. Por ello, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial, al Dr. Luis Felipe Barahona Pérez y al Dr. Roger A. Orellana Lanza, directores de este trabajo, por sus valiosos aportes, orientación, dedicación constante, supervisión continua y confianza depositada en mí, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos dos años que me llevaron a la culminación de este proyecto.

Al Dr. Javier Orlando Mijangos Cortés y al M. en C. Gerardo Rivera Muñoz por su disponibilidad, paciencia, dedicación y observaciones acertadas que permitieron que el trabajo fuera enriquecido. Muchas gracias.

A la Dra. Virginia A. Herrera Valencia y al M. en C. Luis Felipe Carrillo Lara por sus recomendaciones, sugerencias y observaciones que permitieron un mejor enfoque y desarrollo en la elaboración de la tesis. Gracias.

Agradezco también, el apoyo y ayuda recibida por los técnicos del laboratorio: Q.I. Tanit Toledano Thompson y al M. en C. Jorge A. Domínguez Maldonado por su paciencia, disponibilidad y generosidad para compartir su experiencia y conocimiento en las técnicas empleadas y el manejo de equipos de laboratorio. Su colaboración fue de gran ayuda para esta tesis. Se agradece a la Dra. Celene Espadas por haber proporcionado el mapa de distribución de la especie en estudio y a Wilbert Canché Pacheco por su colaboración en el proyecto. Gracias.

Al CICY y en especial a la Unidad de Energía Renovable por proporcionar las instalaciones para llevar a cabo el presente proyecto. Al CONACYT por la beca No. 59245 otorgada para los estudios de maestría.

Gracias también a mis queridos amigos, que me apoyaron y me permitieron convivir con ellos a lo largo de estos años, demostrándome siempre su cariño, forjando una gran amistad: Mayra Chim, Denise Gutiérrez, Freddy Navarro, Francisco Del Río, Aldo Contreras, Javier Barrón, Marilyn Pat, Lifter Ricalde, Miguel Canseco, Anahí Arriaga, Roberto Us, Alberto Zumárraga, y al gran equipo del laboratorio de biocombustible: Elda May, Viviana Puc, Merly Arguello, Jesús Huitzil, David Vega, Antonio Rodríguez, gracias por su apoyo y ayuda. ¡Mil gracias chicos!.

Sin embargo, todo esto no hubiese sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia. A mis padres, Nancy y Guadalupe, por su ejemplo de lucha y honestidad, por enseñarme a superarme cada día; a mis hermanos Jael, Sugelly y Jesús por su paciencia, apoyo, cariño y confianza depositada.

¡Muchas gracias!.

“El éxito no es la clave de la felicidad. La felicidad es la clave del éxito“

(Albert Schweitzer 1875- 1965)

Índice general

Índice general	i
Índice de tablas	iv
Índice de figuras	v
Resumen	vii
Abstract.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
ANTECEDENTES	3
1.1. Situación energética.....	3
1.2. Los biocombustibles como alternativa	4
1.3. Historia del biodiesel como combustible.....	5
1.4. Aceites vegetales considerados como materia prima para la producción de biodiesel.....	6
1.5. Biodiesel	8
1.6. Transesterificación.....	9
1.6.1. Catálisis básica	10
1.6.2. Catálisis ácida.....	11
1.6.3. Catálisis enzimática.....	11
1.7. Propiedades y características del biodiesel	11
1.8. Ventajas y desventajas del biodiesel.....	13
1.8.1. Ventajas.....	13
1.8.2. Desventajas.....	14
1.8.3. Medidas de mitigación	14
1.9. Taxonomía de la palmera de corozo [<i>Attalea guacuyule</i> (Liebman. Ex Mart.) S. Zona].....	15
1.9.1. Morfología.....	16
1.9.2. Factores climatológicos y edáficos	19
1.9.3. Plantación.....	21
1.9.3.1. Desmonte y preparación del terreno.....	21

1.9.3.2. Mantenimiento del cultivo	24
1.9.4. Industrialización y comercialización.....	26
1.10. Especie de prospección: palmera coyol real [<i>Attalea liebmannii</i> (Becc.) S. Zona]	27
1.10.1. Taxonomía.....	27
1.10.2. Distribución geográfica.....	29
1.11. Justificación	30
1.12. Hipótesis	32
1.13. OBJETIVOS	33
1.13.1. Objetivo General	33
1.13.2. Objetivos Específicos.....	33
CAPÍTULO II.....	34
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
2.1. Estrategia Experimental.....	34
2.2. Materia prima.....	36
2.3. Variables evaluadas del fruto de la palmera de corozo.....	37
2.3.1. Peso del fruto.....	37
2.3.2. Diámetro del fruto	37
2.3.3. Longitud del fruto.....	37
2.4. Secado y molienda de la semilla.....	37
2.5. Obtención del aceite y caracterización	38
2.6. Síntesis del biodiesel.....	38
2.7. Caracterización físico-química	40
2.7. 1. Medición de la densidad.....	40
2.7.2. Medición del número de acidez	40
2.7.3. Medición de la viscosidad.....	41
2.7.4. Análisis cromatográfico	42
2.7.4.1. Cromatografía en capa fina	42
2.7.4.2. Cromatografía de gases	43
2.7.4.3. Cromatografía de gases-espectrometría masas (GC-MS)	43
2.8. Estimación de la producción de biodiesel.....	43

2.9. Análisis estadístico	44
CAPÍTULO III	45
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1. Caracterización morfológica del fruto	45
3.2. Rendimiento de la copra	46
3.3. Rendimiento de aceite.....	46
3.4. Caracterización físico-química del aceite	47
3.5. Rendimiento del biodiesel	50
4.6. Caracterización físico-química del biodiesel.....	53
4.7. Análisis cromatográfico.....	54
4.7.1. Cromatografía en capa fina	54
4.7.2. Cromatografía de gases-masas	55
4.7.3. Cromatografía de gases	58
4.8. Producción y caracterización del fruto de la palmera coyol real [<i>Attalea liebmannii</i> (Becc.) S. Zona]	61
4.9. Estimación de producción y rendimiento	68
4.10. Área potencial de cultivo de la palmera de corozo en la península de Yucatán	69
CONCLUSIONES.....	71
PERSPECTIVAS	73
BIBLIOGRAFÍA	74

Índice de tablas

Tabla 1. 1. Aceites utilizados para la producción de biodiesel.....	6
Tabla 3. 1. Caracterización morfológica del fruto de la palmera de corozo.....	45
Tabla 3. 2. Peso y humedad de la copra de la palmera de corozo.	46
Tabla 3. 3. Rendimiento de aceite por etapa de madurez del fruto de la palmera de corozo.	46
Tabla 3. 4. Caracterización físico-química del aceite de corozo obtenido en diferentes etapas de madurez del fruto de la palmera de corozo.....	47
Tabla 3. 5. Rendimiento de aceite por etapa de madurez (2 ^a extracción).....	48
Tabla 3. 6. Caracterización físico-química del aceite de corozo obtenido en diferentes etapas de madurez del fruto de la palmera de corozo.....	49
Tabla 3. 7. Rendimiento de biodiesel a partir de aceite de corozo, usando 1% p/p de KOH como catalizador.....	50
Tabla 3. 8. Rendimiento de biodiesel a partir del aceite de corozo, con concentraciones diferentes de KOH como catalizador.	51
Tabla 3. 9. Caracterización físico-química del biodiesel de corozo.....	53
Tabla 3. 10. Perfil lipídico del biodiesel del aceite de la palmera corozo.....	57
Tabla 3. 11. Composición de ésteres metílicos de ácidos grasos	60
Tabla 3. 12. Composición de ésteres metílicos de ácidos grasos	60
Tabla 3. 13. Peso y humedad de la copra de la palmera coyol real.....	61
Tabla 3. 14. Rendimiento de aceite de la palmera coyol real.....	61
Tabla 3. 15. Caracterización físico-química del aceite de la palmera coyol real.	62
Tabla 3. 16. Rendimiento de biodiesel a partir de aceite de la palmera coyol real, usando 2% p/p de KOH como catalizador.....	62
Tabla 3. 17. Caracterización físico-química del biodiesel obtenido a partir de aceite de la palmera coyol real.	62
Tabla 3. 18. Perfil lipídico del biodiesel del aceite de la palmera coyol real.	65
Tabla 3. 19. Composición de ésteres metílicos de ácidos grasos de biodiesel de la palmera coyol real.	66

Índice de figuras

Figura 1. 1. Producción mundial de energía primaria en 2009 [6].	3
Figura 1. 2. Rendimiento de productividad de aceite a partir de diversas fuentes de materia prima para la producción de biodiesel [33].	7
Figura 1. 3. Reacción de transesterificación.	9
Figura 1. 4. Reacciones consecutiva de transesterificación. R_1 , R_2 , R_3 y R' representan grupos alquilo.	10
Figura 1. 5. Palmera de corozo (<i>A. guacuyule</i>).	16
Figura 1. 6. Hojas de la palmera de corozo	17
Figura 1. 7. Inflorescencia de la palmera corozo.	18
Figura 1. 8. Tamaño y composición del fruto de la palmera corozo [107].	18
Figura 1. 9. Distribución de la palmera corozo. a) en la República Mexicana y América Central [71]; b) en la península de Yucatán (mapa proporcionado por C. Espadas, CICY).	20
Figura 1. 10. Sistema de siembra al “tresbolillo”	22
Figura 1. 11. Croquis de la siembra.	23
Figura 1. 12. Esquema metodológico de la producción de biodiesel a partir de la semilla del fruto de la palmera de corozo.	27
Figura 1. 13. Palmera coyol real (<i>A. liebmannii</i>).	28
Figura 2. 1. Etapas de la estrategia experimental.	34
Figura 2. 2. Esquema del proceso para la síntesis del biodiesel.	35
Figura 2. 3. Frutos de la palmera de corozo.	36
Figura 2. 4. Secado y molienda de la semilla.	37
Figura 2. 5. Aceites extraídos de la palmera de corozo.	38
Figura 2. 6. Separación de biodiesel y glicerina.	39
Figura 2. 7. Medición de la densidad	40
Figura 2. 8. Medición del número de acidez.	41
Figura 2. 9. Reómetro.	42

Figura 2. 10. Ejemplo de placa cromatográfica de capa fina: mezclas 1, 2, 3 y 4 de aceite de girasol y de colza [108]. Ésteres de metilo (BD), triglicéridos (TG), ácidos grasos libres (FA), diglicéridos (DG) y monoglicéridos (MG).	42
Figura 3. 1. Variación del rendimiento de biodiesel a partir de aceite de la palmera de corozo con respecto al tiempo de almacenamiento del aceite.	52
Figura 3. 2. Placas cromatográficas de capa fina. Aceite (A), Biodiesel de frutos maduros de corozo (B2), Glicerina de frutos maduros de corozo (G2), Biodiesel de frutos maduros-caídos de corozo (B3), Glicerina de frutos maduros-caídos de corozo (G3), (ME) Estándar Linoleato de metilo. Ésteres de metilo (BD), triglicéridos (TG), ácidos grasos libres (FA), diglicéridos (DG) y monoglicéridos (MG).	55
Figura 3. 3. Cromatograma de ion total (Gases-Masas) del biodiesel de corozo.	56
Figura 3. 4. Cromatograma de biodiesel de aceite de frutos semimaduros (B2) de corozo.	58
Figura 3. 5. Cromatograma de biodiesel de aceite de frutos senescentes (B3) de corozo.	59
Figura 3. 6. Placa cromatográfica de capa fina. Aceite (A), Biodiesel de frutos maduros de coyol real (BL), Glicerina de frutos maduros de coyol real (GL), (ME) Estándar Linoleato de metilo. Ésteres de metilo (BD), triglicéridos (TG), ácidos grasos libres (FA), diglicéridos (DG) y monoglicéridos (MG).	63
Figura 3. 7. Cromatograma de ion total (Gases-Masas) del biodiesel de la palmera coyol real.	64
Figura 3. 8. Cromatograma del biodiesel de aceite de frutos de la palmera coyol.	66
Figura 3. 9. Composición de ésteres metílicos de ácidos grasos de biodiesel de la palmera corozo y la palmera coyol real.	67
Figura 3. 10. Distribución potencial para la plantación de palmeras del género <i>Attalea</i> en la península de Yucatán (INEGI, 2004).	70

Resumen

Debido al inminente agotamiento del petróleo y la creciente preocupación en torno al calentamiento global (producido en parte por la emisión de gases de efecto invernadero), se han realizado propuestas para la reducción de la dependencia de los energéticos a base de petróleo y la problemática ambiental asociada. Una de las propuestas es el uso de los biocombustibles, considerados alternativas factibles, renovables y amigables con el ambiente. Actualmente, los aceites vegetales se utilizan como materia prima para la producción de biodiesel. Existen diversas fuentes de aceite vegetal, entre las que se pueden mencionar: la colza, la palmera africana, el piñón tropical, la canola, la soya, el girasol, etc. Al comparar la palmera africana y el cocotero con otros cultivos, sus rendimientos en términos de aceite por hectárea superan a las demás oleaginosas. Por ello, se sugiere que otros miembros de la familia de las palmeras (*Arecaceae*) pueden ser considerados como cultivos con un alto potencial como fuente de aceite. El género *Attalea*, que actualmente incluye también al género *Orbignya*, es un grupo de palmeras de gran importancia e interés por su contenido graso, que tiene además una composición lipídica similar al de la palmera africana y el cocotero. Dentro de este género se encuentra la palmera del corozo [*Attalea guacuyule* (Liebman. Ex Mart) S. Zona], de la cual no se dispone de información en la literatura acerca de la composición y rendimiento del aceite de las semillas que producen. El objetivo del presente trabajo fue determinar el potencial de la palmera de corozo como fuente de materia prima para la producción de biodiesel con base en el análisis de la composición química de los ácidos grasos predominantes en el aceite. También se determinó la densidad, número de acidez y viscosidad tanto del aceite extraído como del biodiesel producido a partir de éste, ya que estas propiedades son las más importantes para establecer un proceso de producción eficiente.

Como resultado, se obtuvo un rendimiento de aceite del 62.2% (p/p) de frutos senescentes de palmera de corozo, el cual es mayor que los reportados para la palmera africana (40-52% p/p). El máximo rendimiento de biodiesel obtenido fue de 74.43% (p/p) con las siguientes condiciones: 2% (p/p) de KOH como catalizador, 40% (v/v) de metanol, un tiempo de reacción de 90 min a una temperatura de 60 °C. De acuerdo al perfil lipídico, los ésteres

metílicos de ácidos grasos predominantes fueron los saturados de 12 y 14 carbonos (48.92 y 22.44% respectivamente) lo que debe conferir buena estabilidad oxidativa al biocombustible.

Además, se realizó una prospección comparativa con frutos senescentes de la palmera coyol real [*Attalea liebmanni* (Becc.) S. Zona] ya que pertenece al mismo género. Se encontró que el rendimiento de aceite y el perfil de ácidos grasos fueron similares en ambos casos, por lo que se puede considerar como otra opción para la producción de biodiesel.

Abstract

Due to the incipient oil reserves depletion and the increasing concern about global warming (produced in part by the greenhouse gas emissions), there have been proposals for the reduction on oil-based energy dependence and the associated environmental problems. One proposal is the use of biofuels, considered feasible, renewable and environmental friendly alternatives. Currently, vegetable oils are used as raw material for the production of biodiesel. There are various sources of vegetable oil, among these: rapeseed, african palm, tropical piñon, canola, soybean, sunflower, etc. Compared to other oleaginous crops, the African palm and coconut tree have yields of oil per hectare. For this reason, other members of the palm family (*Arecacea*) can be considered as crops with a high potential as oil source.

The genus *Attalea*, which also includes now the genus *Orbignya*, is a group of palm trees of great interest due to its oil content, which has similar composition to African palm and coconut tree. The corozo palm or cohune [*Attalea guacuyule* (Liebman. Ex Mart.) S. Zona], belongs to this genus and its oil yield and composition has not been reported in the literature.

The objective of this study was to determine the potential of corozo palm as a source of raw material for the production of biodiesel based on an analysis of the chemical composition of the predominant fatty acids in the oil. We also determined the density, viscosity and acid number of the extracted oil as biodiesel, as these properties are most important to establish an efficient process.

A yield of 62.2% oil (w / w) of senescent fruit which is greater than those reported for african palm (40-52% w / w). A maximal biodiesel yield of 74.43% (w/w) was obtained under the following conditions: 2% KOH (w/w) as catalyst, 40% (v/v) methanol, and a reaction time of 90 min at 60 °C. Saturated fatty acid methyl esters of 12 and 14 carbons were predominant (48.92 and 22.44%, respectively) according to the oil lipid profile. This confers the biofuel a good stability to undesired oxidation reactions.

A comparative study was carried out with senescent fruits of [*Attalea liebmannii* (Becc.) S. Zona]. The oil yield and fatty acids profiles were similar in both cases making this palm another option for biodiesel production.

INTRODUCCIÓN

Durante décadas, la preocupación por los problemas ambientales y la calidad de vida en el planeta han sido consideradas muy importantes. Sin embargo, la utilización de combustibles a base de petróleo, la limitación actual de estos recursos, el incremento en los precios y en su demanda; así como el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero han contribuido significativamente al deterioro de esta situación.

Por ello, las fuentes alternativas de energía han acaparado la atención de la sociedad en los últimos años, siendo ésta una opción tanto para el crecimiento económico y sostenible de los países, así como para una coexistencia armoniosa con el medio ambiente. Una de las propuestas para contribuir a mejorar esta situación, es la de los biocombustibles, los cuales ofrecen generalmente muchas ventajas, incluida la sostenibilidad, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mejora de la estructura social y agrícola, seguridad del suministro energético y desarrollo regional [1].

El biodiesel, en particular, es el combustible que presenta un gran potencial, debido a que tiene propiedades similares al diesel, además de que es obtenido a partir de fuentes renovables como son los aceites vegetales (comestibles y no comestibles), aceites residuales y grasas animales. Este es obtenido por diversos procesos, siendo el de transesterificación el más usado, debido a sus altos rendimientos, bajos consumos energéticos, disminución en el gasto de materias primas y tiempos cortos de producción.

Actualmente los cultivos que destacan como fuentes principales de aceite son: la soya, la semilla de girasol, el algodón, el maní, la colza y la palmera africana [2]. Sin embargo, éste último ha tenido un impacto significativo en el mercado mundial por su gran potencial como materia prima para la producción de biodiesel, con un factor de producción de aceite de diez veces más de rendimiento que los aceites de soya, girasol o de colza [3]. Es evidente entonces que la familia de las palmeras (*Arecaceae*) continuará aumentando en importancia en las regiones tropicales para la generación de aceites.

En América Latina, un grupo de palmeras de gran importancia económica es el género *Attalea* (dentro del cual el género *Orbignya* ha quedado incluido). Dentro de este género se encuentra la palmera de corozo [*Attalea guacuyule* (Liebman. Ex Mart.) S. Zona], conocido genéricamente como corozo, cohune palm o manaca, de la cual sus frutos han sido utilizados para la producción de una gran variedad de productos. En especial, el aceite tiene una composición similar a la semilla de la palmera africana y al cocotero, los cuales pueden ser usados para fines comestibles ó industriales y también como una fuente de combustible. Además, una ventaja importante a considerar es la producción de una gran cantidad de frutos [4], cada individuo adulto puede producir hasta una tonelada de semillas anualmente, lo cual es una cifra estimulante ante la necesidad de desarrollar nuevas fuentes de aceite y combustible.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente y con la finalidad de impulsar el desarrollo de este tipo de energía renovable, se ha desarrollado el presente proyecto con el propósito de realizar un estudio del perfil de ácidos grasos contenidos en los aceites que produce el fruto de la palmera de corozo para determinar el potencial que esta planta tiene como fuente de materia prima para la obtención de biodiesel y de esta manera, contribuir a la reducción de la explotación petrolera y a la dependencia de carburantes fósiles.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Situación energética

La generación masiva de electricidad comenzó a finales del siglo XIX y la creciente sucesión de aplicaciones que esta disponibilidad produjo hizo de la electricidad una de las principales fuerzas motrices de la revolución industrial. Es por ello que se ha convertido en una de las formas de energía más importantes para el desarrollo tecnológico, debido a su facilidad de generación y distribución, además de su gran número de aplicaciones en todos los campos como la iluminación, transporte, telecomunicaciones e informática [5]. Para satisfacer estos requerimientos se utilizan diferentes fuentes de energía para la generación de estos servicios, en donde los combustibles fósiles representan el 88% del aporte de energía primaria, con el 35% de petróleo, 29% carbón y 24% gas natural como principales combustibles, mientras que la energía nuclear y la hidroeléctrica se encuentran con el 5% y 6% del consumo total de energía primaria respectivamente. Figura 1.1 [6].

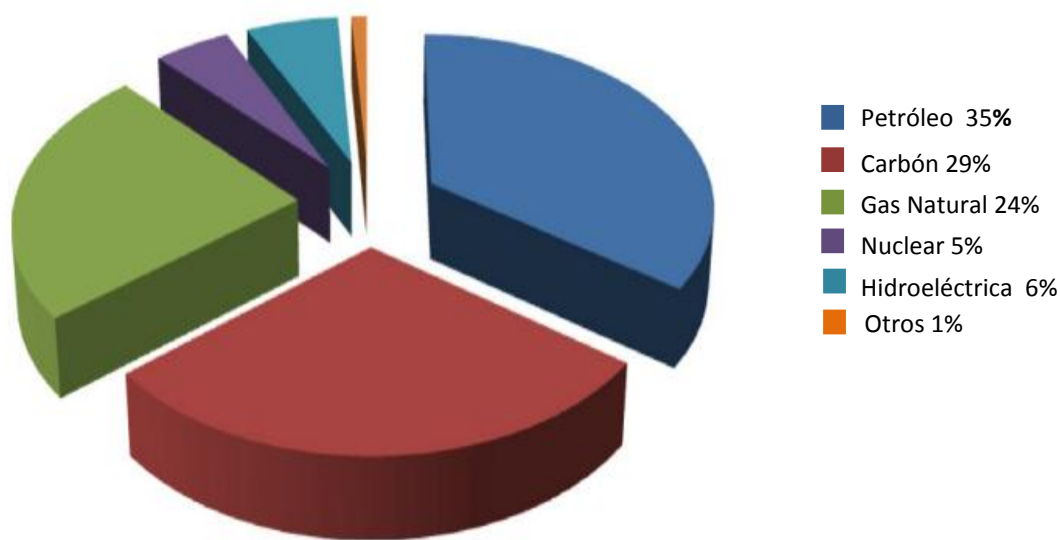


Figura 1. 1. Producción mundial de energía primaria en 2009 [6].

De acuerdo con la Administración de Información de la Energía, las estimaciones actuales en todo el mundo de las reservas de petróleo y gas natural se estiman en 1,341 mil millones

de barriles y de 6,289 billones de pies cúbicos, respectivamente [7]. El mundo consume un total de 85.4 millones de barriles por día de petróleo y 107.2 millones de pies cúbicos diarios de gas natural [8]. A los niveles de consumo actual, las reservas mundiales de petróleo se agotarán en 40 años, y las de gas natural en 60 años.

Por otro lado, las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) que atrapan el calor en la atmósfera han aumentado significativamente durante el último siglo debido a la quema de combustibles fósiles, como petróleo y carbón, junto con la deforestación y el cambio de uso del territorio. Como resultado, la temperatura media de la superficie de la Tierra está aumentando a un ritmo alarmante [9].

1.2. Los biocombustibles como alternativa

Con el agotamiento de los recursos fósiles por un lado, y la problemática del cambio climático por otro, la búsqueda de alternativas para contribuir a la solución del problema energético ha cobrado cada vez más importancia, siendo la propuesta de los biocombustibles a partir de la biomasa una solución al problema energético [10]. Estos se definen como aquellos combustibles que son obtenidos a partir de biomasa en condiciones ambientales de presión y temperatura, los cuáles pueden ser líquidos como el biodiesel, el etanol y el metanol; y gaseosos como el hidrógeno y el metano [10]. Suelen emplearse en calderas para la producción de calor y electricidad o en motores de combustión interna, en cuyo caso se denominan biocarburantes [11].

Los biocarburantes son combustibles de origen biológico, tales como leña, turba, carbón vegetal, estiércol de ganado, biogás, biohidrógeno, bioalcohol, biomasa microbiana, residuos agrícolas y los cultivos energéticos, entre otros [12]. La primera rama de los biocarburantes la constituye el bioetanol obtenido de materias primas azucaradas (caña de azúcar, remolacha), amiláceas (maíz, yuca) o la de celulosa de necromasa. La segunda rama, en la cual se centra la investigación de este trabajo, está constituida por el biodiesel, obtenido inicialmente a partir de plantas oleaginosas convencionales, tales como la palmera africana, la soya, la colza; o a partir de oleaginosas alternas (piñón tropical, higuera etc.), así como de aceites residuales de la industria alimentaria [13].

1.3. Historia del biodiesel como combustible

La idea de usar aceites vegetales como combustibles se conoce desde hace tiempo. Esta posibilidad fue justificada por primera vez en 1853 por E. Duffy y J. Patrick quienes realizaron el proceso de transesterificación por primera vez al trabajar en la obtención de jabón. Seguidamente, la primera prueba del funcionamiento de un motor con aceite vegetal a partir de aceite de maní (cacahuete) se llevó a cabo por R. Diesel en 1893, la cual se demostró en la Exposición Internacional de París, en 1900 [14]. En 1912, Diesel ofreció un discurso en el que comentó: "El uso de aceite vegetal como combustible para los coches puede parecer insignificante hoy en día, pero los aceites, con el tiempo pueden llegar a ser tan importantes como el carbón y los productos derivados del petróleo actual" [15]. Posteriormente, debido a los altos precios, la demanda de biocombustibles fue bastante baja y el interés por su uso se revivió sólo durante las crisis de energía durante y después de la Segunda Guerra Mundial y también durante la crisis energética entre 1970-1980.

Paradójicamente, el resurgimiento de la idea de Diesel de emplear aceites vegetales en sus motores, cobró fuerza nuevamente hacia finales del siglo XX, esta vez bajo la forma de biodiesel (que no es sino aceite vegetal modificado) impulsado principalmente por preocupaciones ambientales relacionadas con el cambio climático y la necesidad de encontrar alternativas al uso de combustibles fósiles [16].

Fue con el gran aumento de los precios del petróleo a partir del 2004, y en julio de 2008 (133.90 dólares el barril de Brent [17]) que los precios de los aceites vegetales y las grasas animales se equipararon con los del diesel y generaron este reciente repunte de los biocombustibles líquidos a nivel mundial, que incluye también al bioetanol, el cual puede utilizarse como complemento o sustituto de la gasolina.

1.4. Aceites vegetales considerados como materia prima para la producción de biodiesel

Más del 95% de la producción mundial de biodiesel se obtiene utilizando como materia prima aceite de plantas oleaginosas, por ejemplo: el girasol y la colza en Europa, la soya en Estados Unidos, el coco en Filipinas, la palmera africana en Malasia e Indonesia, entre otros [18]. A nivel mundial, existen más de 350 cultivos oleaginosos identificados como fuentes potenciales para la producción de biodiesel. En la tabla 1.1 se muestran algunos de los aceites más utilizados para la producción de biodiesel y el tipo de ácidos grasos libres que contienen.

Tabla 1. 1. Aceites utilizados para la producción de biodiesel. [19, 20, 21].

Aceite o grasa	Composición en ácidos grasos libres (% p/p)						
	Laúrico (12:0)	Mirístico (14:0)	Palmítico (16:0)	Esteárico (18:0)	Oleico (18:1)	Linoléico (18:2)	Linolénico (18:3)
Algodón (<i>G. hirsutum</i>)	0.1	0.7	20.1	2.6	19.2	55.2	0.6
Cocotero (<i>C. nucifera</i>)	46.5	19.2	9.8	3	6.9	2.2	-
Girasol (<i>H. annuus</i>)	-	-	6.08	3.26	16.93	73.73	-
Piñón tropical (<i>J. curcas</i>)	-	1.4	14.2	7	44.7	32.8	0.2
Babassu (<i>A. speciosa</i>)	44	17	8	4.5	14	2	-
Maní (<i>A. hypogaea</i>)	-	0.3	12.3	4.6	53.6	29	0.1
Soya (<i>G. max</i>)	-	-	10.58	4.76	22.52	52.34	8.19
Olivo (<i>O. europaea</i>)	-	-	11	3.6	75.3	9.5	0.3
Palmera africana (<i>E. guineensis</i>)	-	1	42.8	4.5	40.5	10.1	0.2

La amplia gama de materias primas disponibles para la producción de biodiesel representa uno de los factores más significativos de su producción [22, 23, 24]. En la medida de lo posible, la materia prima debe cumplir dos requisitos principales: bajos costos de producción y posibilidad de producción a gran escala. La disponibilidad de cierta materia prima para la producción de biodiesel depende del clima de la región, la ubicación geográfica, las condiciones locales del suelo y las prácticas agrícolas.

Por ejemplo, la Comunidad Europea es autosuficiente en la producción de aceite comestible e incluso tiene un exceso de producción para exportar [25, 26]. Por otro lado, la soya [27], [28] que se utiliza comúnmente en los Estados Unidos para los productos alimenticios, se ha destinado gran parte del aceite para la conversión en biodiesel, siendo la fuente principal en el país [29]. Del mismo modo los países con zonas costeras, tales como Malasia, Indonesia y Tailandia han utilizado el aceite de la palmera africana [30] y del cocotero [31] para la producción de biodiesel [32]. La figura 1.2 muestra el rendimiento de producción de aceite a partir de varias fuentes de materia prima [33].

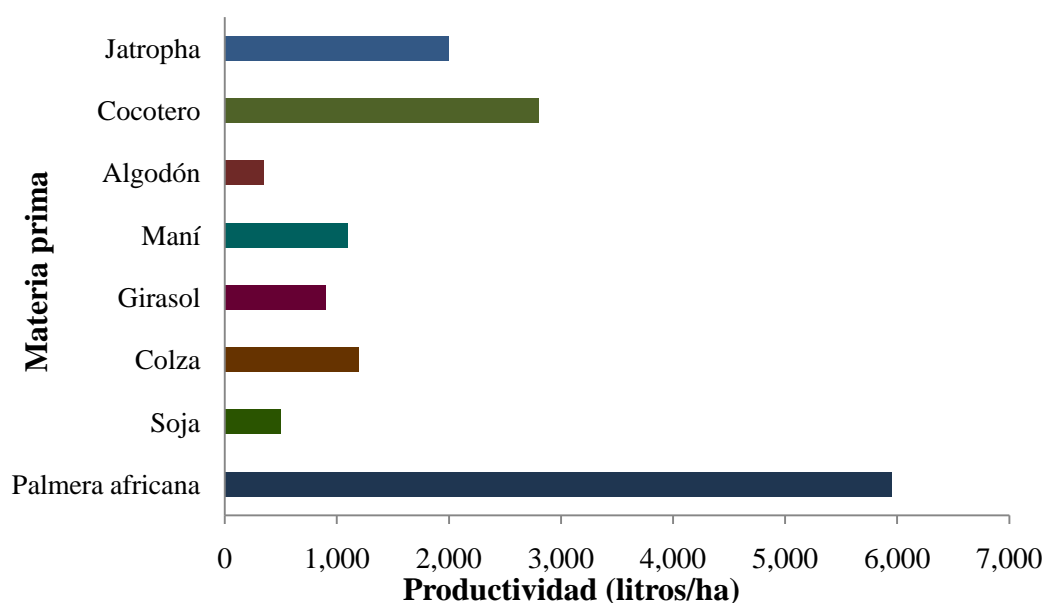


Figura 1. 2. Rendimiento de productividad de aceite a partir de diversas fuentes de materia prima para la producción de biodiesel [33].

De acuerdo a la figura anterior, la palmera africana es la planta oleaginosa más productiva, lo que la convierte en el cultivo más interesante para la producción de biodiesel, debido a su productividad de aceite de 5,950 litros por hectárea.

Además, la palmera africana es considerada como productora de uno de los aceites vegetales que contienen mayor cantidad de ácidos grasos con cadenas saturadas, después del aceite de coco. Ésta es una razón por la que no es recomendable para el consumo

humano, ya que podría formar deposiciones en las vías sanguíneas [34]. Según la Organización Mundial para la Salud (OMS), existe una íntima relación entre el tipo de grasas alimenticias y las enfermedades cardiovasculares. El consumo de grasas saturadas aumenta los niveles de colesterol y la presión arterial, lo que ocasiona enfermedades cardiovasculares que son la causa número uno de muertes en nuestro país [35].

Por otro lado, a nivel ambiental, se han realizado análisis del ciclo de vida (ACV) a varios tipos de biodiesel dando como resultado que el biodiesel a base de aceite de palmera africana puede reducir los gases de efecto invernadero (GEI) en un 62% en comparación con el aceite de soya (40%), aceite de colza (45%) y aceite de girasol (58%) [36].

1.5. Biodiesel

El biodiesel o FAME (Fatty Acid Methyl Ester, por sus siglas en inglés) es una alternativa de combustible renovable, más limpia que el diesel derivado del petróleo, producido a partir de aceites vegetales, comestibles y no comestibles, aceites reciclados, y grasas de origen animal [37], que puede ser usado total o parcialmente para reemplazar el combustible diesel de los motores de autoignición sin requerir una modificación sustancial de los mismos [38]. La introducción exitosa y comercialización del biodiesel en varios países del mundo se ha visto acompañada por el desarrollo de normas para garantizar la alta calidad del producto y la confianza de los usuarios. Algunas normas son la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) [39] y la Norma Europea (EN) [40].

La ASTM, define al biodiesel como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales, residuales o grasas animales. Químicamente, consiste en hacer reaccionar triglicéridos con un alcohol en presencia de un catalizador para producir glicerol y ésteres de ácidos grasos, proceso conocido como transesterificación [41].

A nivel mundial, hay muchos esfuerzos para desarrollar y mejorar las propiedades de los aceites vegetales con el fin de aproximarlos a las propiedades de los combustibles diesel. Se ha señalado que la alta viscosidad, baja volatilidad y el carácter poliinsaturado son los

problemas asociados, sobre todo con los aceites vegetales crudos. Estos problemas se pueden superar por cuatro métodos; dilución, pirólisis, mezcla con hidrocarburos, microemulsión, y transesterificación [42, 43, 44, 45, 46]. Esta última es la más utilizada, debido a que el proceso es relativamente sencillo y el producto (biodiesel) tiene propiedades muy similares al diesel de petróleo [47].

1.6. Transesterificación

La producción de biodiesel por transesterificación, hace referencia a una reacción catalizada donde mediante el uso de un alcohol, los triglicéridos son transformados a ésteres de metilo y glicerol como subproducto [48, 49, 50], como se puede observar en la figura 1.3.

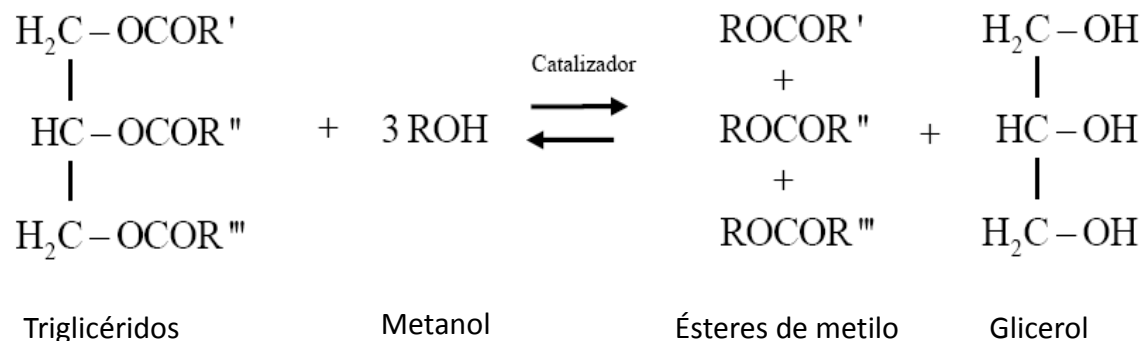


Figura 1. 3. Reacción de transesterificación.

La transesterificación consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas en la que se va esterificando cada uno de los ácidos grasos unidos al glicerol. El primer paso es la conversión de triglicéridos a diglicéridos, seguido por la conversión de diglicéridos a monoglicéridos y, finalmente, monoglicéridos a glicerina, produciéndose una molécula de éster por cada glicérido en cada paso (figura 1.4) [51]. Los productos en mayor proporción son los ésteres de ácidos grasos (biodiesel) y el glicerol (subproducto utilizado en la industria farmacéutica, alimenticia y de cosméticos).

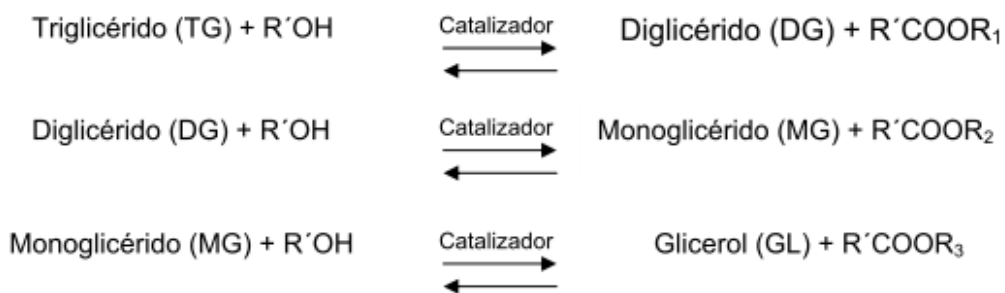


Figura 1. 4. Reacciones consecutiva de transesterificación. R₁, R₂, R₃ y R' representan grupos alquilo.

Generalmente se utiliza un catalizador para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento, y un exceso de alcohol para aumentar la conversión a ésteres. Entre los catalizadores más usados se encuentran los álcalis (NaOH, KOH, alcóxidos de sodio y potasio, carbonatos, etc.), ácidos (HCl, H₃PO₄, H₂SO₄, ácidos sulfónicos, etc.) y las enzimas (lipasas).

1.6.1. Catálisis básica

La transesterificación básica homogénea es el proceso preferido por la industria para la producción de biodiesel. Generalmente es más rápida y menos costosa cuando la comparamos con la ácida u otros tipos de catalizador. Las bases fuertes como el NaOH y el KOH son los catalizadores más usados [52]. Estos hidróxidos presentan altas conversiones a condiciones moderadas y tiempos de reacción cortos, además son menos corrosivos para los equipos industriales y requieren pequeños volúmenes de alcohol, lo que representa reactores económicos y de menor tamaño [53, 54, 55]. La desventaja de estos catalizadores básicos es la formación de jabón cuando el aceite contiene altas cantidades de ácidos grasos libres y de agua [49]. La transesterificación básica procede 4,000 veces más rápido que cuando se usa la misma cantidad de catalizador ácido [46, 49] y por tal motivo es la más usada a nivel comercial.

1.6.2. Catálisis ácida

La transesterificación ácida es mucho más lenta, se debe utilizar un mayor exceso de alcohol y de condiciones más severas de temperatura y presión [56]. Se requiere alrededor de 20 horas para alcanzar una conversión completa de los triglicéridos a 77 °C. Las condiciones comunes de operación comprenden una relación molar alcohol-aceite de 30:1, la cual es muy alta en relación con la transesterificación básica, lo que incrementa la capacidad de los equipos y el costo de la recuperación de alcohol [57, 58].

Los ácidos más utilizados son los ácidos fosfórico, sulfúrico, sulfónico y clorhídrico [59]. Al igual que la catálisis básica, la reacción es fuertemente afectada por la presencia de agua, disminuyendo el rendimiento de la transesterificación [56, 60].

1.6.3. Catálisis enzimática

Los catalizadores enzimáticos como las lipasas son capaces de catalizar la transesterificación de los triglicéridos [59]. Tienen la ventaja de ser reutilizables y hacer que el glicerol sea fácilmente eliminado, convierten los ácidos grasos libres en ésteres y no son inhibidas por la presencia de agua. Sin embargo, el metanol o el glicerol pueden inactivar las enzimas al acumularse, pero su mayor inconveniente es que los costos de producción de las lipasas son mayores que los catalizadores alcalinos o los ácidos [61, 62, 63, 64].

1.7. Propiedades y características del biodiesel

Los avances en la calidad del biodiesel se están mejorando a nivel mundial para mantener la calidad del producto final y asegurar un mejor criterio de almacenamiento de éste, de igual manera para asegurar la confianza de los consumidores y la comercialización exitosa del biodiesel [43, 65].

En la actualidad, las propiedades y cualidades del biodiesel deben cumplir con las especificaciones internacionales de biodiesel. Estas especificaciones incluyen las normas

ASTM 6751 o la EN 14214, normas para el combustible biodiesel [24]. Algunas de estas propiedades incluyen:

- **Punto de inflamación:** Este parámetro generalmente se determina para satisfacer temas legales de seguridad. También es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol que no reaccionó en el proceso de obtención del biodiesel.
- **Viscosidad:** Debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible.
- **Densidad:** Da idea del contenido en energía de combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible.
- **Azufre:** Contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente en importancia dependiendo en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor. También puede afectar al funcionamiento del sistema de control de emisiones y a límites ambientales.
- **Número de cetano:** Es una medida de la calidad de ignición de un combustible e influye en las emisiones de humo y en la calidad de combustión. El número de cetano depende del diseño y tamaño del motor, de las variaciones de carga, velocidad, condiciones de arranque y atmosféricas.
- **Punto de nube:** Indica la temperatura a la cual empiezan a precipitar ciertos compuestos del combustible (parafinas, materia insaponificable). Es una medida muy importante a tener en cuenta cuando se usa el motor en climas fríos.
- **Número de acidez:** Determina el nivel de ácidos grasos que presenta el combustible, o que fueron generados por degradación. Si posee un alto grado de acidez se formará una cantidad importante de depósitos y también se producirá mayor corrosión en el sistema.
- **Glicerina total:** Determina el nivel de glicerina enlazada y no enlazada presente en el combustible. Niveles bajos significan que se ha producido un alto grado de conversión en el aceite o grasa, y se ha formado gran cantidad de ésteres. Además, aumentan la viscosidad del biodiesel.

- Estabilidad a la oxidación: Se determina la vida útil y la degradación potencial de un combustible durante su almacenamiento. La oxidación de un combustible suele venir acompañada de la formación de gomas solubles e insolubles que pueden afectar a los filtros, a la punta del inyector y también fallas en las boquillas de los inyectores.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es la mezcla del biodiesel, debido que puede usarse puro o mezclado con el diesel fósil. Esto hará que las propiedades diferentes entre ellos se igualen [66].

1.8. Ventajas y desventajas del biodiesel

1.8.1. Ventajas

Es importante y necesario conocer las ventajas del biodiesel en comparación con el combustible diesel; dentro de éstas se encuentran [67]:

- El biodiesel tiene un 10-11% de oxígeno, lo que lo hace un combustible con características de alta combustión.
- Reduce considerablemente las emisiones de dióxido de carbono (en un 78%) sobre la base del ciclo de vida en comparación con el combustible diesel convencional.
- Es renovable, no tóxico, no inflamable, fácilmente disponible, es biodegradable, sostenible, ecológico y libre de contenido de azufre y aromáticos.
- Tiene un buen potencial para la generación de empleo rural.
- Tiene mayor número de cetano (alrededor de 60-65 dependiendo del aceite vegetal) que el diesel de petróleo (53), lo cual reduce el retardo de la ignición.
- Tiene mejores propiedades de lubricidad. Esto mejora la lubricación en las bombas de combustible y las unidades de inyección; y disminuye el desgaste del motor aumentando su eficiencia.

- Es seguro en su transporte, manipulación, distribución, utilización y almacenamiento debido a su punto de inflamación superior (por encima de 100 a 170°C) que el diesel de petróleo (60-80°C).

1.8.2. Desventajas

Sin embargo, el biodiesel también tiene una serie de desventajas como [67]:

- El biodiesel tiene mayor punto nube y punto de congelación. Tiene una menor volatilidad lo que puede causar la formación de depósitos en los motores debido a una combustión incompleta.
- Provoca depósitos excesivos de carbón y la formación de goma (polimerización) en los motores; y el aceite se contamina, generando problemas de flujo.
- Tiene una viscosidad relativamente alta y una menor volatilidad que el diesel, por lo tanto, necesita una mayor presión de inyección.
- El biodiesel puede aumentar o disminuir los óxidos de nitrógeno (NO_x) dependiendo de la materia prima del biodiesel. Se ha encontrado que a mayor grado de insaturación de las materias primas se producen mayores emisiones de este gas.
- El uso de biodiesel en motores de combustión interna puede llevar a problemas a largo plazo de durabilidad del motor, incluyendo amartillamiento del inyector, obstrucción del filtro y el anillo de pistón, etc.

1.8.3. Medidas de mitigación

Cuatro métodos han sido identificados para mejorar las propiedades del biodiesel [68]. Estos son: (a) el uso de aditivos, (b) la producción de otros ésteres de metilo, (c) modificar el perfil de ácidos grasos de las materias primas existentes a través de, por ejemplo, la modificación genética, (d) el uso de materias primas con un perfil de ácido graso diferente. Al utilizar mezclas con combustibles diesel, siendo la más popular 20/80 (biodiesel/diesel respectivamente), se obtiene una reducción de humos, partículas, hidrocarburos no quemados, dióxido de carbono y emisiones de monóxido de carbono [69].

Una limitación al uso del biodiesel es su tendencia a cristalizar a bajas temperaturas inferiores a 0°C. Tales cristales causan problemas en el bombeo y el funcionamiento del motor. Una solución a este problema es la eliminación de ésteres saturados de elevado punto de fusión mediante la modificación del perfil de ácidos grasos en un proceso repetitivo de ciclos de refrigeración [70].

1.9. Taxonomía de la palmera de corozo [*Attalea guacuyule* (Liebman. Ex Mart.) S.

Zona]

Sinónimo *Attalea cohune* Martius (Nombres comunes: corozo, cohune palm, manaca). La palmera de corozo pertenece a la familia *Arecaceae*, llamada antes *Palmae*, es una planta monocotiledónea, del orden Arecales, género *Attalea*, especie *guacuyule* (sinónimo *cohune*) (figura 1.5). Es monoica, es decir, una misma planta produce las inflorescencias masculinas y femeninas.

La identificación de especies de *Attalea* ha sido difícil por varias razones. El primer problema es la escasez de colecciones de herbario, debido a que las especies tienen hojas, inflorescencias y frutos grandes, al igual presentan características biológicas, como la fenología muy estacional y la dioecia funcionales que hacen que sea difícil reunir material completo. Por otra parte, muchas colecciones valiosas, incluyendo ejemplares se han perdido o fueron destruidas [71]. En consecuencia, varias especies de *Attalea* no han sido descritas o son todavía muy poco conocidas o de estatus dudoso. El segundo problema es el uso de diferentes conceptos de género entre los taxónomos. En 1999, la subtribu *Attaleinae* fue asignada a un grupo de cinco géneros separados (*Attalea*, *Orbignya*, *Scheelea*, *Maximiliana* e *Ynesa*) en un tratamiento taxonómico de Palmeras, sin embargo, en un trabajo posterior, Henderson incluye todas las especies de *Attalea*, *Markleya*, *Maximiliana*, *Orbignya*, *Parascheelea* y *Sheelea*, dentro del género *Attalea* [71].

La palmera de corozo era reconocida anteriormente como *Orbignya cohune* (Mart. Dahlgren ex Standl, perteneciente al género *Orbignya* y conocida como babassu en Brasil, cohune en América Central, y corozo en México, parte de Centroamérica y Colombia. Con

el paso del tiempo las palmeras reconocidas como géneros separados (*Maximiliana*, *Orbignya* y *Scheelea*) se combinaron en el género *Attalea* [71] y se agruparon como uno solo. De igual manera, Zona (2002) reconoce al nombre más antiguo *Attalea guacuyule* y deja como sinónimo no válido a *Attalea cohune*.

1.9.1. Morfología



Figura 1. 5. Palmera de corozo (*A. guacuyule*).

Tronco. El tallo o tronco de la palmera de corozo se desarrolla entre cuatro y seis años, una vez que ha tenido lugar la mayor parte del crecimiento horizontal del sistema radical. Luego de establecida la palmera en campo definitivo se inicia la formación de un órgano voluminoso en la base del tallo que es el bulbo, que origina el ensanchamiento en la base del tronco y sirve de asiento a la columna del tallo.

El tronco de esta palmera es solitario, inerme, erecto de hasta 20 m de altura y 30-50 cm de diámetro, generalmente con las bases de las hojas persistentes por debajo de la corona, raramente acaulescentes, con cicatrices inconspicuas [72].

Hojas. Tienen hojas numerosas, contando con más de 30, y pueden alcanzar más de 8 m de largo y 2-2.5 m de ancho, recurvadas apicalmente con pecíolo corto. Las pinnas se presentan entre 150-200 pares, linear-lanceoladas, las más grandes de 80-100 cm de largo y 4-5 cm de ancho (figura 1.6) [73].



Figura 1. 6. Hojas de la palmera de corozo

Inflorescencia. Solitarias interfoliares, péndulas, ramificadas hasta 1 orden, 100-150 cm de largo, a veces completamente estaminadas o pistiladas, o con flores de ambos sexos, pedúnculo de aproximadamente 100 cm de largo, café lepidoto, perfilo más o menos leñoso, aquillado tubular, partiéndose regularmente en el ápice y volviéndose fibroso (figura 1.7).

Flores. Estaminadas de 13-15 mm de largo de color crema, sépalos triangulares, pétalos hasta de 1 cm de largo, ovado-lanceolados, dentados [72], tornándose planos; flores pistiladas de 30-40 mm de largo, sépalos ampliamente imbricados, pétalos imbricados con puntas triangulares, anillo estaminodio de aproximadamente 10 mm de largo.

Fruto. Los frutos son numerosos, pueden contener más de 800-1000 frutos por cada inflorescencia, son ovoides, hasta 8 cm de largo y 4-4.45 cm de ancho, epicarpio densamente escamoso pero blanco hasta el ápice apiculado; semillas 5- 3.5 mm de largo y



Figura 1. 7. Inflorescencia de la palmera corozo.

15-20 mm de diámetro, endospermo homogéneo frecuentemente con una cavidad central, embrión basal, lanceolado [73].

La composición física del fruto fresco es de aproximadamente: 7% peso de la semilla, 58% del endocarpio ó cáscara, 23% del mesocarpio y 12% de epicarpio, como se observa en la siguiente figura.

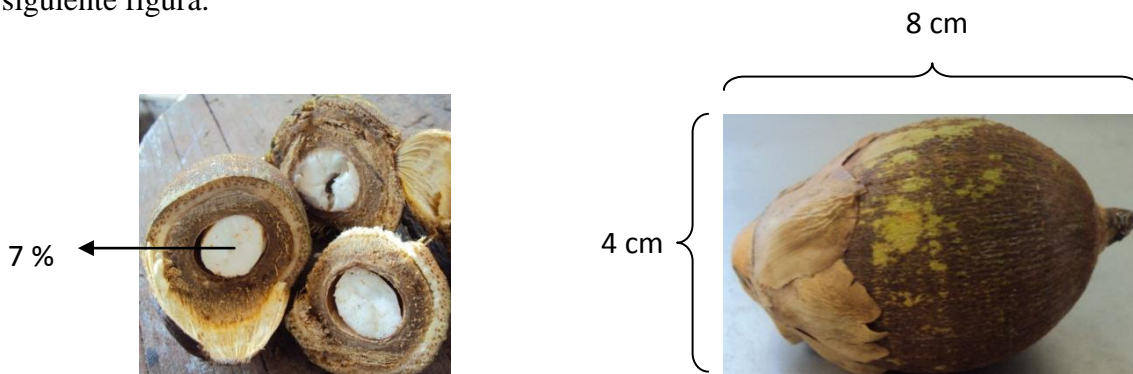


Figura 1. 8. Tamaño y composición del fruto de la palmera corozo [107].

Las semillas pesan en promedio de 3 a 6 g, y contienen entre el 60% y el 68% (p/p) de aceite, alcanzando hasta 72% en las condiciones más favorables para el crecimiento de la palmera [74]. Esta semilla es rica en ácido láurico (60-70%), por lo que es comparable a la

del cocotero (*Cocos nucifera*) o al aceite de la semilla de la palmera africana (*Elaeis guineensis*). Más del 80% del aceite contiene ácidos grasos saturados, cerca del 11% monoinsaturados y el resto poliinsaturados.

La semilla contiene 6.8 g de proteínas y 52.2 g de grasa por cada 100 g de peso [75]. El aceite no se arranca tan pronto como los otros aceites de palmera. La copra que queda después de la extracción del aceite a menudo se utiliza como alimento para el ganado. Las cáscaras de los frutos, que son difíciles de obtener, pueden ser un excelente carbón vegetal o se incineran para fertilizante, las fibras son ideales para la fabricación de colchones, asientos y aislamientos, al igual, unido con el látex de caucho natural se utilizan para asientos de automóviles [76].

1.9.2. Factores climatológicos y edáficos

El clima que se requiere para que una palmera tenga un alto grado de producción de aceite, está determinado por una distribución uniforme de la precipitación pluvial, la temperatura y una adecuada radiación solar a lo largo del año.

La palmera de corozo es una planta de desarrollo continuo. Su actividad fotosintética, crecimiento y producción son indeterminados, por lo que la planta tiene necesidad de agua durante todo el año lo que le permite tener un rendimiento óptimo. La precipitación debe reemplazar continuamente la cantidad de agua sustraída por la planta de las reservas en el suelo, de manera que la evapotranspiración se realice en forma normal.

Esta especie de palmera la podemos encontrar desde México hasta Bolivia, Paraguay, sur de Brasil y el Caribe, como se puede observar en el mapa de distribución en la figura 1.9 (a). Pueden crecer desde 600 metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta en una gran variedad de tipos de suelos. Son abundantes en el bosque tropical húmedo y en las selvas medianas subperennifolias en suelos ricos y profundos, donde alcanza tallas generalmente bajas, pero cuando la vegetación es alterada, forma palmerales casi puros con alturas considerables [75].

La selva mediana subperennifolia y subcaducifolia tiene un promedio anual de 1,300 mm de precipitación pluvial y una época muy definida sin lluvias que abarca fines de noviembre a principios de mayo, sin embargo, es importante hacer notar que durante la época seca la precipitación alcanza hasta 191 mm al año, lo que contribuye a que esta comunidad se desarrolle. Otro hecho importante para que abunde esta vegetación, es el suelo calizo, el cual es propicio para este tipo de selva mediana subperennifolia mediana y subcaducifolia, por tener una gran permeabilidad que sustituye al drenaje rápido de los suelos con pendientes.

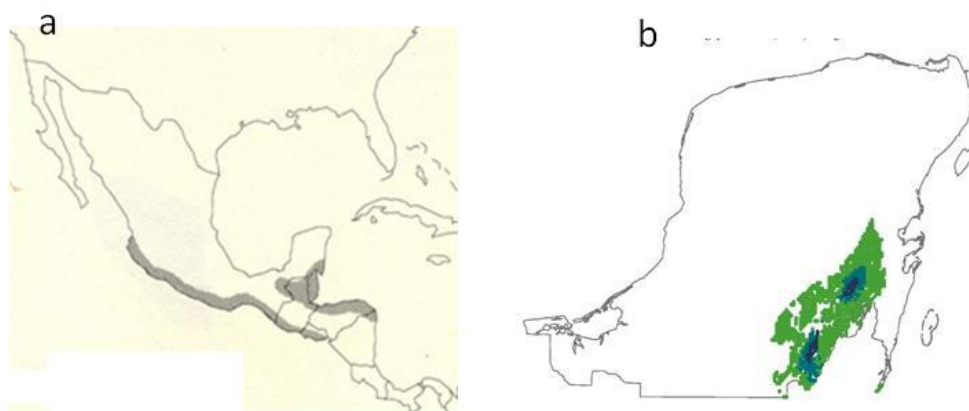


Figura 1. 9. Distribución de la palmera corozo. a) en la República Mexicana y América Central [71]; b) en la península de Yucatán (mapa proporcionado por C. Espadas, CICY).

Con respecto a la distribución general en México, ésta especie la podemos encontrar en dos áreas de distribución disyuntas: la primera desde Bahía de Banderas entre Jalisco y Nayarit, hasta El Soconusco (vertiente del Pacífico), la segunda, en la Península de Yucatán y Chiapas; en Centroamérica desde Belice hasta Nicaragua, (vertiente del Atlántico) y en la vertiente Pacífico hasta El Salvador. Específicamente en la península de Yucatán, se encuentra en la parte sur del estado de Quintana Roo y de una manera escasa en el estado de Campeche (véase figura 1.9 b).

En Belice, donde es muy abundante, forma palmares denominados “cohune ridge”; una derivación de este nombre es el de “Kohunlich”, vocablo con el que se conocen las ruinas arqueológicas ubicadas a 52 Km de Chetumal, donde es muy abundante esta palmera [72].

1.9.3. Plantación

1.9.3.1. Desmonte y preparación del terreno

Una vez seleccionado el sitio, el establecimiento de la plantación de la palmera se inicia con el desmonte de las tierras. En la actualidad, se utilizan métodos mecánicos para acondicionar el lugar de cultivo, utilizando sierras eléctricas, tornos, topadoras y así dejar la vegetación bien cortada o quemada [77].

Selección de áreas. Se puede afirmar que la palmera de corozo tiene una gran capacidad para adaptarse a diferentes tipos de climas y de suelos dentro de márgenes amplios, pero sólo cuando se establece en un medio de condiciones óptimas, es que esta especie muestra su gran potencial productivo.

De aquí que sea necesario llevar a cabo estudios detallados sobre el medio en el cual se instalará el cultivo, tanto en sus aspectos positivos como de aquellos que pudieran afectar en limitantes y que signifiquen impacto sobre los costos de producción.

Diseño de plantación. Para el desarrollo del diseño de un plantío debe tenerse en consideración si se trata de una plantación industrial o de pequeñas y medianas propiedades. Además, la disposición general de una plantación se basa en parte de la topografía, el drenaje, la posición de la fábrica, y la distancia para el transporte de los racimos de fruta fresca a la carretera más cercana [78].

La preparación del terreno se debe realizar con suficiente antelación, preferiblemente en los meses secos (enero-abril) para efectuar la siembra al inicio de la estación lluviosa. Esta preparación comprende: la delimitación del área por sembrarse y el trazado de caminos, el

desmonte de tierras cubiertas de bosques vírgenes o secundarios, y en el caso de terrenos sembrados por cultivos anuales o potreros, se recomienda una pasada de arado seguida por una pasada de rastra de 38 discos con un ancho de 6.50 metros [79].

El diseño de la plantación es un modelo de bloque de una hectárea, sembradas al “tresbolillo”, el cual consiste formando un triángulo equilátero de manera que las hileras paralelas queden a una distancia de 6.25 m una de otra orientadas de norte a sur, para lograr, hasta donde sea posible, una buena captación de la radiación solar (Véase figura 1.10). Una vez determinadas la distancia y la densidad de siembra se cava un hueco en cada punto marcado y se deposita la planta.

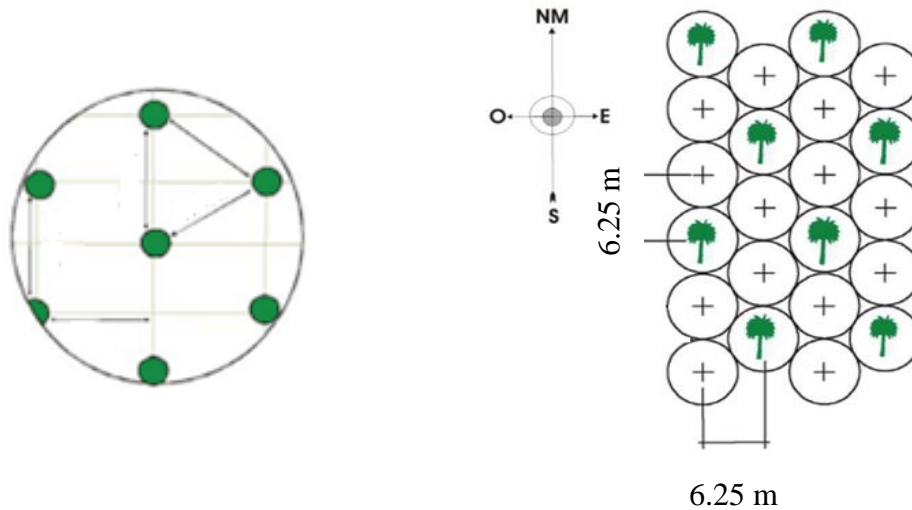


Figura 1. 10. Sistema de siembra al “tresbolillo”

Distancia de siembra. Las densidades de siembra comúnmente usadas en algunas regiones del mundo son: 8.5, 9, 9.5 m de distancia entre palmeras, para obtener densidades de 160, 143 y 128 palmeras por hectárea respectivamente, sin embargo tomando en cuenta las medidas de la palmera de corozo, la distancia de siembra apropiada para esta palmera es de 6.25 m x 6.25 m entre ellas, obteniendo una densidad de 480 palmeras/ha [80], como se observa en la figura 1.11.

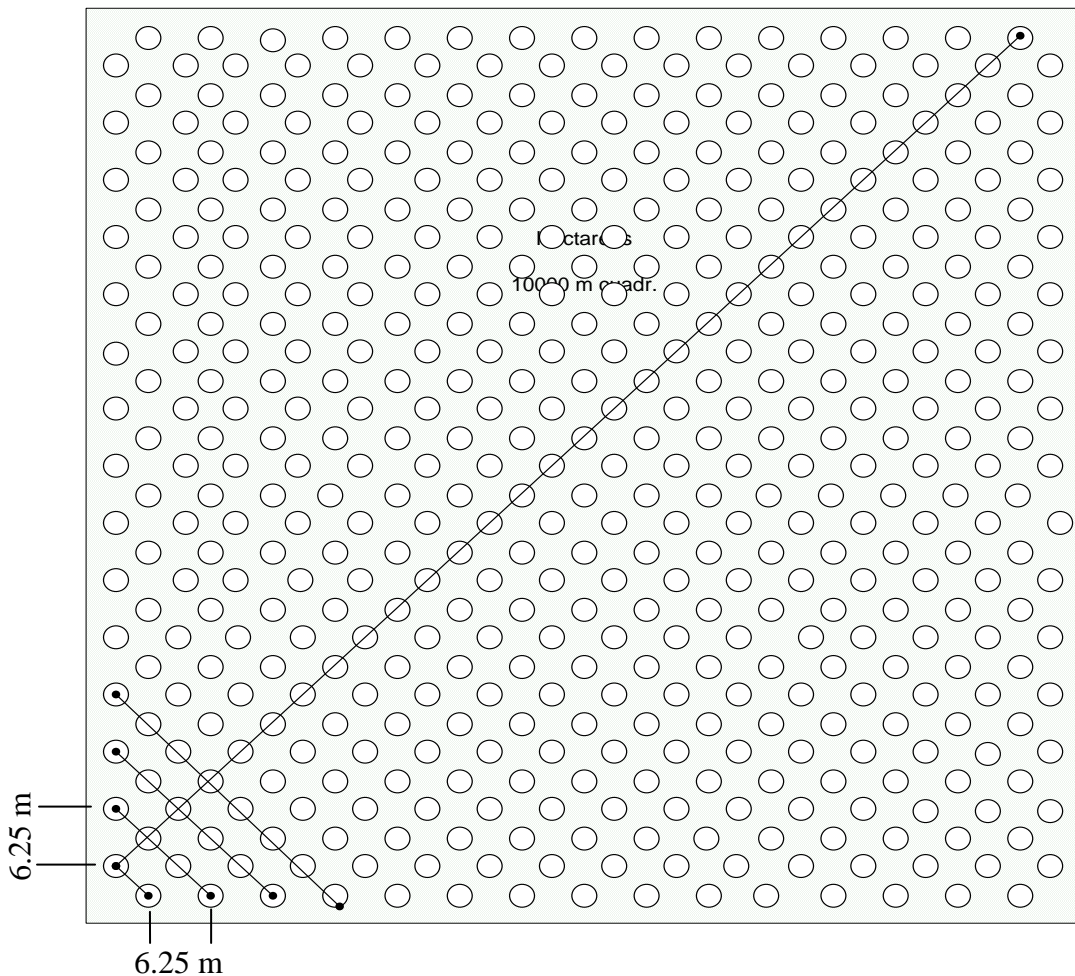


Figura 1. 11. Croquis de la siembra.

Siembra: Esta operación exige mano de obra especializada, ya que de la manipulación de las plantas durante el trasplante y la semilla, dependerá la homogeneidad de la futura plantación. Las palmeras se deben de colocar en el hueco en posición vertical, procurando que el cuello (porción del tallo localizado directamente debajo del área foliar) quede justamente a nivel del suelo. Este trasplante debe efectuarse al inicio de la estación lluviosa. La mano de obra requerida para esta labor, se calcula en 3 días/hombre/hectárea [80].

El establecimiento de una cobertura de leguminosas es considerado como una etapa imprescindible para lograr una plantación de palmeras en buenas condiciones, se recomienda especialmente el empleo de *Canavalia ensiformis*, que es una planta de crecimiento lento, el cual produce una cobertura espesa. Esta práctica ofrece ventajas como:

control de erosión del suelo, mejoramiento de las condiciones y de la fertilidad del suelo, y favorece también el control de malezas.

1.9.3.2. Mantenimiento del cultivo

Las labores de mantenimiento se efectúan durante toda la vida de la plantación, y se repiten regularmente con el propósito de lograr un rendimiento óptimo [80].

Las labores son las siguientes:

- **Resiembra.** A pesar de las precauciones tomadas durante la siembra, algunas plantas mueren a consecuencia de una sequía prolongada y del ataque de enfermedades o de plagas (roedores e insectos). Esas plantas deben ser sustituidas eventualmente por otras, siempre y cuando el porcentaje de resiembra no sea mayor de un **2%**. Se recomienda efectuar la resiembra durante los primeros dos años de vida de la palmera. Después no es aconsejable hacerlo, porque el tamaño de las plantas es demasiado grande y su desarrollo se altera al resembrarlas.
- **Rodajear o comalear.** Esta actividad consiste en dejar un círculo libre de malezas alrededor de la planta con los siguientes objetivos: garantizar un desarrollo adecuado del sistema radicular, favorecer el desarrollo de la palmera, facilitar el control fitosanitario y reducir los riesgos de ataques de insectos y otros animales. En una planta recién trasplantada el diámetro del círculo que la rodea no debe ser mayor de 1.5 m; posteriormente, conforme aumenta el área foliar de la planta, la dimensión de ese diámetro aumentará hasta alcanzar unos 3 m al inicio de la cosecha.
- **Limpieza general.** Es necesario que las entrecalles de la plantación se mantengan libres de malas hierbas, para favorecer el crecimiento de la cobertura de leguminosa. Una vez que la cobertura está bien establecida, la labor de limpieza se realizará con intervalos de tiempos más largos, hasta que se llegue a efectuar dos limpiezas al año.

- **Análisis foliar.** Se realiza mediante ensayos de fertilización que permiten determinar la concentración de nutrimentos minerales en las plantaciones de palmera. En estos ensayos se analizan el contenido de elementos minerales de las hojas, en comparación con valores óptimos.
- **Control fitosanitario.** Tiene como finalidad localizar los focos de infección causados por patógenos en las plantaciones, para adoptar las medidas de combate permisible.
- **Fertilización de palmeras jóvenes.** Durante los primeros años de vida, la palmera extrae del suelo una gran cantidad de nutrimentos, especialmente nitrógeno y fósforo. La elección del elemento o elementos necesarios para esta planta, así como sus dosis, se fijan con base en las condiciones locales de suelo y clima. La aplicación de la fertilización debe hacerse al inicio, o bien al final de las lluvias, de manera que el suelo tenga la humedad necesaria para solubilizar el abono.
- **Castración.** Esta práctica cultural consiste en la eliminación temprana de las inflorescencias. Ofrece una serie de ventajas ya que favorece el desarrollo de la palmera, evita la pudrición de los primeros racimos no cosechados, favorece la producción de racimos más grandes y ricos en aceite, y lo más importante, es que determina el momento de dar inicio a la cosecha. La labor de castración debe empezar cuando en el 50% de las palmeras de una plantación han brotado las primeras inflorescencias femeninas. Esta operación se realiza durante todo el año una vez al mes, con el propósito de evitar el envejecimiento de las inflorescencias.
- **Poda.** Consiste en la eliminación de hojas muertas o secas para facilitar el trabajo de los castradores y, eventualmente, de los cosechadores. Es aconsejable no eliminar hojas verdes hasta que la planta no haya dado su primera cosecha para lograr que una mayor superficie foliar capte la energía solar indispensable para el proceso de fotosíntesis.
- **Polinización.** La palmera produce flores masculinas y femeninas en forma separada en una misma planta, de tal manera que se necesita trasladar el polen de una flor a otra, es por esta razón que se necesita de agentes polinizadores como los insectos o por medio del viento (polinización anemófila) para asegurar un buen fructificación.

La acción del viento y las abejas para trasladar el polen es muy pobre, esta situación se ve más comprometida con los materiales genéticos de alta producción de racimos, que durante los dos a tres primeros años de producción emiten muy pocas inflorescencias masculinas y son casi exclusivamente femeninas. La polinización cruzada se debe iniciar entre los 26 – 28 meses de sembrada la palmera [80].

1.9.4. Industrialización y comercialización

El proceso industrial de la extracción del aceite de palmera de corozo requiere de un alto grado de tecnología para garantizar un rendimiento óptimo en la producción.

Existen en la actualidad fábricas de todo tipo y de todas las dimensiones, que van desde aquellas que procesan de 2 a 4 toneladas de racimos por hora, hasta las plantas con una capacidad de 60 toneladas por hora. Las fábricas deben estar situadas cerca o dentro de las mismas plantaciones ya que la calidad del aceite no solamente dependerá de la madurez de los racimos, del cuidado con que se manipule la cosecha y de su transporte, sino también, de la rapidez con que los frutos sean procesados en la planta extractora para evitar la acción de enzimas hidrolíticas.

Los aumentos en el porcentaje del índice de extracción de aceite tendrán una influencia directa en la rentabilidad de la inversión realizada. De ahí que, el amplio conocimiento de las características del fruto por un lado, y la noción de cada una de las fases del proceso de extracción por otro, reducirán al mínimo las pérdidas [80].

En la siguiente figura podemos observar el esquema metodológico de la producción de biodiesel a partir de la semilla del fruto de la palmera de corozo [81]:

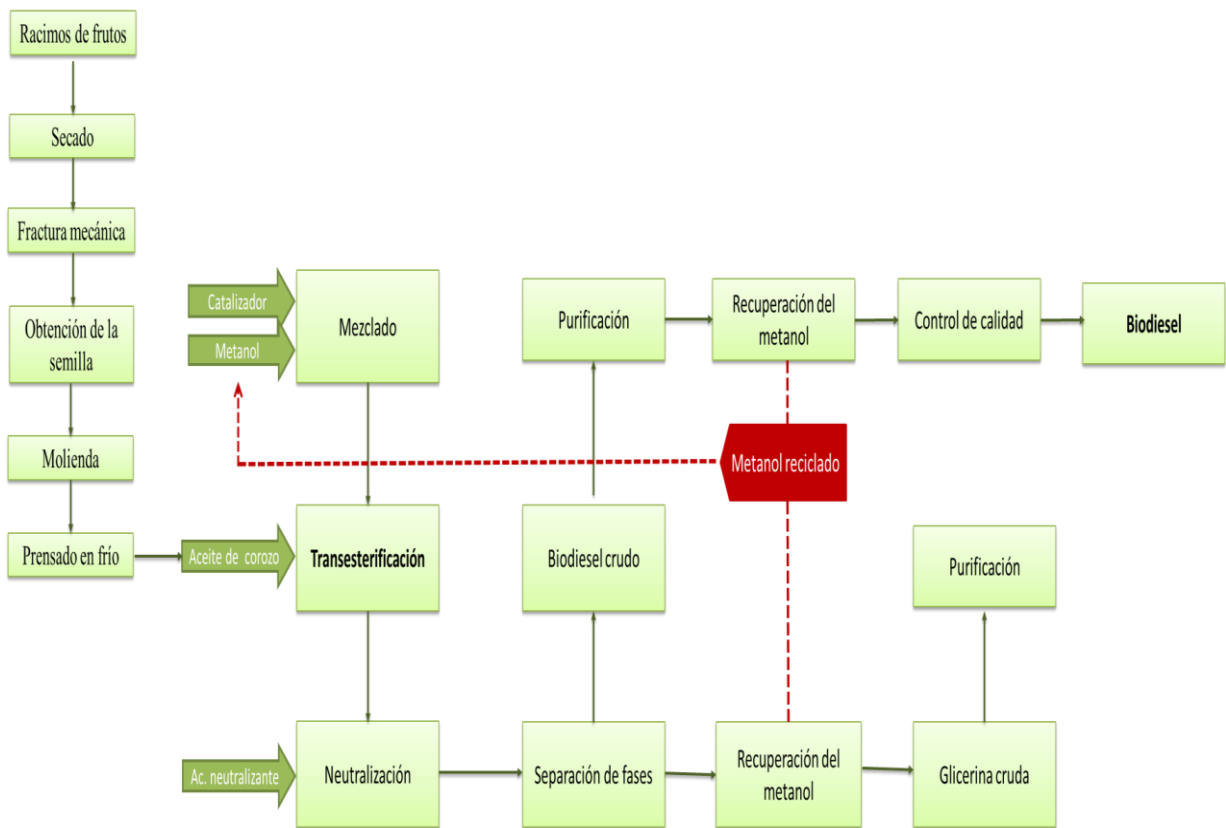


Figura 1. 12. Esquema metodológico de la producción de biodiesel a partir de la semilla del fruto de la palmera de corozo.

1.10. Especie de prospección: palmera coyol real [*Attalea liebmannii* (Becc.) S. Zona]

1.10.1. Taxonomía

La palmera coyol real conocida como *Scheelea liebmannii* Becc. y también con nombres comunes como corozo o palma real en Costa Rica, palla en Bolivia, jací en Brasil, palma de vino o palma real en Colombia, conambo en Ecuador, coquito en Guatemala y coyol real en México (figura 1.13) [82] es una palmera perteneciente a la familia *Arecaceae*, la cual posee tallos largos, rectos y solitarios, con 3-25 m de alto y 25-50 cm de diámetro, en algunas ocasiones cubiertas con hojas en la base.

Las hojas miden de 3.5-9 m de largo, son pinnadas, con peciolo largos o ausentes y con foliolos sostenidos verticalmente dispuestos en un mismo plano [82]. Los foliolos miden de 180 a 235 por lado, regularmente espaciados o más o menos agrupados en la base, dispuestos en un solo plano o ligeramente dispuesto en varios planos.



Figura 1. 13. Palmera coyol real (*A. liebmanni*).

Es una planta monoica, con inflorescencias racemosamente ramificadas que miden de 70 a 110 cm de largo. Las flores son unisexuales en un arreglo espiral en triadas ramificadas. Las flores masculinas miden de 1.3 a 2 cm de largo, de color crema, muy fragantes, con tres diminutos sépalos diferenciados y otros tres más o menos diferenciados y lineales. Pétalos carnosos; con 6 estambres y anteras erguidas. Las flores femeninas de 2 a 2.6 cm de largo con 3 sépalos diferenciados y 3 pétalos diferenciados, estaminodio, connada en un grueso y truncado anillo; un pistilo con 3 lóculos, estilo angosto y 3 estigmas.

Los frutos son ovoides, de 4.5 a 6.2 cm de largo por 2.1 a 2.8 cm de ancho, densamente agrupados, oblongo-elipsoidales, más o menos lisos, de color anaranjado-café, con residuos estigmáticos apicales; con 1-3 semillas.

Esta especie de palmera produce primero de 2-4 inflorescencias masculinas seguidas por una femenina, y luego el patrón se repite [82].

1.10.2. Distribución geográfica

Esta palmera se distribuye desde el sur de México (Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Campeche) hasta el centro de Bolivia. En Costa Rica se presenta en la costa Pacífica de Guanacaste y Puntarenas y en la Vertiente del Atlántico Norte (Llanura de Guatuso). Es posible encontrarla en bosques estacionales y húmedos, común a lo largo de las márgenes de los ríos, en áreas abiertas y sabanas, usualmente bajo los 300 msnm y ocasionalmente hasta los 1000 msnm. Es muy común en áreas disturbadas y persistentes en pasturas [82].

1.11. Justificación

Una de las principales causas del incremento en el uso de combustibles alternativos se debe a la dependencia que se tiene de los combustibles fósiles, proveniente del petróleo, materia prima que se encuentra dentro del territorio de unos cuantos países políticamente inestables y, por tanto, sometidos a fuertes variaciones en precio. Aunado a esto, el problema se agudiza ante un inminente cambio climático, provocado en mayor parte por emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) proveniente de la quema de combustibles fósiles y biomasa (gas natural, petróleo, combustibles, leña) en procesos industriales, transporte, actividades domiciliarias (cocina y calefacción), etc., los cuáles orillan a un incremento en el calentamiento global y una inestabilidad ambiental.

Por ello, la necesidad de proporcionar soluciones a estos problemas ha motivado el deseo de explorar y desarrollar tecnologías en el ramo de los biocombustibles, entre ellos el biodiesel, el cual puede ser obtenido de la biomasa a partir del aceite de semillas de varias especies de plantas.

El biodiesel se considera un biocombustible de "carbono neutral " sobre sus ciclos de vida, ya que el CO₂ liberado en su combustión regresa a la superficie terrestre a través de la fotosíntesis de los cultivos de donde son producidos, diferencia fundamental con los combustibles fósiles, los cuáles liberan dióxido de carbono (CO₂) que ha sido almacenado durante millones de años debajo de la corteza terrestre y que provocan daños en el medio ambiente. Por ello, el biodiesel tiene el potencial para reemplazar el uso de los combustibles fósiles y contribuir a la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero [65].

En la actualidad, la obtención de biodiesel se ha realizado a partir de semillas como: maní (cacahuete), soya, arroz, girasol, y palmera africana, siendo esta ultima la de mayor productividad [8] en comparación con otras materias primas, además de que se han realizado análisis de ciclo de vida (ACV) proporcionando resultados que indican que la emisión de gases de efecto invernadero es de un 62% en comparación con otros cultivos [48].

Actualmente, la palmera africana se produce y procesa a gran escala como materia prima en la producción de aceite. Asimismo, el cocotero (*Cocos nucifera* L.), es utilizado en la extracción de aceite pero en menor cantidad [10, 11, 12]. De la palmera africana se pueden obtener dos tipos de aceites: aceite de la carne o mesocarpio y aceite a partir de la semilla que se encuentra situado en el interior del mesocarpio (llamado aceite de palmiste) [9]. Ambos tipos de aceites se utilizan para la obtención de biodiesel.

Algunos trabajos han evidenciado la existencia de otros géneros con gran potencial como fuentes de aceites, encontrándose entre estas las especies pertenecientes al género *Attalea* (incluyendo los que estaban considerados en *Orbignya*). Un ejemplo de éste es el babassu (*Attalea speciosa* Mart. ex Spreng.), el cual tiene una semilla rica en ácidos grasos y comparable a la del cocotero ó a la semilla de la palmera africana. Investigaciones realizadas utilizando el aceite extraído de la semilla de esta palmera demuestran que tiene características aceptables para la producción de biodiesel, arrojando características aceptables para su producción [13].

Otra especie perteneciente a este género con gran potencial para la producción de biodiesel es la de corozo, la cual no cuenta con la suficiente información reportada en la literatura sobre las características o rendimientos que pudieran ser indicadores para conocer su posible factibilidad en la producción de biodiesel.

En el presente trabajo se presentan los estudios realizados con la palmera de corozo, los cuales permiten establecer las bases que determinan la factibilidad de producción del biodiesel a partir de esta especie de palmera y asimismo proporcionar los indicadores para que dicha palmera sea considerada como un buen cultivo energético.

1.12. Hipótesis

En términos generales, los frutos de las palmeras son buena fuente de aceites, de los cuales se puede partir para la elaboración de biocombustibles. En el género *Attalea* se han reportado varias especies como buenas productoras de aceites. De esta manera, se espera que a partir del extracto de aceite crudo de semillas del corozo se obtenga por medio de la transesterificación catalizada por una base, biodiesel de calidad comparable a las otras especies de palmeras.

1.13. OBJETIVOS

1.13.1. Objetivo General

Determinar el potencial de la palmera de corozo (*A. guacuyule*) como fuente de materia prima para la producción de biocombustible, mediante un estudio de los aceites que produce y su conversión a biodiesel.

1.13.2. Objetivos Específicos

- Determinar la productividad de aceite del fruto de la palmera de corozo.
- Determinar las condiciones de producción de biodiesel por transesterificación con catalizador básico a partir del aceite de corozo.
- Caracterizar los ésteres de metilo (biodiesel) obtenidos a partir de la transesterificación de aceite de corozo.
- Realizar una prospección comparativa con la palmera coyol real (*A. liebmanni*) como otra posible fuente de obtención de biocombustibles.

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Estrategia Experimental

La estrategia experimental del presente trabajo, en forma general se resume en la figura 2.1. En la figura 2.2 se presentan los pasos para la síntesis del biodiesel. Una explicación detallada se presenta más adelante.

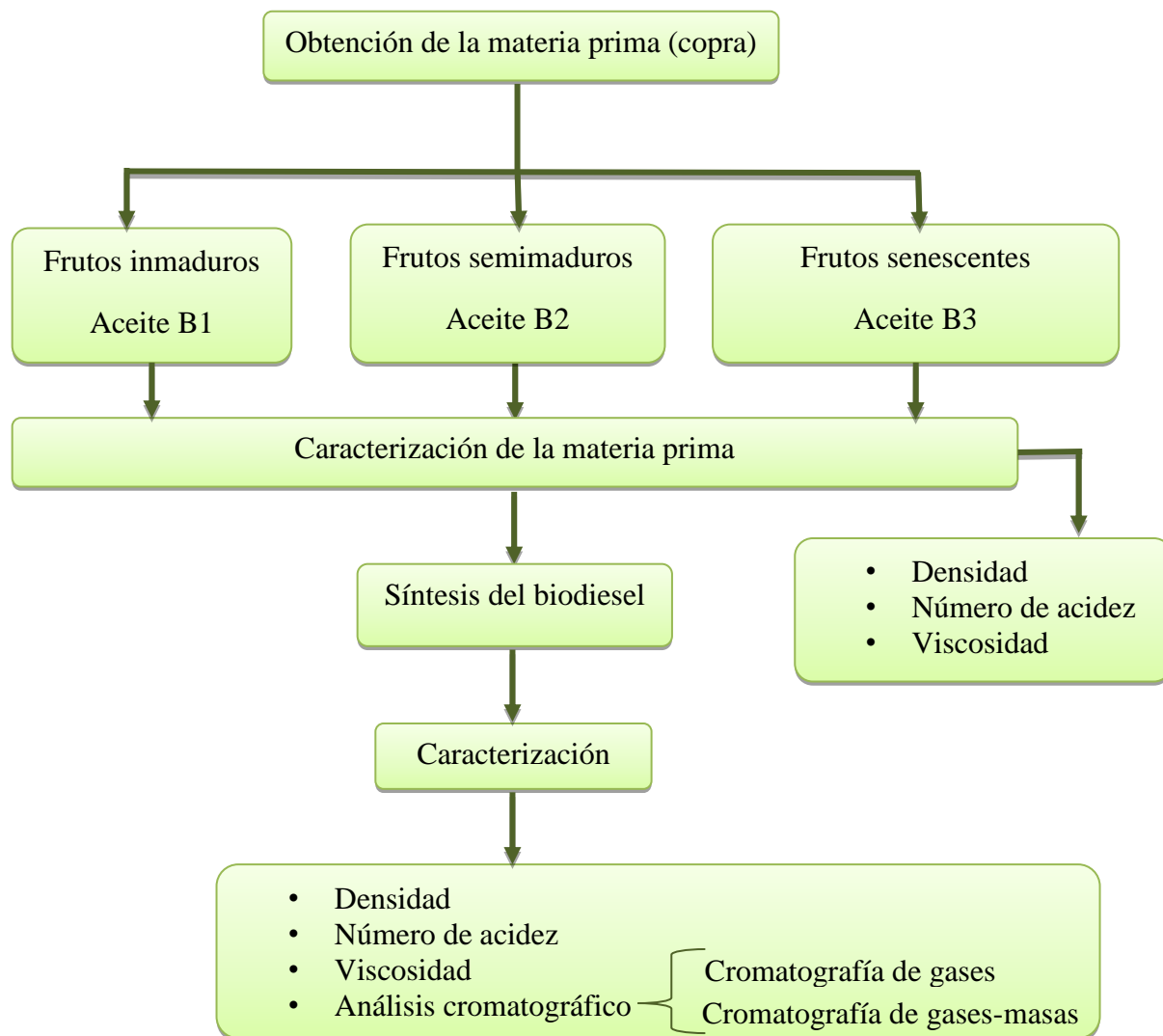


Figura 2. 1. Etapas de la estrategia experimental.

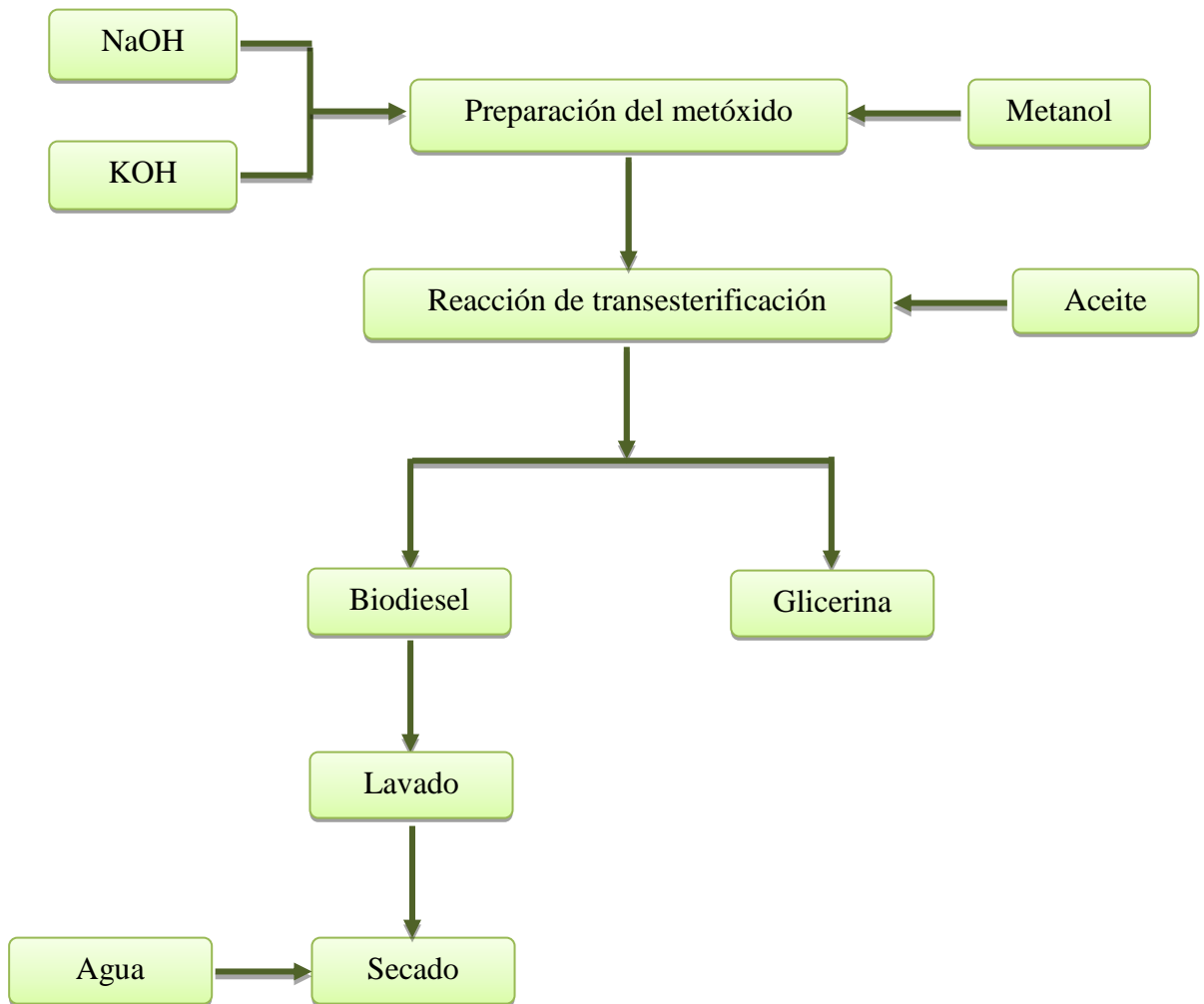


Figura 2. 2. Esquema del proceso para la síntesis del biodiesel.

En la primera etapa se obtuvo la copra de los frutos en diferentes grados de maduración del fruto (inmaduros, semimaduros y senescentes) para posteriormente extraer el aceite en cada uno y después caracterizarlos (densidad, número de acidez y viscosidad). Seguidamente, se determinaron las condiciones (temperatura, catalizador y tiempo) para la síntesis del biodiesel por transesterificación y posteriormente caracterizarlo, determinando su densidad, número de acidez, viscosidad e identificación del perfil lipídico por medio del análisis cromatográfico.

2.2. Materia prima

Se utilizaron frutos de la palmera de corozo colectadas en Quintana Roo (figura 2.3), en las cercanías del sitio arqueológico de “Kohunlich” distantes a 52 Km de Chetumal, Quintana Roo los cuáles se pesaron, se partieron y se procedió a la separación de la semilla.

Para la clasificación y nombramiento de las etapas de madurez, se llevo acorde a los siguientes parámetros:

Parámetros	Etapas de maduración		
	Inmaduros	Semimaduro	Senescente
Color	Verdoso	Pardo	Pardo oscuro
Endospermo	Líquido	Semisólido	Sólido
Sitio colectado	En el racimo	En el racimo	En el suelo



Figura 2. 3. Frutos de la palmera de corozo.

Del mismo modo, se utilizaron los frutos de la palmera coyol real colectados en las cercanías de Candelaria, Campeche, para prospección y comparación con la palmera de corozo.

2.3. Variables evaluadas del fruto de la palmera de corozo

Se obtuvieron a partir de 15 frutos tomados al azar de cada lote de etapa de madurez.

2.3.1. Peso del fruto

Se empleó una báscula digital marca Torrey, tomando el peso fresco de cada fruto de todas las etapas de madurez.

2.3.2. Diámetro del fruto

Los diámetros fueron medidos con un calibrador vernier.

2.3.3. Longitud del fruto

La longitud de los frutos fueron medidos de extremo a extremo utilizando un calibrador vernier.

2.4. Secado y molienda de la semilla

Las semillas se sometieron a trituración en una licuadora marca Oster, seguidamente se dejó secar en la estufa de secado Binder a 80 °C durante 24 horas aproximadamente hasta alcanzar peso constante, con la finalidad de retirar la humedad de acuerdo a la metodología de la AOAC (1990), como se puede observar en la figura 2.4.



Figura 2. 4. Secado y molienda de la semilla.

2.5. Obtención del aceite y caracterización

Es importante considerar que en una cosecha masiva de frutos, estos tendrán distintos grados de madurez. Por lo anterior, se decidió hacer una separación previa de frutos partiendo del supuesto que tendrían diferentes tipos de aceites, de acuerdo al grado de madurez. Así, se tuvieron tres lotes de copras: de frutos inmaduros (B1), semimaduros (B2), y senescentes (B3).

Una vez obtenida la copra se procedió a la extracción del aceite mediante un equipo Soxhlet utilizando como solvente n-Hexano. En la figura 2.5 se observa el aceite crudo extraído que se caracterizó posteriormente.

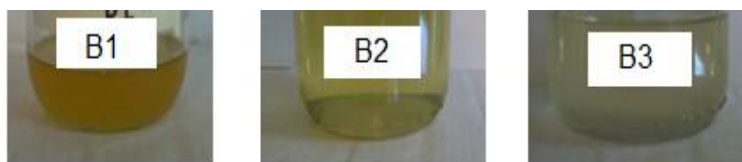


Figura 2. 5. Aceites extraídos de la palmera de corozo.

2.6. Síntesis del biodiesel

El biodiesel se obtuvo por reacción de transesterificación entre el aceite crudo y el metóxido.

El metóxido se preparó utilizando dos catalizadores diferentes:

- 1) NaOH con metanol
- 2) KOH con metanol.

Con respecto a la concentración del catalizador se utilizaron dos cantidades diferentes: 1% y 2% p/p con respecto al aceite. El metanol se utilizó en una cantidad de 40% v/v con respecto al aceite.

Las diferentes mezclas (catalizador y metanol) se prepararon en un matraz, agitándolas durante 30 minutos a 37 °C en una placa de calentamiento con agitación.

La reacción de transesterificación se llevó a cabo mezclando en otro matraz, la solución del metóxido con los diferentes aceites durante 90 minutos a 60 °C.

Después de la reacción de transesterificación, se colocó la mezcla de reacción en un embudo de separación durante 24 horas, para separar las dos fases que componen la mezcla (biodiesel y glicerina), como se observa en la figura 2.6. La fase de la glicerina es la que se encuentra en la parte inferior, debido a que es más densa que la fase de los ésteres de metilo, la cual se recuperó y se depositó en un recipiente.



Figura 2. 6. Separación de biodiesel y glicerina.

Posteriormente el biodiesel se lavó con agua caliente a 40 °C en una proporción 1:1 y se agitó levemente evitando la formación de jabón. El lavado se repitió 3-4 veces hasta que se obtuvo un pH neutro.

Finalmente se secó el biodiesel durante 30 minutos a 120 °C, para luego determinar el porcentaje de conversión con base al volumen obtenido de biodiesel con respecto a la cantidad del aceite utilizado.

2.7. Caracterización físico-química

2.7. 1. Medición de la densidad

La densidad se determinó mediante el pesado de un volumen conocido de la muestra, como se observa en la figura 2.7. Se realizó por triplicado y por medio de la fórmula de densidad se hicieron los cálculos:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

ρ : Densidad de la muestra [g cm^{-3}]

m: Masa de la muestra [g]

v: Volumen de la muestra [cm^3]



Figura 2. 7. Medición de la densidad

2.7.2. Medición del número de acidez

La medición de la acidez se determinó por medio de dos métodos:

El primer método de titulación consistió en la preparación de una solución 1:10 de la muestra en isopropanol. A esta solución se le adicionaron 10 gotas de fenolftaleína y después se le agregó una solución de KOH 0.025 N hasta que el indicador cambió de color. El cambio del indicador fue de incoloro a rosa (figura 2.8).

El segundo método consistió en una preparación de una solución 1:10 de la muestra en isopropanol, seguido de la adición de una solución de KOH 0.025 N hasta que el pH fuera neutro. El pH se midió con un potenciómetro HI 253 (HANNA Instruments®).

El número de acidez se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{Número de acidez} = \frac{V \cdot N \cdot PM}{P}$$

Donde:

V: Volumen de la solución [ml]

N: Normalidad de la solución [mmol/ml]

PM: Peso molecular de KOH [mg/mmol]

P: Peso de la muestra [g]



Figura 2. 8. Medición del número de acidez.

2.7.3. Medición de la viscosidad

Para la medición de la viscosidad se utilizó un Reómetro AR 2000 (T.A. Instruments®) (figura 2.9), y la geometría de doble cilindros concéntricos con las siguientes condiciones:

Tipo de análisis: Rampa continua; Temperatura: 40 °C; Velocidad de corte: 5.314×10^{-7} a 3831(1/s); Puntos: 100; Modo: Lineal; Duración: 5 minutos.



Figura 2. 9. Reómetro.

2.7.4. Análisis cromatográfico

2.7.4.1. Cromatografía en capa fina

La cromatografía de capa fina es una técnica cualitativa para identificación de componentes que constituyen una mezcla. En este caso se utilizó esta técnica para determinar la presencia de: ésteres de metilo (BD), triglicéridos (TG), ácidos grasos libres (FA), diglicéridos (DG) y monoglicéridos (MG), como se muestra en la figura 2.10.

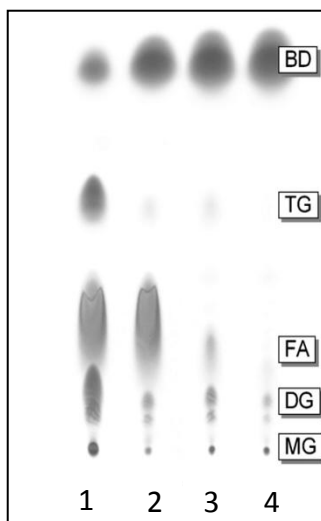


Figura 2. 10. Ejemplo de placa cromatográfica de capa fina: mezclas 1, 2, 3 y 4 de aceite de girasol y de colza [108]. Ésteres de metilo (BD), triglicéridos (TG), ácidos grasos libres (FA), diglicéridos (DG) y monoglicéridos (MG).

Se utilizaron cromatofolios de gel de sílice 60 F₂₅₄ (MERCK®). La fase móvil consistió en hexano/acetato de etilo/ácido acético en una relación de 90:10:1[83]. Las placas fueron reveladas con una solución de ácido fosfomolibdico.

2.7.4.2. Cromatografía de gases

Se utilizó un cromatógrafo modelo Claurus 500 (Perkin Elmer ®), equipado con detector de ionización de flama (FID) y una columna Varian Capillary Colum Select™ Biodiesel for FAME (30m x 0.32mm D.I. x 0.25µm de columna). Se utilizó nitrógeno (7 psi) como gas acarreador a un flujo constante de 80 mL/min. Se inyectó 1 µl de la muestra directamente a la columna con una temperatura inicial del horno de 180 °C. Después de dos minutos, se calentó el horno a una velocidad de 5 °C/min hasta 250 °C, a esta temperatura durante cinco minutos y se mantuvo a esta temperatura durante 25 minutos. La temperatura del inyector fue de 270 °C y la del detector fue de 300 °C.

2.7.4.3. Cromatografía de gases-espectrometría masas (GC-MS)

Se utilizó un cromatógrafo marca Agilent® 6890N equipado con detector másico 5975BMSD, y una columna capilar DB-5 (Agilent®) (30 m x 0.32 mm D.I. x 0.5 µm de película). El método consistió en tomar 1 µl de la muestra para inyectar indirectamente a la columna con una temperatura inicial del horno de 120 °C. Después de un minuto, se calentó el horno a una velocidad de 15 °C/min hasta 180 °C, a 7°C/min hasta 230 °C y, por último, a 10 °C/min hasta 300 °C y se mantuvo a esta temperatura durante 60 minutos.

2.8. Estimación de la producción de biodiesel

Se realizó un estimado de la producción anual tanto de aceite como de biodiesel en condiciones óptimas. Los criterios considerados en este cálculo fueron los siguientes: la masa promedio de la semilla entera, valor de producción de frutos por palmera, años de

producción, densidad de palmera por hectárea, porcentaje de rendimiento de aceite y biodiesel.

Se aplicó la siguiente fórmula para obtener el rendimiento de aceite en la plantación:

$$V_a = \frac{d_a \cdot R_s \cdot R_a}{\rho_a}$$

Donde:

d_a : Densidad de árboles [palmera/ha]

R_s : Rendimiento de semillas por cada palmera [kg/palmera]

R_a Rendimiento de aceite en la semilla [%]

ρ_a : Densidad del aceite [kg/m³]

Para calcular la cantidad de biodiesel que se va obtener del aceite producido, se aplicó la siguiente fórmula:

$$V_b = \frac{V_a \cdot \rho_a \cdot E_t}{\rho_b}$$

Donde:

ρ_a : Densidad del aceite [kg/m³]

E_t : Eficiencia de transformación [%]

ρ_b : Densidad del biodiesel [kg/m³]

2.9. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) completamente al azar, utilizando el Software Statgraphics Plus para Windows Versión 3.1. Para el análisis se tomaron los siguientes tratamientos: frutos inmaduros (B1), frutos semimaduros (B2) y frutos senescentes (B3). Las variables de respuesta fueron: peso, diámetro, longitud, rendimiento, densidad, número de acidez y viscosidad. Para los análisis se utilizó un índice de confianza del 95% (P-valor = 0.05). En los casos en los que se rechazó la igualdad de medias, se realizó una prueba de Tukey para determinar cuáles medias eran diferentes.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización morfológica del fruto

Se emplearon frutos de la palmera de corozo en diferentes etapas de maduración: frutos inmaduros (B1), frutos semimaduros (B2) y frutos senescentes (B3). De cada uno de ellos se seleccionaron 15 frutos al azar para realizar su respectiva caracterización. Cabe destacar que los frutos fueron recolectados en un mismo lote que comprendía varias palmeras. En la tabla 3.1 se presentan los resultados de la caracterización morfológica de los frutos, los cuales coinciden con los señalados por Stevens [73] para frutos de esta misma especie.

Tabla 3. 1. Caracterización morfológica del fruto de la palmera de corozo.

Variable	Etapas de maduración de los frutos		
	B1 (inmaduros)	B2 (semimaduros)	B3 (senescentes)
Peso (g)	88.83±2.50 a	93.81±2.65 a	48.16±3.40 b
Diámetro (cm)	4.753±0.10 a	4.851±0.05 a	3.90±0.10 b
Longitud (cm)	7.29±0.08 a	7.37±0.17 a	6.17±0.04 b

*Promedio de 15 repeticiones, letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

Estadísticamente, no hubo diferencia significativa entre el peso, el diámetro y la longitud de los frutos inmaduros (B1) y los frutos semimaduros (B2) ($P \leq 0.05$); sin embargo, con respecto a los frutos senescentes (B3), sí hubo diferencia significativa en cada una de las variables medidas. Una razón para que se presente un menor peso, diámetro y longitud de los frutos senescentes es que eran más viejos, por lo que contenían menor cantidad de endocarpio, más compacto y con una menor cantidad de agua (deshidratación).

El peso promedio del endospermo fue de 6.38 ± 0.48 g por semilla, que se encuentra dentro del rango promedio de peso reportado por Soler [74].

3.2. Rendimiento de la copra

Aunque el nombre “copra” se utiliza generalmente para referirse a la pulpa seca del coco, se adoptó en este trabajo para referirse también a la pulpa seca de la semilla del corozo. Para determinar el rendimiento de la copra en cada etapa de madurez del fruto, se pesó un lote de 15 semillas por etapa de madurez, se molió y secó. Los resultados se muestran en la tabla 3.2:

Tabla 3. 2. Peso y humedad de la copra de la palmera de corozo.

Etapas de madurez del fruto	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)
Frutos inmaduros (B1)	95.4	9.1	90.46
Frutos semimaduros(B2)	125.4	43.93	64.96
Frutos senescentes (B3)	118.1	94.94	19.61

*Los pesos corresponden al peso de 15 semillas.

Cuando los frutos se encuentran en la etapa B3, se observó que la semilla tenía una consistencia más compacta, lo cual se refleja en una menor humedad. Conforme avanza la madurez del fruto, la semilla va perdiendo humedad.

3.3. Rendimiento de aceite

Después de la extracción del aceite de cada lote de copra, se pesó el aceite obtenido. Los resultados se indican en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Rendimiento de aceite por etapa de madurez del fruto de la palmera de corozo.

Etapas de madurez del fruto	Peso de copra (g)	Peso de aceite (g)	Rendimiento de aceite % (p/p)
Frutos inmaduros (B1)	9.1	0.609	8.41
Frutos semimaduros (B2)	43.93	21.38	48.66
Frutos senescentes (B3)	94.94	57.14	60.18

*Los pesos corresponden al peso de 15 semillas.

Los frutos senescentes fueron los que arrojaron mayor cantidad de aceite, por lo tanto, un mayor rendimiento. De acuerdo con Belén-Camacho [84] la semilla de la palmera africana tiene un contenido de aceite de 40-52% p/p, la del babassu 67-69% p/p y la del cocotero 63-70% p/p. Los valores obtenidos con la palmera del corozo son mayores que los reportados para la palmera africana, similares a los del babassu y menores a los del cocotero.

3.4. Caracterización físico-química del aceite

Es importante la determinación de las propiedades físico-químicas del aceite para saber el grado de pureza de la materia prima a utilizar y garantizar la producción de un biodiesel de buena calidad. Tres de las propiedades físico-químicas más importantes fueron medidas: densidad, número de acidez y viscosidad, las cuales son consideradas generalmente como propiedades relacionadas con el buen desempeño de un biocombustible.

La viscosidad de los aceites vegetales varía en un intervalo de 37-53 mm²/s. La alta viscosidad de estos aceites se debe a su gran masa molecular y estructura química [85]. Sin embargo, con el proceso de transesterificación estos aceites (bajo la forma de ésteres de alquilo) se vuelven adecuados para su uso como combustible en motores diesel, debido a que con este proceso adquieren características cercanas al gasóleo. Por otro lado, el número de acidez debe ser menor a 0.5 mg KOH/g para evitar la saponificación y tener buenos rendimientos de la reacción de transesterificación [86]. En la tabla 3.4 se muestran los datos obtenidos de la caracterización del aceite de la palmera de corozo.

Tabla 3. 4. Caracterización físico-química del aceite de corozo obtenido en diferentes etapas de madurez del fruto de la palmera de corozo.

Etapas de madurez del fruto	Densidad (g/cm³)	Núm. de acidez (mg de NaOH/g)	Viscosidad (mm²/s)
Frutos inmaduros (B1)	-	-	-
Frutos semimaduros (B2)	0.885	0.039	30.240
Frutos senescentes (B3)	0.890	0.042	27.826

A los frutos inmaduros (B1) no se le realizó ninguna caracterización debido a que se obtuvo poca cantidad de aceite y no fue suficiente para poder realizar las pruebas.

Se encontró que la densidad del aceite de corozo (en cualquier etapa de madurez) es muy similar a la densidad del aceite de la palmera africana (0.89 g/cm^3) [87] y menor a la del aceite de babassu (0.92 g/cm^3) [88]. Con respecto al número de acidez, los valores obtenidos para el aceite de corozo son mayores en comparación con los valores encontrados por Hernández ($0.01 \text{ mg de KOH/cm}^3$). Esto podría deberse a que este autor [81] realizó la extracción del aceite por prensado, mientras que en este trabajo la extracción se realizó con n-hexano, el cual es más selectivo hacia los triglicéridos y no a los ácidos grasos libres.

La viscosidad de los aceites provenientes de semillas de las etapas B2 y B3 resultó ser similar aunque un análisis estadístico es necesario para poder determinar si hay alguna diferencia significativa. La viscosidad del aceite de corozo en la etapa de frutos semimaduros (B2) es de 30 mm/s^2 , un resultado similar al aceite del babassu (30.2 mm/s^2) [88], pero menor al de la palmera africana que alcanza los 47.30 mm/s^2 [87].

Se realizó una segunda extracción de aceite tomando 100 g de copra seca para cada etapa de maduración de la semilla y se realizó la caracterización del mismo. La tabla 3.5 muestra estos resultados.

Tabla 3. 5. Rendimiento de aceite por etapa de madurez (2ª extracción).

Etapas de madurez del fruto	Peso de copra (g)	Peso de aceite (g)	Rendimiento de aceite % (p/p)
Frutos inmaduros (B1)	100	33.86	33.86
Frutos semimaduros (B2)	100	$38.77 \pm 5.45 \text{ a}$	$38.77 \pm 5.45 \text{ a}$
Frutos senescentes (B3)	100	$62.2 \pm 1.05 \text{ b}$	$62.20 \pm 1.05 \text{ b}$

Los experimentos se realizaron por triplicado, excepto B1.
Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

De acuerdo con la tabla anterior, se confirma que los frutos senescentes son los que tienen una mayor cantidad de aceite, seguido de los semimaduros adheridos a la infrutescencia y como último los inmaduros. Estadísticamente, tanto en el peso del aceite como en el

rendimiento del aceite, se presenta una diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre las etapas B2 y B3. Cabe señalar que en los frutos semimaduros (B2) se requirió más de 24 horas para tener una extracción completa.

En el caso de la caracterización físico-química, esta se llevó a cabo cuando los aceites ya tenían aproximadamente cuatro meses de almacenamiento a 4 °C. Los resultados obtenidos se observan en la tabla 3.6:

Tabla 3. 6. Caracterización físico-química del aceite de corozo obtenido en diferentes etapas de madurez del fruto de la palmera de corozo.

Etapas de madurez del fruto	Densidad (g/cm³)	Núm. de acidez (mg de KOH/g)	Viscosidad (mm²/s)
Frutos inmaduros (B1)	0.90 ± 0.028 a	0.436 ± 0.078 a	27.5051 ± 0.0004 a
Frutos semimaduros (B2)	0.86 ± 0.028 a	0.829 ± 0.019 b	20.6432 ± 0.0002 b
Frutos senescentes (B3)	0.90 ± 0.001 a	0.075 ± 0.054 c	21.4695 ± 0.0002 b

Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

Los valores de la densidad en cualquiera de las tres etapas fueron inferiores a los reportados en la literatura para la palmera africana, babassu y el cocotero (0.91 g/cm³, 0.94 g/cm³ y 0.92 g/cm³ respectivamente). Por otro lado, se observó un aumento en los valores de Núm. de acidez en los frutos B1 y B2, los cuáles fueron altos en comparación con la palmera africana y babassu. Con respecto a la viscosidad, en cualquiera de las etapas, los valores fueron inferiores a lo reportado para las otras palmeras (39.6 mm²/s palmera africana y 30.3 mm²/s babassu) [86, 89]. Las diferencias encontradas entre los aceites analizados cuando estaban recién extraídos y después de cuatro meses de almacenamiento indicaron que hubo una degradación del aceite. En principio, el aumento del número de acidez indicó un aumento de la concentración de ácidos grasos libres por hidrólisis de los triglicéridos. Más estudios son necesarios para comprobar este fenómeno.

Estadísticamente, para los valores de densidad, no hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre los aceites de diferentes etapas de madurez, sin embargo, en el caso del número de

acidez, se encontró diferencia significativa entre las tres etapas, lo que indica que hay una relación entre el número de acidez del aceite de corozo y la etapa de madurez de la semilla. En el caso de la viscosidad, los frutos semimaduros y senescentes no presentaron diferencia significativa ($P \leq 0.05$), sin embargo, sí se presentó diferencia significativa entre estas dos muestras comparada con los frutos inmaduros.

3.5. Rendimiento del biodiesel

Para la elaboración de biodiesel se utilizaron los aceites de los frutos semimaduros (B2 y B3), debido a que fueron los que dieron un mayor rendimiento de aceite (tablas 3.3 y 3.4). En la literatura [52], se reporta la utilización de NaOH o KOH como catalizadores en la reacción de transesterificación. En trabajos previos, realizados en el CICY (no publicados), con aceite de coco, se determinó que una concentración de 1% p/p de catalizador era suficiente para llevar a cabo la reacción, por lo que se decidió probar esta concentración para el aceite de corozo. En la tabla 3.7 se muestran los resultados de rendimiento del biodiesel obtenido.

Tabla 3. 7. Rendimiento de biodiesel a partir de aceite de corozo, usando 1% p/p de KOH como catalizador.

Etapas de madurez del fruto (tipo de catalizador)	Aceite (g)	Biodiesel (g)	Rendimiento % (p/p)
B2 (NaOH)	17.5	-	-
B3 (NaOH)	17.5	6.2	35.5
B2 (KOH)	17.3	-	-
B3 (KOH)	17.3	11.8	68.20

Se puede observar que para el aceite proveniente de frutos en la etapa B2, no se logró llevar a cabo la reacción de transesterificación con ninguno de los catalizadores ya que hubo saponificación de la muestra (formación de una suspensión blanca) en ambos casos. Este fenómeno pudo ser causado por la acidez elevada del aceite, ya que se ha reportado que

valores de Núm. de acidez mayores a 0.5 mg de KOH provocan la saponificación del aceite [86, 89].

Con el aceite de los frutos de la etapa de madurez B3 sí se llevó a cabo la reacción. Se observó además que utilizando KOH como catalizador, se obtiene aproximadamente el doble de rendimiento de biodiesel [90, 91]. Con el objetivo de aumentar el rendimiento de biodiesel, se utilizó KOH como catalizador a una concentración de 2% p/p. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3. 8. Rendimiento de biodiesel a partir del aceite de corozo, con concentraciones diferentes de KOH como catalizador.

Etapa de madurez del fruto	Aceite (g)	Biodiesel (g)	Rendimiento % (p/p)
B3 (1% p/p KOH)	17.3	11.1	64.10
B3 (2% p/p KOH)	17.8	11.2	62.92
B2 (1% p/p KOH)	-	-	-
B2 (2% p/p KOH)	17.6	13.1	74.43

Para la etapa B3 se obtuvieron rendimientos similares entre las dos concentraciones del catalizador. Es necesario realizar un análisis estadístico para corroborar estos resultados. En la etapa B2, se confirmó que con una concentración de 1% p/p del catalizador no se llevó a cabo la reacción. Al utilizar una concentración de 2% p/p, sí se observó la formación de biodiesel e incluso con rendimientos mayores. Sin embargo, también es necesario realizar otros experimentos para poder confirmar este dato.

Se han realizado varios estudios en torno a las condiciones óptimas para la producción de biodiesel de aceite de la palmera africana utilizando diferentes concentraciones de catalizador: 0.5, 1 y 2% p/p obteniendo 90.5, 85.2 y 71.3% de rendimiento de biodiesel, respectivamente [92]. Cabe resaltar que se utilizaron condiciones diferentes y no se tomó en cuenta la etapa de madurez del fruto.

Considerando que cuando se utiliza 2% p/p de KOH como catalizador se obtiene el mayor rendimiento y habiendo comprobado que el aceite almacenado cambia en sus propiedades con el tiempo, se procedió a determinar la relación entre el rendimiento de biodiesel y el

tiempo de almacenamiento. Los resultados experimentales se observan en la siguiente figura.

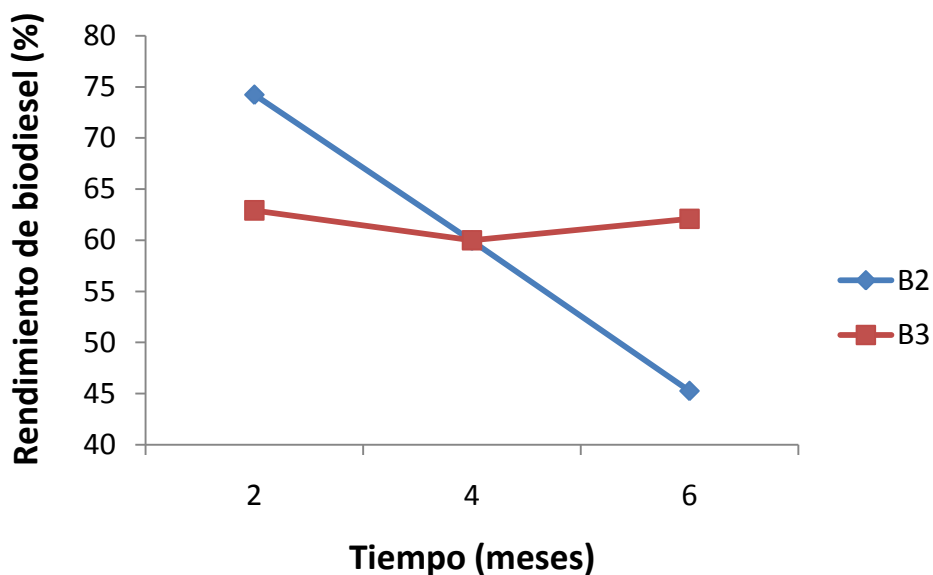


Figura 3. 1. Variación del rendimiento de biodiesel a partir de aceite de la palmera de corozo con respecto al tiempo de almacenamiento del aceite.

De acuerdo a la figura 3.1 se puede observar que el factor tiempo es muy importante e influye en el rendimiento del biodiesel. Una explicación a estos resultados puede ser atribuida a la variación observada en la calidad del aceite durante su almacenamiento. Cuando los frutos llegaron al laboratorio y se les extrajo el aceite, el número de acidez fue similar para las etapas B2 y B3 (tabla 3.4). Después de secar la copra de los frutos restantes y almacenarla por aproximadamente 4 meses a 4 °C se extrajo el aceite y se observó que el número de acidez aumentó aproximadamente en 21 veces en los frutos en etapa B2. En el caso de los frutos en la etapa B3, el aumento de acidez fue de 1.7 veces.

Se han reportado algunas de las posibles causas del porqué de este cambio en la calidad de los aceites aun cuando las copras de ambas etapas fueron almacenadas secas y a 4 °C. Algunos autores coinciden en que factores como la temperatura, la humedad y el tiempo son importantes y afectan tanto calidad como la cantidad de producto almacenado [93, 94].

Azhari *et al.* [95] reportaron que, en muchos casos, la calidad del aceite se deteriora poco a poco debido a un mal manejo de las semillas y las condiciones de almacenamiento inadecuado. Suriyong [96] reportó que el proceso de envejecimiento natural afecta la calidad de las semillas durante el almacenamiento a diversas condiciones, en particular el contenido de aceite que es sensible al deterioro como resultado de los procesos de oxidación. Por otro lado, Ghasemnezhad y Honermeier [97] indicaron que durante un tiempo de almacenamiento prolongado, el metabolismo de las semillas para proporcionar energía para sus actividades fisiológicas podría ser otra razón de la reducción de aceite. Otro factor a considerar es el grado de madurez; cuando las semillas están fisiológicamente maduras presentan la máxima calidad en todos sus atributos y se almacenan mejor que aquellas que no han alcanzado su máximo grado de madurez [98].

4.6. Caracterización físico-química del biodiesel

Una vez obtenido el biodiesel fresco, se procedió a la caracterización: densidad, número de acidez y viscosidad. Los resultados se reportan en la tabla 3.9.

Tabla 3. 9. Caracterización físico-química del biodiesel de corozo.

Etapas de madurez de fruto	Densidad (g/cm³)	Núm. de Acidez (mg de KOH/g)	Viscosidad (mm²/s)
Frutos Semimaduros (B2)	0.864 ± 0.012 a	0.024 ± 0.001 a	3.240 ± 0.141 a
Frutos Senescentes (B3)	0.871 ± 0.008 a	0.044 ± 0.007 b	2.455 ± 0.021 b

*Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

Los resultados indican que el biodiesel a partir de aceite de corozo se encuentra dentro del rango permisible de la Norma ASTM D-6751 para el biodiesel, la cual reporta para la densidad (0.86-0.90 g/cm³), número de acidez (hasta 0.5 mg de KOH/g) y la viscosidad (1.9 - 6 mm²/s). Dichas propiedades son similares a las reportadas para la palmera africana [54, 99, 100] y el babassu [101]. Sin embargo, si se compara estas propiedades con otras materias primas oleaginosas como es la soja, piñón tropical y colza, éstas reportan datos superiores en densidad y viscosidad (0.88 g/cm³ y 4.8 mm²/s respectivamente) [20].

Estadísticamente no se presentó diferencia significativa entre los frutos semimaduros y los senescentes ($P \leq 0.05$) con respecto a la densidad, sin embargo con el número de acidez y viscosidad sí hubo diferencia estadística.

4.7. Análisis cromatográfico

4.7.1. Cromatografía en capa fina

Después de la transesterificación de los aceites, diferentes derivados como los monoglicéridos (MG), diglicéridos (DG), ácidos grasos libres (AG) y algunos triglicéridos (TG) no convertidos están presentes en el biodiesel. Una mayor conversión de estos subproductos para la mejora del rendimiento y calidad del biodiesel es un reto importante en el desarrollo del proceso. La presencia de mono- y di- glicéridos provoca que el producto sea turbio. Estos dos compuestos, junto con los triglicéridos, aumentan la viscosidad del biodiesel y reducen su compatibilidad para el uso como combustible [102]. Por tanto, es esencial detectar estos subproductos, no sólo con estrategia para lograr el máximo porcentaje de conversión de los aceites en biodiesel, sino también para garantizar la calidad del mismo de acuerdo con las normas establecidas.

En la placa cromatográfica de la figura 3.2 se observan los productos y subproductos de la reacción de transesterificación. Monoglicéridos, diglicéridos, ácidos grasos libres, triglicéridos y ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiesel) fueron detectados.

Cualitativamente, se puede observar que tanto con los frutos semimaduros (B2) como con los senescentes (B3) se llevó a cabo la reacción y se obtuvo biodiesel, sin embargo, en los frutos semimaduros se aprecia ligeramente que aún contiene triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos por reaccionar, y en los frutos senescentes diglicéridos y monoglicéridos, lo que indica que se requiere mayor catalizador, tiempo ó temperatura para tener una reacción completa.

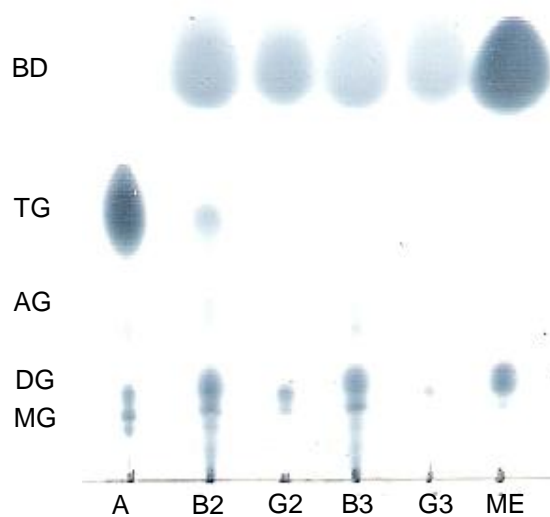


Figura 3. 2. Placa cromatográfica de capa fina. Aceite de canola (A), Biodiesel de frutos semi maduros de corozo (B2), Glicerina de frutos semi maduros de corozo (G2), Biodiesel de frutos senescentes de corozo (B3), Glicerina de frutos senescentes de corozo (G3), (ME) Estándar de linoleato de metilo. Esteres de metilo (BD), triglicéridos (TG), ácidos grasos libres (AG), diglicéridos (DG) y monoglicéridos (MG).

Además, la presencia de ésteres de metilo en la glicerina nos confirma lo comentado anteriormente; una glicerina contaminada. Esta glicerina para poder utilizarla en aplicaciones industriales o farmacéuticas requerirá de algún tratamiento, debido a que debe cumplir con alto estándar de calidad y pureza [103].

4.7.2. Cromatografía de gases-masas

Los métodos utilizados para identificar y cuantificar los ésteres de metilo de ácidos grasos fueron la cromatografía de gases-espectrometría masas (GC-MS) y la cromatografía de gases (GC-FID), respectivamente. En la figura 3.3 se puede observar el cromatograma de ion total del biodiesel obtenido de aceite de la palmera de corozo.

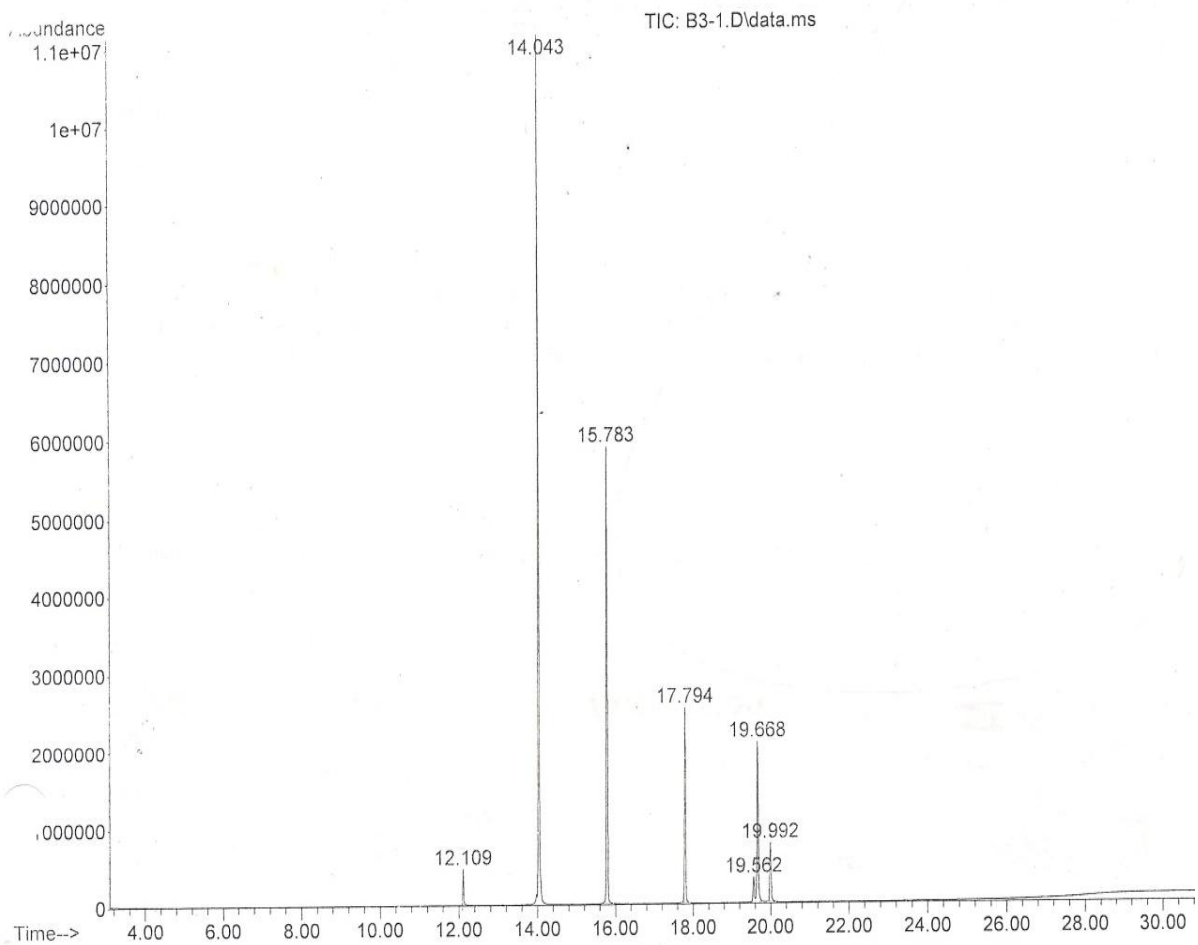


Figura 3. 3. Cromatograma de ion total (Gases-Masas) del biodiesel de corozo.

Cada compuesto (pico) del cromatograma fue identificado por comparación de su espectro de fragmentación con los que se encuentran en la biblioteca del equipo. El grado de similitud que se tomó como referencia para asignar la estructura de cada compuesto fue de $\geq 94\%$. En la siguiente tabla se presentan los ésteres de metilo de ácidos grasos identificados en el biodiesel:

Tabla 3. 10. Perfil lipídico del biodiesel del aceite de la palmera corozo.

Tiempo de retención	Compuesto	Número de carbonos
12.109	Caprilato de metilo	10:0
14.043	Laurato de metilo	12:0
15.783	Miristato de metilo	14:0
17.794	Palmitato de metilo	16:0
19.992	Estearato de metilo	18:0
19.668	Oleato de metilo	18:1
19.562	Linoleato de metilo	18:2

Los ácidos grasos que se encuentran comúnmente en los aceites vegetales son el esteárico (estearato de metilo), palmítico (palmitato de metilo), oleico (oleato de metilo) y linoleico (linoleato de metilo). Sin embargo, en algunos aceites vegetales como el cocotero, babassu y la semilla de la palmera africana además de contener estos ácidos grasos también se encuentra el mirístico (caprilato de metilo) y el láurico (laurato de metilo). Por tanto, el perfil lipídico (tabla 3.10) de la palmera de corozo coincide con los ácidos grasos reportados para la familia de palmeras [86].

4.7.3. Cromatografía de gases

Con el método de cromatografía de gases se corroboró la identificación de los ésteres metílicos de ácidos grasos por medio de la comparación de los tiempos de retención con el de estándares puros y la cuantificación de éstos.

En las figuras 3.4 y 3.5 se presentan los cromatogramas de los análisis realizados a muestras de biodiesel obtenido de aceite de frutos semimaduros y senescentes respectivamente.

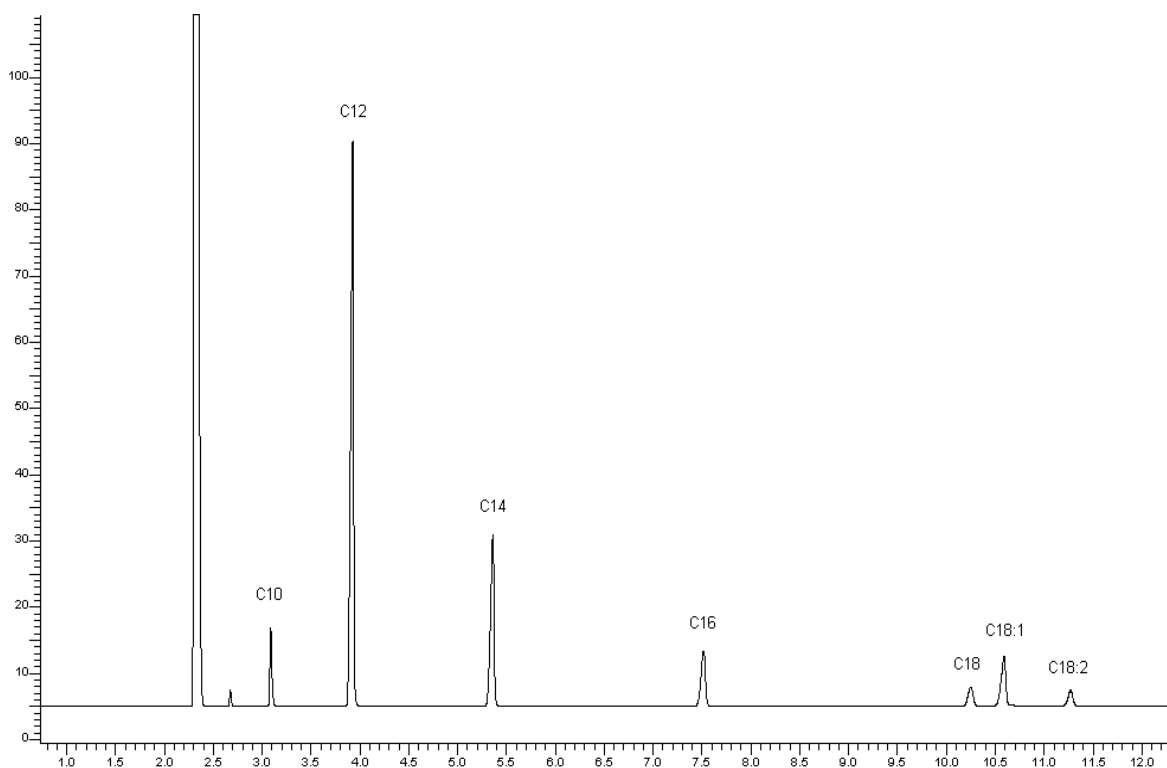


Figura 3. 4. Cromatograma de biodiesel de aceite de frutos semimaduros (B2) de corozo.

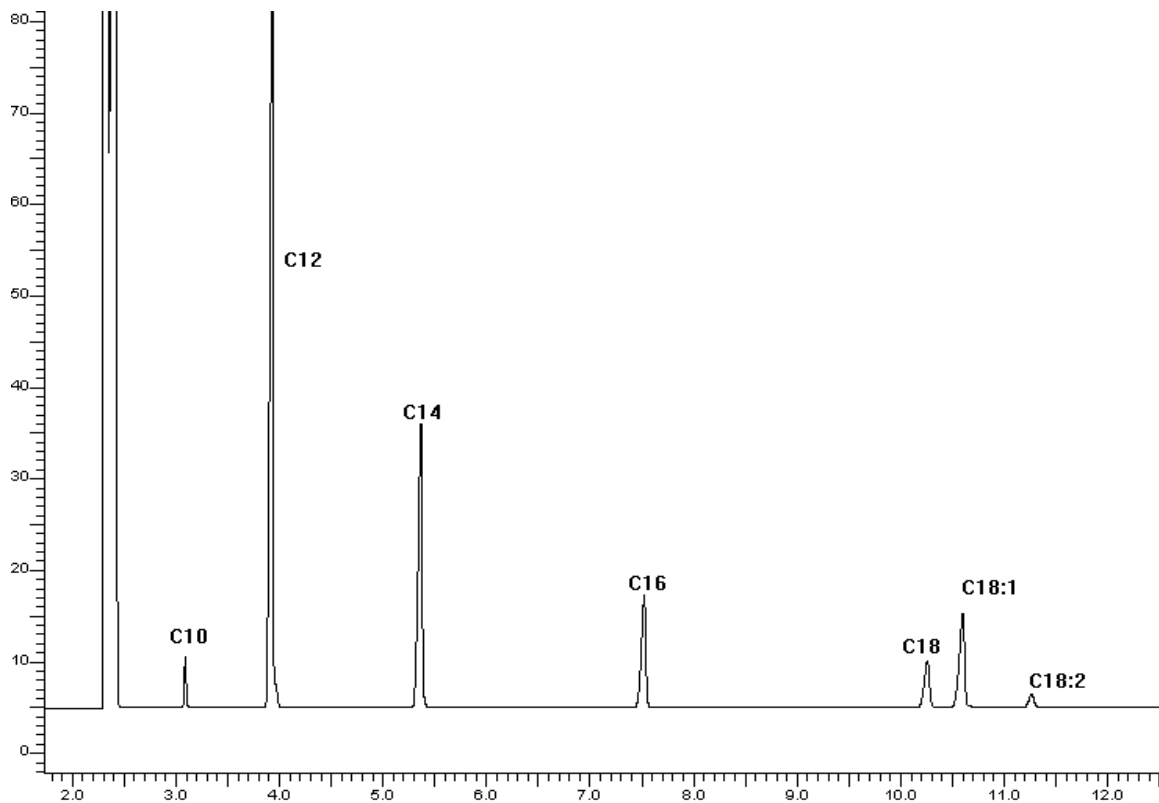


Figura 3. 5. Cromatograma de biodiesel de aceite de frutos senescentes (B3) de corozo.

La tabla 3.11 presenta la composición en ésteres metílicos de ácidos grasos del biodiesel B2 estudiado. Se observa una mayor proporción en ésteres metílicos de ácidos grasos saturados (90.17%) en comparación con los insaturados (9.83%). El éster metílico encontrado en mayor porcentaje fue el laurato de metilo con un 54.26% similar al señalado por Mora [104] para el cocotero, palmiste y babassu [101]; sin embargo, supera a lo reportado para la palmera africana.

Con respecto al biodiesel B3, el cual corresponde a los frutos semimaduros caídos, la tabla 3.12. presenta la composición de los ésteres metílicos de ácidos grasos que contiene, en donde, igual que el biodiesel B2, los ésteres metílicos de ácidos grasos saturados son los que obtuvieron una mayor composición, siendo el laurato de metilo el que obtuvo una mayor composición con 48.92%, seguido del miristato de metilo con 22.44%.

Tabla 3. 11. Composición de ésteres metílicos de ácidos grasos del biodiesel de corozo (B2).

Ester de metilo	Composición (%)
Caprilato de metilo (C10:0)	4.67
Laurato de metilo (C12:0)	54.26
Miristato de metilo (C14:0)	20.34
Palmitato de metilo (C16:0)	7.80
Estearato de metilo (C18:0)	3.10
Oleato de metilo (C18:1)	7.49
Linoleato de metilo (C18:2)	2.31

Tabla 3. 12. Composición de ésteres metílicos de ácidos grasos del biodiesel de corozo (B3).

Ester de metilo	Composición (%)
Caprilato de metilo (C10:0)	1.59
Laurato de metilo (C12:0)	48.92
Miristato de metilo (C14:0)	22.44
Palmitato de metilo (C16:0)	10.06
Estearato de metilo (C18:0)	5.12
Oleato de metilo (C18:1)	10.49
Linoleato de metilo (C18:2)	1.33

El biodiesel producido presentó una mayor proporción de ésteres metílicos saturados, por lo que se espera que presente una mayor estabilidad química comparado con el obtenido a partir de otras materias oleaginosas como la colza, girasol y soya [54]. La estabilidad oxidativa se reduce cuando hay una mayor cantidad de ésteres insaturados [42].

4.8. Producción y caracterización del fruto de la palmera coyol real [*Attalea liebmannii* (Becc.) S. Zona]

Tomando de base que el mejor rendimiento de aceite se obtuvo de los frutos senescentes, se realizó una prospección comparativa con frutos senescentes de la palmera coyol real y de esta manera, poder comparar estos resultados con los obtenidos de la palmera de corozo. Se tomaron las mejores condiciones obtenidas de la palmera de corozo para la producción de biodiesel. Para determinar el rendimiento de la copra de las semillas, ésta se molió, se pesó y se secó. Los resultados se presentan en la tabla 3.13:

Tabla 3. 13. Peso y humedad de la copra de la palmera coyol real.

Etapas de madurez del fruto	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)
Frutos senescentes (B3)	216.4	174.3	19.45

Ya teniendo la copra seca, se procedió a la extracción de aceite con hexano en el equipo Soxhlet, para posteriormente determinar el porcentaje de rendimiento de aceite. Los resultados se indican en la tabla 3.14.

Tabla 3. 14. Rendimiento de aceite de la palmera coyol real.

Etapas de madurez del fruto	Peso de copra (g)	Peso de aceite (g)	Rendimiento de aceite % (p/p)
Frutos senescentes (B3)	100	62.24	62.24

Comparando este rendimiento de 62.24% de aceite con el de la palmera de corozo 2^a extracción (62.20%) en la misma etapa de madurez, se obtuvo un resultado similar. Sin embargo, son necesarios más estudios para poder verificar el resultado.

El aceite obtenido fue caracterizado y en la tabla 3.15 se observan los resultados:

Tabla 3. 15. Caracterización físico-química del aceite de la palmera coyol real.

Etapa de madurez del fruto	Densidad (g/cm³)	Núm. de Acidez (mg de KOH/g)	Viscosidad (mm²/s)
Fruto senescentes (B3)	0.90 ± 0.001	0.074 ± 0.008	23.1376 ± 0.001

En la caracterización físico-química del aceite, los valores de densidad para ambas palmeras fue de 0.90 ± 0.001 g/cm³. Por otro lado, los valores del número de acidez fueron similares en ambas palmeras, obteniendo 0.075 ± 0.054 mg de KOH para el corozo y 0.074 ± 0.008 mg de KOH para el coyol real. En la viscosidad se tuvo para el corozo y el coyol real 21.4695 ± 0.0002 y 23.1376 ± 0.001 mm²/s respectivamente. Estadísticamente no se presentaron diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre ellas.

Una vez obtenido el aceite se procedió a realizar el proceso de transesterificación utilizando 2% p/p de KOH como catalizador.

El rendimiento y caracterización del biodiesel se observan en la tabla 3.16 y 3.17 respectivamente.

Tabla 3. 16. Rendimiento de biodiesel a partir de aceite de la palmera coyol real, usando 2% p/p de KOH como catalizador.

Etapa de madurez del fruto	Aceite (g)	Biodiesel (g)	Rendimiento %(p/p)
B3 (2% p/p KOH)	17.8	13.6	74.40

Tabla 3. 17. Caracterización físico-química del biodiesel obtenido a partir de aceite de la palmera coyol real.

Etapa de madurez del fruto	Densidad (g/cm³)	Núm. de Acidez (mg de KOH/g)	Viscosidad (mm²/s)
Fruto senescentes (B3)	0.870 ± 0.012	0.058 ± 0.014	2.76 ± 0.014

El rendimiento de biodiesel obtenido fue de 74.40%, el cual es mayor comparado con el del corozo con 62.92% en las mismas condiciones. En la caracterización, los resultados indican que se encuentran dentro del rango permisible por la Norma ASTM D-6751, la cual reporta rangos para la densidad, el número de acidez y la viscosidad del biodiesel de 0.86-0.90 g/cm³, hasta 0.5 mg de KOH/g y de 1.9-6 mm²/s, respectivamente.

En cromatografía, la prueba de control cromatográfico de capa fina nos indicó que se llevó a cabo una reacción completa y se obtuvo biodiesel, sin embargo, se aprecia ligeramente la presencia de ácidos grasos libres, diglicéridos y monoglicéridos (figura 3.6).

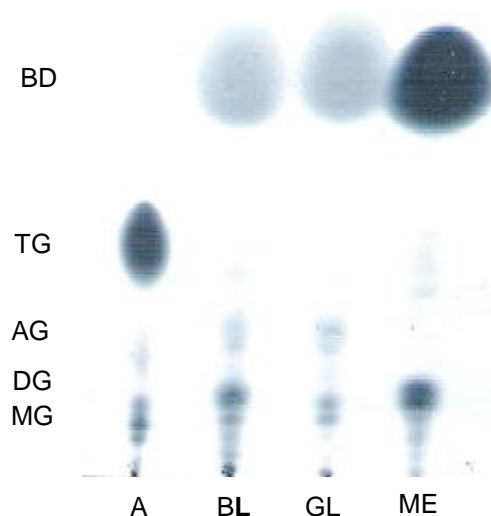


Figura 3. 6. Placa cromatográfica de capa fina. Aceite de canola (A), Biodiesel de frutos senescentes de coyol real (BL), Glicerina de frutos senescentes de coyol real (GL), (ME) Estándar de linoleato de metilo. Ésteres de metilo (BD), triglicéridos (TG), ácidos grasos libres (AG), diglicéridos (DG) y monoglicéridos (MG).

La composición lipídica del biodiesel obtenido se determinó por cromatografía de gases-espectrometría de masas (figura 3.7). Cada compuesto (pico) del cromatograma fue identificado por comparación de su espectro de fragmentación con los que se encuentran en la biblioteca del equipo. El grado de similitud que se tomó como referencia para asignar la estructura de cada compuesto fue de $\geq 94\%$.

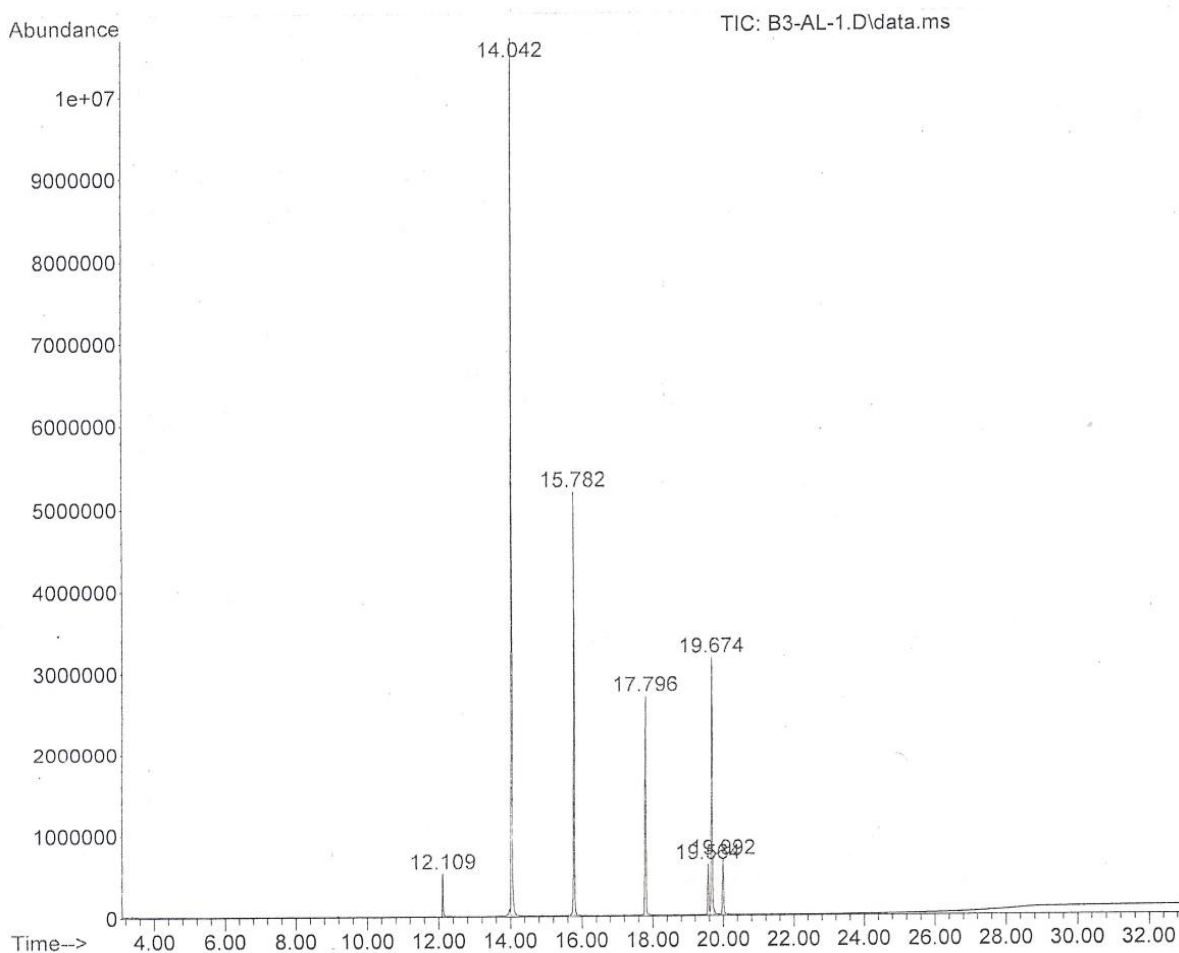


Figura 3. 7. Cromatograma de ion total (Gases-Masas) del biodiesel de la palmera coyol real.

Al igual que el aceite de la palmera de corozo, esta palmera contiene ésteres metílicos de ácidos grasos tanto saturados como insaturados, siendo los más importantes los identificados en la tabla 3.18 [89].

Tabla 3. 18. Perfil lipídico del biodiesel del aceite de la palmera coyol real.

Tiempo de retención	Compuesto	Número de carbonos
12.109	Caprilato de metilo	10:0
14.042	Laurato de metilo	12:0
15.782	Miristato de metilo	14:0
17.796	Palmitato de metilo	16:0
19.992	Estearato de metilo	18:0
19.674	Oleato de metilo	18:1
19.564	Linoleato de metilo	18:2

Para la cuantificación de los ésteres metílicos de ácidos grasos del biodiesel se utilizó cromatografía de gases. En la figura 3.8 se presenta el cromatograma correspondiente.

La tabla 3.19 presenta la composición de esteres metílicos de ácidos grasos del biodiesel, en cual los ésteres metílicos de ácidos grasos saturados obtuvieron una composición de 78.44% y 21.56% de ésteres metílicos insaturados.

La proporción de ésteres metílicos en el biodiesel puede variar en función de una serie de factores. Clegg [105] reportó que el contenido del palmitato de metilo y estearato de metilo en las palmeras se debe a la influencia de la situación geográfica.

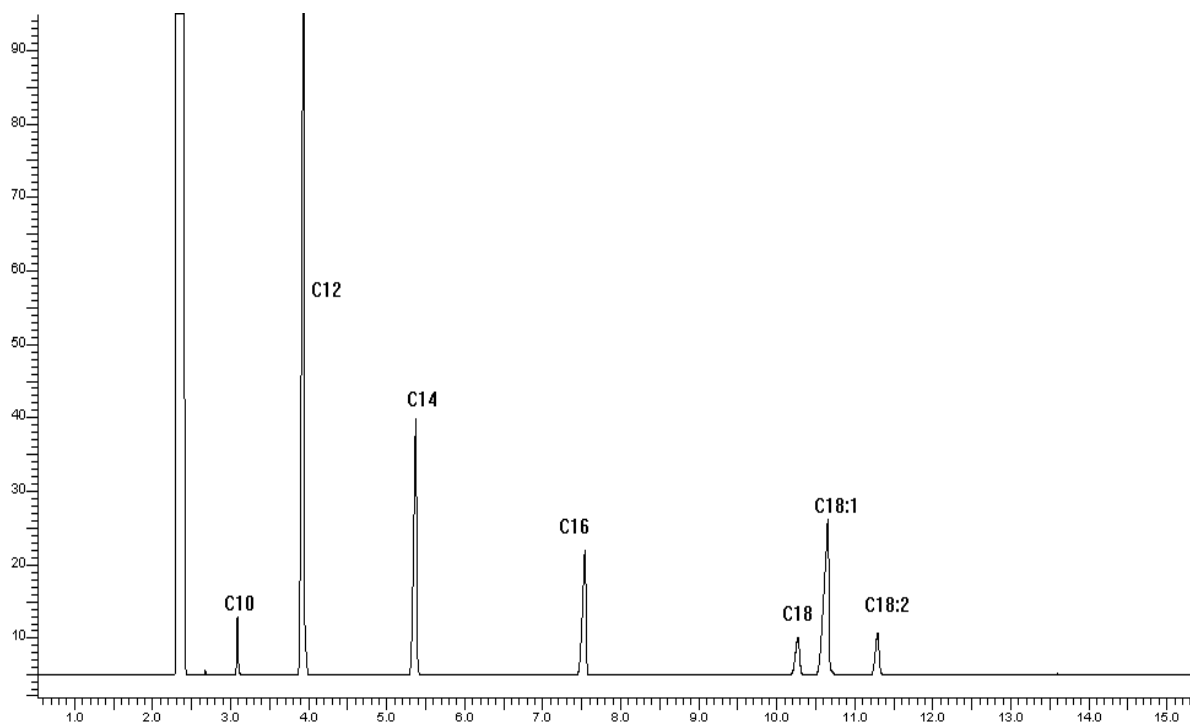


Figura 3. 8. Cromatograma del biodiesel de aceite de frutos de la palmera coyoil.

Tabla 3. 19. Composición de ésteres metílicos de ácidos grasos de biodiesel de la palmera coyoil real.

Ester de metilo	Composición (%)
Caprilato de metilo (C10:0)	1.85
Laurato de metilo (C12:0)	44.37
Miristato de metilo (C14:0)	18.27
Palmitato de metilo (C16:0)	10.35
Estearato de metilo (C18:0)	3.60
Oleato de metilo (C18:1)	17.85
Linoleato de metilo (C18:2)	3.67

Comparando entre las especies de estudio (figura 3.9), se observa que estadísticamente no hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) para el caprilato de metilo (C10) y el palmitato de metilo (C16:0), siendo la palmera de corozo el que obtuvo una mayor composición en estos ésteres metílicos. Sin embargo, para los demás ésteres metílicos de ácidos grasos sí existió una diferencia estadística significativa.

La mayor cantidad de ésteres metílicos de ácidos grasos presentes en ambas son saturados. El hecho de que estos compuestos son ésteres de cadenas cortas hace que la reacción para obtener el biodiesel sea fácil y este tenga una gran estabilidad a la oxidación.

Por lo tanto, se puede proponer que las especies de palmera del mismo género producen resultados similares, por lo que, al igual que la palmera de corozo, la palmera coyol real puede ser considerada como una opción de materia prima con potencial para la producción de biodiesel.

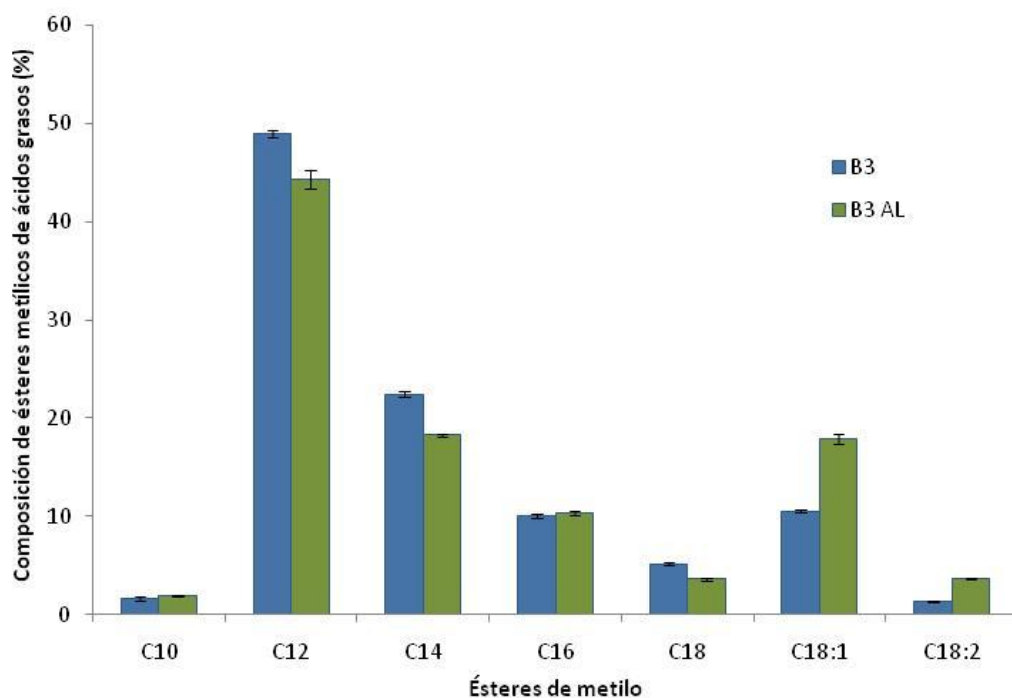


Figura 3. 9. Composición de ésteres metílicos de ácidos grasos de biodiesel de la palmera corozo y la palmera coyol real.

4.9. Estimación de producción y rendimiento

Tomando como base los resultados obtenidos del rendimiento de aceite de la copra así como el del biodiesel, además de las referencias bibliográficas obtenidas a partir de la palmera de corozo, se realizó el estimado de la producción anual tanto de aceite como de biodiesel.

Los criterios considerados en este cálculo fueron los siguientes:

- La masa promedio de la semilla entera fue de 6.7 ± 0.52 g (que constituye alrededor del 7% del fruto, en base al peso fresco).
- Se tomó un valor de producción de frutos por racimo de 800.
- La palmera puede producir 5 racimos por año.
- De acuerdo al método de siembra “tresbolillo”, con una distancia apropiada de 6.25 x 6.25 m, se obtiene una densidad de 480 palmeras por hectárea.
- 62% de rendimiento del aceite (considerando el máximo rendimiento obtenido en este trabajo).
- 74% de rendimiento de biodiesel (considerando el máximo rendimiento obtenido en este trabajo).

Aplicando la fórmula para obtener el rendimiento de aceite y tomando los datos reportados anteriormente:

$$V_a = \frac{480 \cdot 24 \cdot 0.62}{900} = 7.936 \frac{m^3}{ha}$$

Este valor equivale a 7,936 L/ha/año, los cuales servirían para la producción de biodiesel. Comparando esta producción de aceite con la de la palmera africana (5,366 L/ha/año), la palmera de corozo tiene un mayor rendimiento de aceite, además, si se compara con otras plantas oleaginosas como la *Jatropha curcas* (741 L/ha/año) o girasol (946 L/ha/año) [106], la palmera de corozo también presenta una producción mayor.

Se puede calcular la cantidad de biodiesel que se va a obtener del aceite producido mediante:

$$V_b = \frac{7.936 \cdot 900 \cdot 0.74}{871} = 6.068 \frac{m^3}{ha}$$

Este valor equivale a 6,068 L/ha/año. Al comparar esta producción con la de la palmera africana (4,744 L/ha/año), la palmera de corozo superaría en producción de biodiesel a esta palmera e incluso a otras plantas oleaginosas como la *Jatropha curcas* (con 656 L/ha/año) y el girasol (con 946 L/ha/año) [106]. Por consiguiente, la palmera de corozo es una buena opción para ser considerada para la producción a gran escala de biodiesel debido a su productividad.

4.10. Área potencial de cultivo de la palmera de corozo en la península de Yucatán

La península de Yucatán con una superficie de 141,736 km² (INEGI, 2004), está localizada en el sureste de México. Está formada por una semi-planicie de caliza terciaria de origen marino, con ligero declive hacia el norte, siendo su porción austral levemente montañosa con altitudes cercanas a los 300 msnm. Es la región de México que posee la mayor cantidad de géneros de palmas en el país, representado por 14 de éstos géneros y 20 especies [107].

Entre estas especies se encuentra la palmera de corozo, la cual crece en una vegetación de selva mediana y alta subperennifolia [106]. Un dato muy importante a considerar de esta especie es que soporta perturbaciones como la quema o la apertura de claros en la vegetación, la que la hace una buena opción de cultivo [107]. La figura 3.10 muestra la distribución potencial de plantación de esta especie de palmera, con una superficie de 1, 736,913.09 de hectáreas (INEGI, 2004) en la Península de Yucatán. Si consideramos la existencia de áreas naturales protegidas, que según lo reportado corresponde a una superficie de 846,822.426 hectáreas, quedarían para el cultivo de palmeras del género *Attalea* (tanto corozo como coyol real) 890,090.664 hectáreas.

Por lo tanto, se estimó una producción en la península de Yucatán de 6, 720, 382.773 m³/ha de aceite y 5, 138, 662.373 m³/ha de biodiesel utilizando como materia prima ya sea los frutos de la palmera de corozo ó los frutos de la palmera coyol real debido a que ambas palmeras crecen en las mismas condiciones de plantación.

Hay que tener en cuenta que esta estimación fue realizada considerando condiciones óptimas de cultivo, siendo los Estados de Quintana Roo y Campeche los que aportarían la mayor parte del biocombustible.

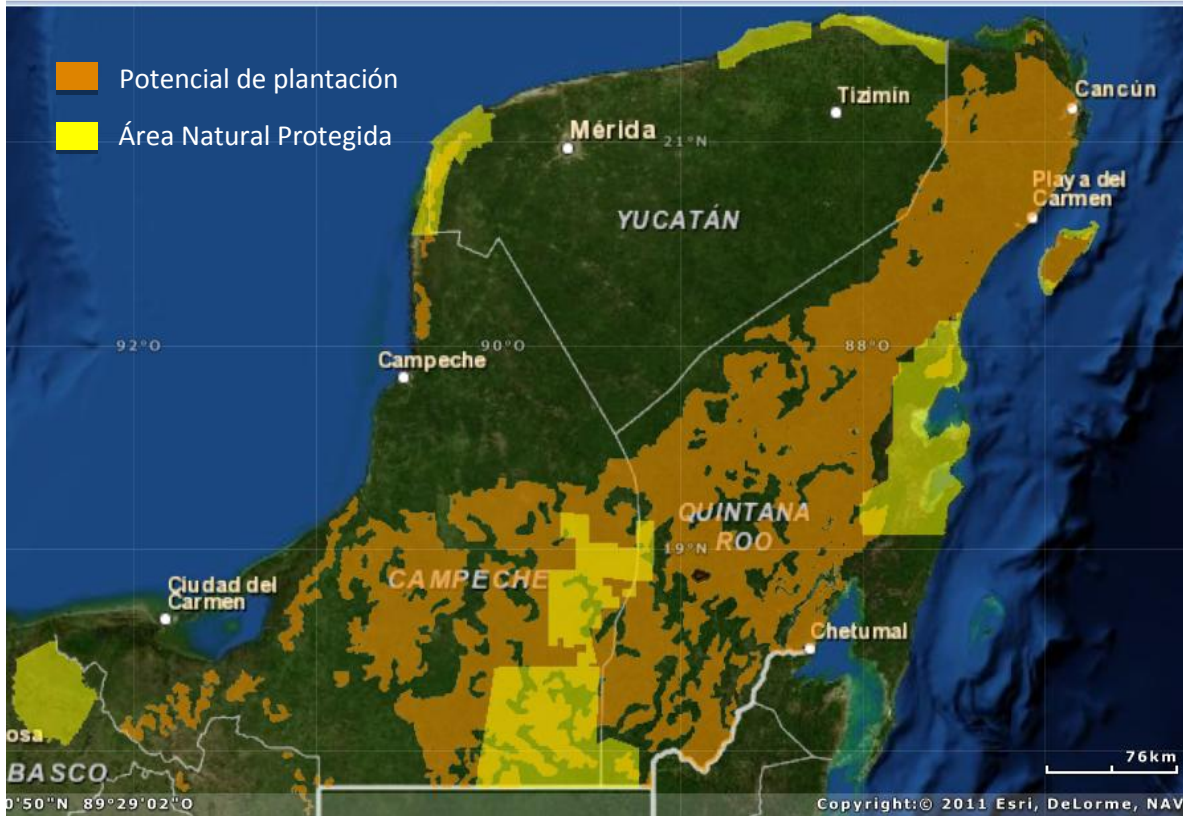


Figura 3. 10. Distribución potencial para la plantación de palmeras del género *Attalea* en la península de Yucatán (INEGI, 2004).

CONCLUSIONES

- El mejor rendimiento de aceite (62.2%), se obtuvo con los frutos senescentes (B3) de la palmera de corozo, dato importante a tener en cuenta para la cosecha.
- Con base en las condiciones encontradas para el proceso de obtención de biodiesel a partir de la palmera de corozo, empleando frutos de etapa de madurez semimaduros y 2% KOH como catalizador, se produce un máximo rendimiento de 74%.
- El rendimiento de aceite de la palmera coyol real fue de 62.24% utilizando frutos senescentes, el cual coincide con la palmera de corozo utilizando los frutos en la misma etapa de madurez.
- Utilizando las mismas condiciones de transesterificación, con el aceite de la palmera coyol real, a partir de frutos senescentes, se obtuvo un rendimiento de biodiesel del 74.40%
- El aceite de la palmera de corozo demostró ser adecuado para la obtención de biodiesel, sin necesidad de tratamiento previo. Las propiedades físico-químicas evaluadas en el aceite y el biodiesel están dentro de los límites permitidos por las normas, lo que confirma el potencial del corozo para la producción de biocombustible.
- La información obtenida por cromatografía de gases y gases-masas confirmó la composición predominante de ésteres metílicos de ácidos grasos saturados del biodiesel lo que produce un mayor número de cetano y lo hace más estable a la oxidación, sin embargo tienden a solidificarse a temperaturas bajas e incluso a temperatura ambiente.

- La cromatografía de gases y gases-masas del biodiesel de la palmera coyol real reveló que los ésteres metílicos de ácidos grasos predominantes también son saturados.
- Con la realización de este trabajo se obtuvo información nueva acerca de la caracterización y perfil de ácidos grasos del fruto de la palmera de corozo, la cual puede servir de base para estudios posteriores en el área de los biocombustibles.
- Comparando los rendimientos estimados de producción de biodiesel de la palmera de corozo con la palmera africana, esta puede ser considerada como una opción más de recurso natural por su alto potencial de producción de aceite.

PERSPECTIVAS

- Realizar mezclas del biodiesel obtenido con diesel (o biodiesel de otras materias primas) como estrategia para mejorar las propiedades de flujo a baja temperatura.
- Evaluar la factibilidad de recuperación tanto del subproducto (glicerina) del proceso de transesterificación, como de los residuos generados en el proceso (cáscara, tronco, fibra, torta, etc.) para hacer más rentable (o viable) el proceso.
- Tomando en cuenta el alto rendimiento de aceite de la palmera se recomienda realizar otros estudios para evaluar su potencial para la producción de otros biocombustibles (bioturbosina) en los que una alta cantidad de compuestos saturados es menos importante.
- En algunos casos, los experimentos no pudieron ser realizados por triplicado debido a la falta de materia prima. Se recomienda una colecta de material en toda el área identificada como potencial de cultivo en la península de Yucatán para poder realizar los experimentos y analizar los resultados estadísticamente.
- Determinar las propiedades físico-químicas faltantes del biodiesel para garantizar la calidad de este para la utilización como combustible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Reijnders, Conditions for the sustainability of biomass based fuel use, *Energy Policy* 34, 863-876, 2006.
- [2] M. López, *El biodiesel una alternativa al transporte*, Ed; Madú, España, 2005; Vol. 1, 138.
- [3] ICIS Chemical Business. Focus on surfactants hit by biodiesel, [Online]. Available: <http://www.icis.com>. [Accessed November 2009].
- [4] J. Balick, Palmas Neotropicales: fuentes de aceites comestibles, *Interciencia*, 7, 25-29, 1982.
- [5] F. Avellaneda, Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal, PhD Tesis, Universitat Rovira I Virgili, España, 2010.
- [6] BP. BP Statistical review of world energy, 2009. [Online]. Available: <http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9026015&contentId=7048013>. [Accessed November 2009].
- [7] U.S. Energy Information Administration. World Proved Reserves of Oil and Natural Gas, Most Recent Estimates, [Online]. Available: <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/reserves.html>. [Accessed November 2011].
- [8] Statistics, *Oil Gas Journal*. 36, 106, 72-76, 2008.
- [9] S. Rahmstorf, Cambio climático debido a los gases de efecto invernadero: ¿cuánto

tiempo nos queda?, *Dossier Diario La Vanguardia*. 33, 6-16, 2009.

- [10] Balat; Mustafa, Current alternative engine fuels, *Energy Sources* 27, 6, 569-770, 2005.
- [11] M. Ballesteros, Los Biocarburantes, [Online]. Available:
http://imagenes.racc.es/pub/ficheros/adjuntos_mercedes_ballesteros_jzq_ed94ed27.pdf. [Accessed Octubre 2009].
- [12] FAO, FAO and bioenergy, [Online]. Available:
<http://www.fao.org/sd/Egdirect/EGre0055.htm>. [Accessed Aug. 2007].
- [13] I. Ballesteros; M.Ballesteros; P. Manzanares; M.Negro; J. Oliva; F. Sáez, Dilute sulfuric acid pretreatment of cardoon for ethanol production, *Biochemical Engineering Journal*, 42, 84-91, 2008.
- [14] J. Krahl, The biodiesel handbook, G. Khothe, Ed.; AOCS Mission Statement, United States of America, 2005.
- [15] G. Knothe, Biodiesel and renewable diesel: A comparison, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 364-373, 2010.
- [16] P. Girard; A. Fallot, Review of existing and emerging technologies for the production of biofuels in developing countries, *Energy for Sustainable Development*, 2, 10, 92-108, 2006.
- [17] IndexMundi, Historical commodity prices: Petróleo crudo Brent, [Online]. Available:
<http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/mercancia=petroleo-crudo-brent%meses=120>. [Accessed December 2009].
- [18] M. Gui; K. Lee; S. Bhatia, Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock, *Energy*, 16, 33, 46-53, 2008.

- [19] J. Oliveira; R. Silva; C. Cícera; L. Samuel, Biodiesel de babasu (*Orbignya* sp.) Obtenido por via etanólica, *Quimica Nova*, 30, 3, 600-603, 2007.
- [20] L. Lin; Z. Cunshan; S. Vittayapadung; S. Xiangqian; D. Mingdong, Opportunities and challenges for biodiesel fuel, *Applied Energy*, 88, 4, 1020-1031, 2011.
- [21] M. Balat; H. Balat, Progress in biodiesel processing, *Applied Energy*, 87, 6, 1815-1835, 2010.
- [22] E. Shahid, Production of biodiesel: a technical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, 15, 4732-45, 2011.
- [23] J. Janaun; N. Ellis, Perspectives on biodiesel as a sustainable fuel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 14, 1312-20, 2010.
- [24] I. Atadashi; M. Aroua; A. Aziz, High quality biodiesel and its diesel engine application: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7, 14, 1999-2008, 2010.
- [25] U. Rashid; F. Anwar, Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil, *Fuel*, 3, 87, 265-73, 2008.
- [26] H. Reijnders, Biogenic greenhouse gas emissions linked to the life cycles of biodiesel derived from European rapeseed and Brazilian soybeans, *Journal of Cleaner Production*, 18, 16, 1943-8, 2008.
- [27] W. Thompson; S. Meyer; T. Green, The US biodiesel use mandate and biodiesel feedstock markets, *Biomass and Bioenergy*, 6, 34, 883-9, 2010.
- [28] A. Kinney; T. Clemente, Modifying soybean oil for enhanced performance in biodiesel blends, *Fuel Processing Technology*, 10, 86, 1137-47, 2005.
- [29] Y. Sharma; B. Singh, Development of biodiesel: current scenario, *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, 13, 6-7, 1646-51, 2009.

- [30] M. Jayed; H. Masjuki; R. Saidur; M. Kalam; M. Jahirul, Environmental aspects and challenges of oilseed produced biodiesel in Southeast Asia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 9, 2452-62, 2009.
- [31] P. Nakpong; S. Wootthikanokkhan, High free fatty acid coconut oil as a potential feedstock for biodiesel production in Thailand, *Renewable Energy*, 35, 8, 1682-7, 2010.
- [32] N. Ahouissoussi; M. Wetzstein, A comparative cost analysis of biodiesel, compressed natural gas, methanol, and diesel for transit bus systems, *Resource and Energy Economics*, 20,1, 1-15, 1998.
- [33] K. Karmakar; S. Karmakar; S. Mukherjee, Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production, *Bioresource Technology*, 101, 19, 7201-10, 2010.
- [34] J. Guerrero; D. Rodríguez; L. Serrato, Producción de biodiesel a partir de aceite de palma crudo, PhD Tesis, Universidad de Vale, 2002.
- [35] F. Lloyd-Williams; M. O'Flaherty; M. Mwatsama; C. Birt; R. Ireland; S. Capewell, Estimating the cardiovascular mortality burden attributable to the european common agricultural policy on dietary saturated fats, 86, 497-576, 2008.
- [36] S.A.R., Use of biodiesel palm by transportation sector in Japan, [Online]. Available: <http://klikkhas.bharian.com.my/CurrentNews/BH/Saturday/BeritaSawit/20090606120105/Article/index.html>. [Accessed 2009].
- [37] W. Jianxin; S. Shijin; C. Hu, Application and development of biomass fuels for transportation in China, *Tsinghua Science and Technology*, 12, 2, 223-230, 2007.

- [38] A. Agarwal, Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 3, 233-271, 2007.
- [39] American Society for Testing and Materials (ASTM) standard D6751. Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. West Conshohocken, PA: ASTM. 2009.
- [Online] <http://www.astm.org/Standards/D6751.htm>. [Accessed 2011].
- [40] European Committee for Standardization (EN). Standard EN 14214. Automotive fuels-fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines-requirements and the methods. Brussels, Belgium, 2008. [Online]
- <http://www.cen.eu/cen/Sectors/TechnicalCommitteesWorkshops/Workshops/Pages/WS61Fuel.aspx>. [Accessed 2011].
- [41] A. Agarwal; L. Das, Biodiesel development and characterization for use as a fuel in compression ignition engines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, 123, 2, 440-7, 2001.
- [42] M. Balat; H. Balat, Progress in biodiesel processing, *Applied Energy*, 87, 6, 1815-35, 2010.
- [43] A. Demirbas, *Biodiesel a realistic fuel alternative for diesel engines*, Ed.; Springer-Verlag London Limited, España, 2008, 40-45.
- [44] L. Lin; Z. Cunshan; S. Vittayapadung; S. Xiangquian, S. Mingdong, Opportunies and challenges for biodiesel fuel, *Applied Energy*, 88, 4, 1020-31, 2011.
- [45] A. Srivastava; R. Prasad, Triglycerides-based diesel fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 2, 111-33, 2000.

- [46] M. Canakci; H. Sanli, Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties, *Journal Of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35, 5, 431-41, 2010.
- [47] J. Gerpen, Biodiesel processing and production, *Fuel Processing Technology*, 86, 10, 1097-1107, 2005.
- [48] H. Fukuda; A. Kondo; H. Noda, Biodiesel fuel production by transesterification of oils, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92, 5, 405-416, 2001.
- [49] Y. Zhang; M. Dubé; D. McLean; M. Kates, Biodiesel production from waste cooking oil: Process desing and technological assessment, *Bioresource Technology*, 89, 1-16, 2003.
- [50] H. Wright; J. Segur; H. Clark; S. Coburn; E. Langdon; R. DuPuis, A report on ester interchange, *Oil and Soap*, 21, 5, 145-148, 1944.
- [51] E. Eckey, Esterification and interesterication, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 33, 575-579, 1956.
- [52] S. Peter; R. Gaswindt; H. Neuner; E. Weidner, Alcoholysis of triacylglycerols by heterogeneous catalysis, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 104, 324, 2002.
- [53] A. Agarwal, Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 3, 233-271, 2007.
- [54] M. Mittelbach; C. Remschmidt, *Biodiesel: The comprehensive handbook*, Ed. M. Mittelbach, España, 2004, 332.
- [55] B. Moser, Biodiesel production, properties and feedstocks, *In Vitro Cellular and*

Developmental Biology-Plant, 45, 3, 229-266, 2009.

- [56] A. Conde; L. Wenzel, Cinética de la transesterificación del aceite de higuerrilla, *Revista Latinoamericana de Ingeniería y Química Aplicada*, 125-141, 1974.
- [57] M. Ma; M. Hanna, Biodiesel production: a review, *Bioresource Technology*, 70, 1-15, 1999.
- [58] J. Marchetti; V. Miguel; A. Errazu, Possible methods for biodiesel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 6, 1300-1311, 2007.
- [59] Z. Helwani; M. Othman; N. Aziz; J. Kim; W. Fernando, Solid heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides with methanol: A review, *Applied Catalysis A: General*, 363, 1-2, 1-10, 2009.
- [60] C. Enweremadu; M. Mbarawa, Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 9, 2205-2224, 2009.
- [61] M. Mittelbach; S. Schober, The influence of antioxidants on the oxidation stability of biodiesel, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 80, 8, 817-823, 2003.
- [62] M. Haas, Improving the economics of biodiesel production through the use of low value lipids as feedstocks: vegetable oil soapstock, *Fuel Processing Technology*, 86, 10, 1087-1096, 2005.
- [63] L. Meher; D. Vidya; S. Naik, Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 3, 248-268, 2006.
- [64] H. Fukuda; A. Kondo; H. Noda, Biodiesel fuel Production by transesterification of Oils, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92, 5, 405-416, 2001.

- [65] L. Lin, Opportunities and challenges for biodiesel fuel, *Applied Energy*, 88, 4, 1020-31, 2011.
- [66] J. Ciria, Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel, [Online]. Available: <http://www.wearcheckiberica.es>. [Accessed 2004].
- [67] A. Atabani; A. Silitonga; Irfan Anjum; T. Mahlia; H. Masjuki; S. Mekhilef, A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4, 2070-2093, 2012.
- [68] G. Knothe, Improving biodiesel fuel properties by modifyng fatty ester composition, *Energy and Environmental Science*, 2, 7, 759-766, 2009.
- [69] A. Srivastava; R. Prasad, Triglycerides-based diesel fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 2, 111-133, 2000.
- [70] I. Lee; L. Johnson; E. Hammond, Reducing the crystallization temperature of biodiesel by winterizing methyl soyate, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 73, 5, 631-636, 1996.
- [71] A. Henderson; G. Galena; R. Bernal, Field Guide to the Palms of the Americas, *Priceton University Press*, 363, 1995.
- [72] R. Quero; J. Flores Guido, *Arecaceae de la Península de Yucatán*, in *Arecaceae de la Península de Yucatán*, Ed. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, 2004.
- [73] W. Stevens; C. Ulloa; A. Pool; O. Montiel, *Introducción gimnospermas y angiospermas (Acanthaceae-Euphorbiaceae)*, in *Flora de Nicaragua*, Ed.; Missouri Botanical Garden Press, Nicaragua, 2001.
- [74] M. Soler; E. Muto; A. Vitali, Tecnología de romper el coco babassu (*Orbignya*

speciosa), *Revista Cubana Ciencia*, 27, 717, 2007.

- [75] J. Duke, *Handbook of Nuts*, Ed. CRC Press, Florida, 2001, 343.
- [76] M. Balick; C. Pinheiro, Selected species and strategies to enhance income generation from Amazonian forests, 1993.
- [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/v0784ee0u.htm>. [Accessed 27 November 2005].
- [77] R. Corley; P. Tinker, *The Oil Palm*, Ed.; Garsington Road, England, 2003, 284.
- [78] I. IrinA; F. Colin, Agricultural practices in oil palm plantations and their impact on hydrological changes, nutrient fluxes and water quality in Indonesia: A Review, *Advances in Agronomy*, 116, 2011, 81-92.
- [79] C. Hartley, *The Oil Palm Logman*, London, 1988.
- [80] F. Rojas, *El cultivo de la palma de aceite*, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia (EUNED), 1983, 20.
- [81] C. Hernández; A. Mieres, Extracción y purificación del aceite de la almendra del fruto de la palma corozo (*Acrocomia aculeata*), *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 12, 1, 68-75, 2005.
- [82] Y. Chang; F. Ling, Caracterización biológica y de uso de palma real (*Attalea butyracea* Mutis ex L.f.) en 6 comunidades del área de conservación amistad pacífico, Costa Rica, 1998.
- [83] M. Kaieda; T. Samukana; T. Matsumoto; K. Ban; A. Kondo; Y. Shimada, Biodiesel fuel production from plant oil catalyzed by *Rhizopus oryzae* lipase in a water-containing system without an organic solvent, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 88, 6, 627-31, 1999.

- [84] D. Belén-Camcho; I. López; David García; M. González; M. Moreno; C. Medina, Evaluación físico-química de la semilla y del aceite de corozo (*Acrocomia aculeata* Jacq.), *Grasas y Aceites*, 56, 4, 311-316, 2005.
- [85] S. Mahajan; S. Konar; D. Boocock, Determining the Acid Number of Biodiesel, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 83, 567-570, 2006.
- [86] S. Singh; D. Singh, Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 200-216, 2010.
- [87] A. Mouzinho; F. Silva; A. Maciel; A. Vasconcelos, Production de biodiesel a partir de Oleo vegetal de Babasu (*Orbignya martiniana*) Empregando Catalizadores Heterogéneos Comerciais, *Departamento de Química UFPB*, 1, 1-6, 2008.
- [88] R. Leyvisor, Obtaining and characterization of biodiesel from jupati (*Raphia taedigera* Mart.) oil, *Fuel*, 90, 2945-2949, 2011.
- [89] P. Nakpong; S. Wootthikanokkham, High free fatty acid coconut oil as a potential feedstock for biodiesel production in Thailand, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 200-216, 2010.
- [90] J. Encinar; J. Gonzalez; R. Reinales, Biodiesel from used frying oil. Variables affecting the yields and characteristic of the biodiesel, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44, 5491-9, 2005.
- [91] A. Tomasevic; S. Siler-Marinkovic, Methanolysis of used frying oil, *Fuel Process Technology*, 81, 1-6, 2003.
- [92] O. Alamu, Biodiesel production from Nigeria palm kernel oil: effect of KOH concentration on yield, *Energy for Sustainable Development*, 11, 3, 2007.

- [93] K. Anderson; H. Lingnert, Influence of oxygen and copper concentration on lipid oxidation in rapeseed oil, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 75, 8, 1041-1046, 1998.
- [94] C. Chen; D. Ahn, Antioxidant activities of six natural phenolic against lipid oxidation induced by Fe⁺² or ultraviolet light, *Journal of the American Oil Chemists Society*, 75, 12, 1717-1721, 1998.
- [95] M. Azhari; R. Faiz; T. Yunus; Mohd; T. Yaw, Reduction of free fatty acids in crude jatropha curcas oil via an esterification process, *International Journal of Engineering and Technology*, 5, 2, 92-98, 2008.
- [96] S. Suriyong, Studies about mechanisms of oil seed deterioration under different storage conditions in oilseed rape (*Brassica napus* L.), *Cuvillier Verlag Gottingen*, 2, 2007.
- [97] A. Ghasemnezhad, B. Honermeier, Influence of storage conditions on quality and viability of high and low oleic sunflower seeds, *International Journal of Plant Production*, 3, 4, 39-48, 2009.
- [98] A. Ghasemnezhad, B. Honermeier, Influence of storage conditions on quality and viability of high and low oleic sunflower seeds, *International Journal of Plant Production*, 3, 4, 39-48, 2009.
- [99] P. Benjumea; J. Agudelo; A. Agudelo, Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine, *Fuel*, 88, 4, 725-731, 2009.
- [100] C. Zapata, Producción de biodiesel a partir de aceite de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos, *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 74, 151, 71-82, 2007.

- [101] J. Ribeiro, Biodiesel de babassu: evaluación térmica y oxidativo de mezclas binarias, PhD Tesis, Universidad federal de Paraíba, Brasil, 2008.
- [102] S. Chattopadhyay; S. Das; R. Sen, Rapid and precise estimation of biodiesel by high performance thin layer chromatography, *Applied Energy*, 88, 5188-5192, 2011.
- [103] F. Cardeño; L. Gallego, Refinación de la fase glicerina del biodiesel de aceite de palma empleando ácidos minerales, *Información Tecnológica*, 22, 6, 15-24, 2011.
- [104] O. Mora, Ácido láurico: componente bioactivo del aceite de palmiste, *Palmas*, 24, 1, 79-83, 2003.
- [105] J. Clegg, Am Oil, *American Chemical Society*, 50, 321-4, 1973.
- [106] T. Mata; A. Martins; N. Caetano, Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1, 217-232, 2010.
- [107] R. Orellana Lanza, Síndromes morfológicos y funcionales de las palmas de la Península de Yucatán, *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 21, 2, 651-667, 1992.
- [108] S. Fedosov; J. Brask; X. Xu, Analysis of biodiesel conversion using thin layer chromatography and nonlinear calibration curves, *Journal of Chromatography*, 218, 2785-2792, 2011.