

Evaluación de la energía de combustión y otros parámetros físico-químicos del biodiesel obtenido a partir de cinco aceites vegetales

Juan Carlos Quezada Rivera

Zamorano, Honduras

Diciembre, 2007.

ZAMORANO
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

Evaluación de la energía de combustión y otros parámetros físico-químicos del biodiesel obtenido a partir de cinco aceites vegetales

Proyecto especial presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero en Agroindustria Alimentaria en
el Grado Académico de Licenciatura.

Presentado por

Juan Carlos Quezada Rivera

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2007

El autor concede a Zamorano permiso
para reproducir y distribuir copias de este
trabajo para fines educativos. Para otras personas
físicas o jurídicas se reservan los derechos de autor.

Juan Carlos Quezada Rivera

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2007

Evaluación de la energía de combustión y otros parámetros físico-químicos del biodiesel obtenido a partir de cinco aceites vegetales.

Presentado por:

Juan Carlos Quezada Rivera

Aprobado:

Francisco Javier Bueso, Ph.D.
Asesor principal

Luis Fernando Osorio, Ph.D.
Director
Carrera Agroindustria Alimentaria

David Erazo, Ing. Agr.
Asesor

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.
Rector

DEDICATORIA

A Dios, Padre todo poderoso por darme la vida y estar en todo momento a mi lado, siendo la fuerza impulsora para seguir adelante.

A la familia encabezada por mis padres: Hipatia y Juan Carlos que han sido los formadores, educadores y amigos incondicionales que más admiro y adoro en esta vida.

A mis hermanos: Nadia y Emmanuel por ser parte junto con mis padres de los seres más importantes, queridos y motivadores de cada cosa que realizo.

A mis colegas y amigos de Zamorano en especial a César José Menéndez, Helcer Recinos y Ronny Chica por su amistad y apoyo incondicional a lo largo de los cuatro años en Zamorano.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores: Dr. Francisco Javier Bueso e Ing. David Erazo, por su apoyo y paciencia para el desarrollo de este trabajo.

Al personal del Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano por la ayuda prestada para este trabajo.

A la empresa Agroipsa por el apoyo brindado.

Al Ing. Orlando Páramo por su apoyo desinteresado y emotivo.

Al Dr. Mario Contreras y el Centro de Energía Renovable de Zamorano por su cooperación en el estudio.

RESUMEN

Quezada, J. 2007. Evaluación de la energía de combustión y otros parámetros físico-químicos del biodiesel obtenido a partir de cinco aceites vegetales. Trabajo de graduación del Programa de Ingeniería en Agroindustria. Escuela Agrícola Panamericana, Honduras. 45p.

El aceite de palma es de interés primario para la producción de biodiesel en la región latinoamericana, sin embargo existen otras fuentes de aceites vegetales alternativas que necesitan ser evaluadas para así ser consideradas como opciones para la producción de biodiesel. En el presente estudio se preparó biodiesel a través de la transesterificación metílica de los aceites de palma, soya, maíz, higuera, piñón y sustituyendo el aceite de palma de 20 a 80% por los otros cuatro aceites mencionados. Se estudiaron las propiedades físico-químicas y combustibles incluyendo densidad, viscosidad, punto de enturbamiento, poder calorífico y rendimiento de los 21 biodiesel obtenidos. Para el estudio se utilizó un Diseño Completo al Azar (DCA), con tres repeticiones para cada tratamiento. Así mismo para el análisis de los datos obtenidos se hicieron tres análisis de varianza usando PROC GLM en el programa SASTM, una separación de medias ajustadas y dos separaciones de medias por el método Tukey. El biodiesel puro de maíz mostró el mayor poder calorífico (10646 cal/g). La menor y mejor viscosidad fue para el biodiesel de piñón (0.016 Pa·s). Los mejores resultados de densidad fueron manifestados por los biodiesel de palma, soya y piñón (0.86 g/cc), asimismo el mejor rendimiento fue obtenido por el aceite de palma (96.6%). El mejor punto de enturbamiento por ser el más bajo fue del biodiesel de higuera (-5.3°C). Por último al comparar los biodiesel con el diesel de petróleo en las propiedades de densidad, poder calorífico y viscosidad siempre resultó mejor el diesel.

Palabras clave: ATSM D6751, viscosidad cinemática, punto de enturbamiento, poder calorífico, rendimiento, transesterificación metílica.

Francisco Javier Bueso, Ph.D.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Autoría.....	ii
Página de firmas.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Contenido.....	vii
Índice de cuadros.....	ix
Índice de figuras.....	x
Índice de anexos.....	xii
 1. INTRODUCCIÓN.....	 1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	3
1.4. LIMITES DEL ESTUDIO.....	4
1.5. OBJETIVOS.....	4
1.5.1. General.....	4
1.5.2. Específicos.....	4
 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	 5
2.1. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE ACEITES Y GRASAS.....	5
2.2. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	6
2.2.1 Biodiesel.....	6
2.2.2. Reacción de transesterificación.....	7
2.2.3. Influencia de los ácidos grasos en las propiedades combustibles del biodiesel.	8
 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	 10
3.1. LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO.....	10
3.2. MATERIALES.....	10
3.3. EQUIPO.....	10
3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	11
3.5. MÉTODOS.....	12
3.5.1 Extracción con solventes de aceites de piñón e higuera.....	12
3.5.2. Análisis físico-químicos de los aceites.....	12
3.5.3. Reacción de transesterificación para obtención de biodiesel por ruta metálica..	14
3.5.4. Análisis físico-químicos realizados a los biodiesel	16

3.5.5.	Análisis estadístico.....	18
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4.1.	ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS ACEITES Y BIODIESEL OBTENIDOS..	19
4.2.	PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS.....	21
4.2.1.	Aceite de palma.....	21
4.2.2.	Aceite de soya.....	22
4.2.3.	Aceite de maíz.....	22
4.2.4.	Aceite de piñón.....	22
4.2.5.	Aceite de higuera.....	22
4.3.	COMPARACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y COMBUSTIBLES DE LOS ACEITES Y BIODIESEL	23
4.4.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS QUÍMICAS Y COMBUSTIBLES ENTRE TRATAMIENTOS.....	26
4.4.1.	Punto de Enturbamiento.....	26
4.4.2.	Viscosidad.....	27
4.4.3.	Densidad.....	28
4.4.4.	Poder calorífico.....	29
4.4.5.	Rendimiento.....	30
4.5.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS QUÍMICAS Y COMBUSTIBLES ENTRE LOS BIODIESEL PUROS Y EL DIESEL DE PETRÓLEO.....	31
5.	CONCLUSIONES.....	34
6.	RECOMENDACIONES.....	35
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	36
8.	ANEXOS.....	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Algunas propiedades combustibles de cinco aceites vegetales y diesel.....	9
2. Mezclas (palma, soya, higuera, piñón y maíz) evaluadas.....	11
3. Niveles de sustitución de aceites de piñón, higuera, maíz y soya con aceite de palma en la elaboración de biodiesel para tandas de 350g	12
4. Propiedades químicas de los aceites evaluados.....	20
5. Propiedades químicas de los biodiesel	20
6. Perfil de ácidos grasos de los aceites evaluados.....	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Estructura de un triglicérido.....	5
2. Contenido de ácidos grasos en diferentes aceites vegetales.....	6
3. Reacción de transesterificación.....	8
4. Flujo de proceso para obtención de biodiesel por la ruta metílica.....	15
5. Flujo de proceso para extracción de aceites a partir de semillas de piñón e higuierilla.....	16
6. Fórmula utilizada para cálculo de rendimiento de biodiesel.....	17
7. Efecto de la transesterificación sobre la viscosidad de los aceites.....	24
8. Comparación del poder calorífico entre los aceites y biodiesel	25
9. Comparación entre las densidades de aceites y biodiesel	25
10. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre el punto de enturbamiento de los biodiesel	27
11. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre la viscosidad de los biodiesel	28
12. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre la densidad de los biodiesel	29
13. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre el poder calorífico de los biodiesel	30
14. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre el rendimiento de los biodiesel	31

15.	Comparación de la viscosidad entre los biodiesel obtenidos y diesel de petróleo.....	32
16.	Comparación del poder calorífico entre los biodiesel obtenidos y diesel de petróleo.....	32
17.	Comparación de las densidades entre los biodiesel obtenidos y diesel de petróleo.....	33

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1.	Propiedades físicas y combustibles de aceites y biodiesel	39
2.	Punto de enturbamiento de biodiesel puros y mezclados con palma.....	40
3.	Viscosidad de biodiesel puros y mezclados con palma.....	41
4.	Densidad de biodiesel puros y mezclados con palma.....	42
5.	Poder calorífico de biodiesel puros y mezclados con palma.....	43
6.	Rendimiento de biodiesel puros y mezclados con palma.....	44
7.	Propiedades de biodiesel y diesel.....	45

1. INTRODUCCIÓN

El actual sistema energético mundial no es sostenible en el largo plazo debido a los impactos ambientales que genera y a la inequidad existente en su distribución (Coello y Gnecco, 2000). Es de esta manera que surge la necesidad de investigar mecanismos que permitan obtener fuentes alternativas de energía que sean de bajo costo pero que a su vez reduzcan los impactos ambientales por su generación y utilización. El uso sostenible de la biomasa para la generación de energía, específicamente del biodiesel, puede contribuir a avanzar en este sentido.

En el esfuerzo actual por desarrollar fuentes de energías alternativas a partir de recursos renovables, se presenta la biomasa como una de las fuentes de energías más versátiles a la cual se tiene acceso. Es así que el biodiesel obtenido a partir de aceites vegetales se encuentra entre las fuentes de biomasa más disponibles y de mayor interés desde el punto de vista energético.

Los ésteres metílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de fuentes de aceites vegetales y obtenidos a través del proceso de transesterificación, es lo que se conoce comúnmente como biodiesel. Al ser sometido un aceite al proceso de transesterificación el producto que se obtiene (biodiesel), presenta menor viscosidad y mayor volatilidad que cualquier aceite.

Las características físico-químicas y combustibles del biodiesel son muy similares a las del diesel de petróleo. Gracias a esto, su utilización no requiere mayores cambios en los motores diesel convencionales. Así, puede emplearse directamente en los motores diesel, pudiéndose también utilizar como aditivo, mezclado en cualquier proporción con el diesel.

Por un lado, el uso de biodiesel implica la sustitución, parcial o total, de diesel derivado del petróleo, disminuyendo con ello la emisión de CO_2 de origen fósil, a lo que se agrega el hecho que el biodiesel emite menos CO_2 en su ciclo de vida que el fijado mediante el proceso de fotosíntesis por las plantas usadas para producirlo. Otro de los beneficios del biodiesel es que no contiene azufre y que debido a la presencia de oxígeno en su composición química su combustión es más completa, reduciendo la emisión de partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados.

El alto costo de producción que presenta el biodiesel frente al diesel de petróleo es el principal obstáculo para expandir su uso como combustible. Es por ello que se está investigando arduamente diferentes formas de reducir los costos de producción del

biodiesel, los mismos que están acrecentados principalmente por el alto costo de los aceites vegetales.

Fuentes de aceites alternativos como el piñón (*Jatropha curcas*) e higuierilla (*Ricinus communis*), son cultivos que están siendo hoy probados en diferentes países del mundo con el interés de reducir costos. Ambos cultivos presentan buena adaptación a regiones áridas y semiáridas, con precipitaciones mínimas, por lo que son consideradas especies rústicas que podrían cultivarse para obtener biodiesel.

La implementación de los cultivos de piñón e higuierilla, contribuirá al desarrollo de nuevas economías regionales por la generación de nuevos empleos para la implantación del cultivo y otros puestos de trabajo temporarios para la recolección de los frutos. Además estas especies podrán tomar un gran impulso no compitiendo con la superficie ocupada por los cultivos oleaginosos anuales, que se desarrollan bajo condiciones de la región tropical.

En este proyecto se trabajó con aceites de palma (*Elaeis guineensis*), soya (*Glycine max*) y maíz (*Zea mays*) como materias primas convencionales y también con aceites de piñón (*Jatropha curcas*) e higuierilla (*Ricinus communis*), para elaborar y caracterizar las propiedades físico-químicas y combustibles de los biodiesel.

1.1. ANTECEDENTES

En la Escuela Agrícola Panamericana no existían estudios experimentales previos al presente en los que se haya producido biodiesel a escala de laboratorio. Así tampoco se contaba con una caracterización de las propiedades físico-químicas y combustibles del biodiesel de soya, palma, higuierilla, maíz y piñón, por ello en el presente proyecto se realizó un estudio para determinar las propiedades físico-químicas y combustibles de los biodiesel mencionados.

Investigaciones realizadas en los EEUU y Brasil en los que se ha caracterizado de manera termoanalítica, física y química el biodiesel de diferentes fuentes como la higuierilla, piñón, algodón maíz y soya sirvieron de guía y soporte para el presente estudio.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El aceite de palma es de interés primario como fuente de materia prima para la producción de biodiesel en los países de clima tropical de la región latinoamericana. Sin embargo y debido a las condiciones agroecológicas de la región, existe una gama de aceites vegetales convencionales y alternativos como los provenientes del maíz, soya, piñón e higuierilla que pueden ser cultivados y usados como fuente para la obtención de biodiesel. Por ello es necesario generar información técnica-científica que categorice e identifique la materia prima que será de mayor beneficio al ser utilizada como sustituto del diesel de petróleo de acuerdo a sus propiedades físico-químicas y combustibles.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El gobierno de Honduras junto con la empresa privada tienen gran interés en promover el cultivo de la palma aceitera como fuente de materia prima para la elaboración de biodiesel y generación de empleo, por lo que desde febrero del 2006 decidieron impulsar el megaproyecto de cultivo de 200.000 hectáreas de palma africana en el país.

La meta propuesta del proyecto mencionado anteriormente busca para el año 2007 conducir el plan piloto de uso de biodiesel B20 en las flotas de autobuses. Esta meta está amenazada por los elevados precios de la palma en los mercados internacionales de aceites y grasas vegetales.

El incremento en los precios de los granos y aceites de soya, maíz y palma crea la necesidad de pensar en cultivos alternativos que eviten la competencia entre las cadenas de valores agroalimentaria y agroenergética. Por lo que en el presente trabajo se plantea partir de aceites vegetales no comestibles, e incluso que las plantas de las que se obtienen los mismos puedan ser producidas en regiones marginales -con bajas precipitaciones, en suelos livianos y con serias limitaciones de fertilidad- Nos encontramos así ante una situación realmente positiva, ya que podemos obtener altos réditos económicos en áreas o regiones que hoy se encuentran total o parcialmente depreciadas.

Con la elaboración de biodiesel de aceite de piñón (*Jatropha curcas*) y de higuierilla (*Ricinus communis*), se propone determinar el potencial de estos aceites como materias primas para la elaboración de biodiesel. Con la implementación de ambos cultivos se cubriría no solo una necesidad agrícola sino también social ya que la actividad productiva permitiría incorporar una importante cantidad de mano de obra en el sector rural, hoy desocupada por el esquema de los cultivos extensivos altamente mecanizados.

La determinación de las propiedades combustibles de *Jatropha curcas* y *Ricinus communis*, toma vital importancia al estar proponiendo a estos como aceites alternativos para la producción de biodiesel. Conociendo las características químico-físicas y combustibles de los biodiesel podremos ver como contribuirían o afectarían a los motores en los que se destine su uso en forma de B100 puro o en mezcla a diferentes niveles con otras fuentes de aceites convencionales.

Es necesario además de conocer las características físico-químicas y combustibles de cada tipo de biodiesel, asociar el costo de producción de cada una para así determinar la fuente más viable para diferentes zonas geográficas de Latinoamérica.

1.4. LIMITES DEL ESTUDIO

La deficiencia de equipos y materiales adecuados en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano para evaluación de propiedades combustibles como: número de cetano, viscosidad dinámica, densidad, punto de fulgor y otros no permitieron realizar una caracterización total y adecuada de las propiedades combustibles de los biodiesel.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. General

- Caracterizar las propiedades fisico-químicas y combustibles de los biodiesel obtenidos a partir de aceites de palma (*Elaeis guineensis*), soya (*Glycine max*), maíz (*Zea mays*), piñón (*Jatropha curcas*) e higuierilla (*Ricinus communis*).

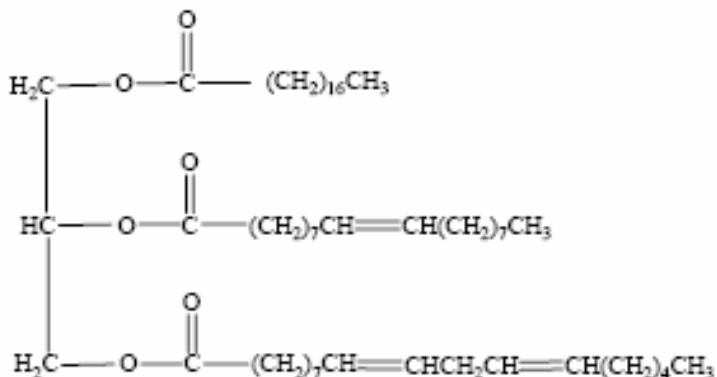
1.5.2. Específicos

- Extraer a partir de las semillas de piñón e higuierilla sus respectivos aceites.
- Caracterizar física y químicamente las propiedades de los aceites de palma, soya, maíz, piñón e higuierilla.
- Evaluar el cambio en las propiedades físicas y combustibles por efecto del proceso de transesterificación que sufren los aceites como materias primas en la producción de biodiesel.
- Caracterizar por cromatografía de gases el perfil de composición de los cinco aceites en estudio.
- Evaluar los rendimientos de biodiesel obtenidos a través del proceso de transesterificación de los aceites puros de soya, maíz, piñón e higuierilla y en niveles de sustitución de 20, 40, 60 y 80% de estos aceites sobre el aceite de palma.
- Estudiar la viscosidad dinámica, poder calorífico, densidad y punto de enturbamiento de los biodiesel de maíz, soya, palma, piñón e higuierilla y evaluar el efecto en las cuatro propiedades mencionadas al sustituir en 20, 40, 60 y 80% el aceite de palma por los otros aceites considerados para este estudio.
- Comparar las propiedades de viscosidad, poder calorífico y densidad de los biodiesel puro obtenidos con el diesel de petróleo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE ACEITES Y GRASAS

Los aceites y grasas son sustancias de orígenes vegetales o animales, insolubles en agua y solubles en solventes orgánicos. La primera distinción entre un aceite y una grasa es su apariencia física. De un modo general, los aceites son definidos como sustancias líquidas a temperatura ambiente (21 °C), en tanto que las grasas se caracterizan como sustancias sólidas a dicha temperatura. Las grasas de origen vegetal resultan de procesos de hidrogenación de aceites vegetales. Los aceites y grasas son formadas, principalmente, por triglicéridos o triacilgliceroles (Figura 1), resultante de la combinación entre tres moléculas de ácidos grasos y una molécula de glicerol (Dantas, 2006).

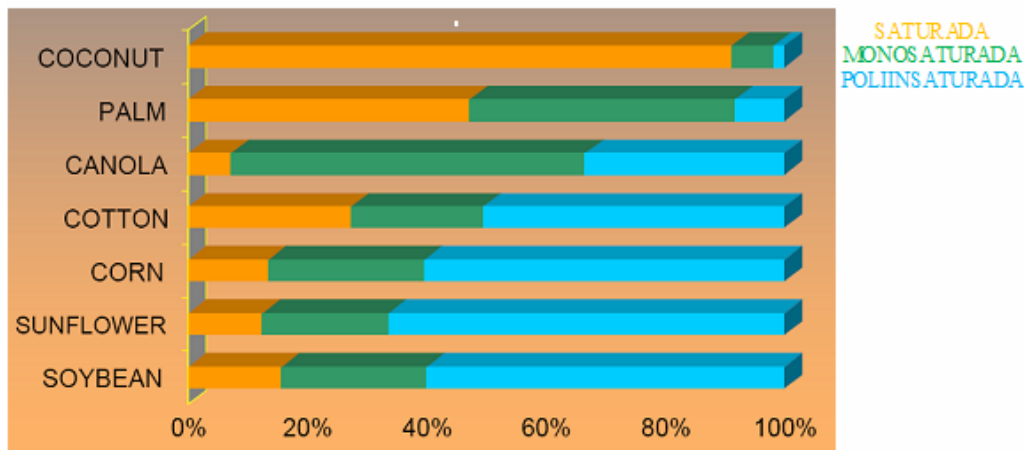


Fuente: Dantas (2006).

Figura 1. Estructura de un triglicérido

Los ácidos grasos presentes en los aceites y grasas están constituidos, por ácidos carboxílicos que contienen de 4 a 30 átomos de carbono en su cadena molecular, estos pueden ser saturados o insaturados en diferentes concentraciones para diferentes aceites vegetales (Figura 2). El número de insaturaciones puede variar de 1 a 6, siendo tres insaturaciones comunes y prevaleciendo mayor cantidad de isómeros cis, especialmente en los aceites y grasas naturales (Dantas, 2006).

Los ácidos grasos saturados se organizan con facilidad en cristales y debido a que las atracciones de Van der Waals son fuertes, estos poseen puntos de fusión relativamente elevados. La configuración cis de los enlaces dobles de un ácido graso insaturado impone una curva rígida a la cadena de carbono que interfiere con la organización cristalina, causando la reducción de las atracciones de Van der Waals entre las moléculas. Consecuentemente, ácidos grasos insaturados poseen puntos de fusión más bajos (Solomons, 2002, citado por Coneiçao y Candeia, 2007).



Fuente Embrapa (2005).

Figura 2. Contenido de ácidos grasos en diferentes aceites vegetales

2.2. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Los combustibles alternativos para motores de combustión interna son aquellos que su origen no es fósil, sino que pueden extraerse de recursos renovables e inclusive de la misma atmósfera. Entre estos están el hidrógeno y los biocombustibles (Díaz y López, 2005, citado por Dantas, 2006).

Los biocombustibles no son ninguna novedad, se ha investigado sobre ellos desde 1900. En un inicio habían sido desplazados del panorama energético debido a las ventajas económicas del petróleo respecto a ellos, sin embargo hoy el mundo se encamina nuevamente a los biocombustibles con un renovado esplendor (Díaz y López, 2005, citado por Dantas, 2006).

2.2.1 Biodiesel

El diesel esta compuesto de cadenas largas de hidrocarburos que varían en tamaño (10 a 22 átomos de carbono). Algunos ésteres y aceites vegetales presentan características muy próximas a las del diesel de petróleo cuando son sometidos a un proceso de transesterificación (Goldemberg, 2003). El biodiesel es un combustible renovable y biodegradable, ambientalmente mejor comparado al diesel de petróleo y constituido por una mezcla de ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos obtenidos por la reacción de

transesterificación de cualquier triglicérido con un alcohol de cadena corta (metanol o etanol), en presencia de un catalizador (KOH o NaOH) (Parente, 2003, citado por Vasconcelos 2005).

La sustitución total o parcial de combustibles de origen fósil siempre tuvo un claro enfoque ambiental, pues es de dominio público que las emisiones derivadas de su uso generan un aumento en la concentración atmosférica de gases causantes del efecto invernadero, lluvia ácida y deterioro de la capa de ozono (Vasconcellos, 2002).

De modo general el biodiesel, es químicamente definido como ésteres alquílicos de aceites vegetales o de grasas animales, cuya utilización está asociada a la sustitución de combustibles fósiles en motores de ignición por compresión interna (Roossi, 1998).

El biodiesel tiene todas las características necesarias para sustituir el diesel de petróleo, con la ventaja de ser virtualmente libre de azufre y de compuestos orgánicos nocivos al ser humano. Además de ser una fuente de energía renovable es biodegradable y no tóxico. Su carácter renovable está apoyado en el hecho de que sus materias primas son de origen agrícola es decir de fuentes renovables (Vasconcellos, 2002).

El biodiesel es fácilmente producido y almacenado. Tiene un pequeño riesgo de explosión y es de fácil transportación. Además de eso en el proceso de transesterificación resulta como subproducto la glicerina, siendo su aprovechamiento otro aspecto importante en la viabilización del proceso de producción del biodiesel haciendo que se torne competitivo en el mercado mundial de combustibles (Ferrari, 2005). La glicerina puede ser utilizada en la industria de cosméticos en forma de jabones, cremas, hidratantes entre otros.

Luego de extraer los aceites de las plantas oleaginosas sobra una fracción proteica, este material no necesita ser descartado ya que se le puede dar uso en la alimentación animal, abono orgánico o como combustibles para varios tipos de calderas en las industrias (Ecoviagem, 2005, citado por Soriano y Migo, 2005).

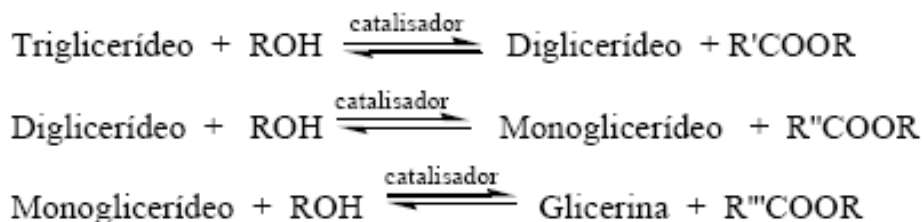
Otro detalle importante del circuito biodinámico es que el gas carbónico producido con la quema del biodiesel durante su utilización en los motores, es recuperado por la fotosíntesis de la próxima siembra de las oleaginosas cultivadas, completando el reciclaje de la naturaleza y de aprovechamiento máximo de los recursos energéticos.

2.2.2. Reacción de transesterificación

Desde el punto de vista químico la transesterificación puede ser entendida como una reacción química en la cual un éster reacciona con otro compuesto para formar un éster diferente. El otro compuesto puede ser un ácido un alcohol u otro éster (Martínez y Villamizar, 1995).

De un modo general se llama transesterificación a la reacción de un aceite o grasa (lípidos), con un alcohol para producir un éster y un co-producto (glicerol). El proceso global de transesterificación de aceites vegetales y grasas es una secuencia de tres reacciones

reversibles y consecutivas, en que los monoglicéridos y los diglicéridos son los intermediarios, conforme se presenta en la Figura 3.



Fuente: Villamizar (1995).

Figura 3. Reacción de transesterificación.

En esta reacción, son necesarios 3 moles de alcohol por cada mol de triglicerido. En la práctica es siempre utilizado un exceso de alcohol para aumentar el rendimiento en ésteres (inclinando la reacción para el lado de los productos) y permitir la separación del glicerol formado (Vargas, 1998).

La literatura apunta que la reacción de transesterificación sufre los efectos de las variaciones causadas por el tipo de alcohol, por las proporciones necesarias de alcohol, por diferentes catalizadores, por la cantidad de catalizador, por la agitación de la mezcla, por la temperatura y por el tiempo de duración de la reacción (Rabelo, 2001).

2.2.3. Influencia de los ácidos grasos en las propiedades combustibles del biodiesel

Muchas de las propiedades del biodiesel tienen origen en las estructuras de los ácidos grasos originales y del alcohol utilizado. Las características del biodiesel que son determinadas por la composición de los ésteres de ácidos grasos incluyen: calidad de ignición, calor de combustión o poder calorífico, propiedades de fluidez en frío, estabilidad oxidativa, viscosidad y lubricidad.

El número de cetano, que representa la calidad de ignición, es uno de los indicadores más importantes de la calidad del combustible para motores de compresión interna. Su valor representa relativamente el intervalo de tiempo entre la inyección del combustible y su ignición. Cuanto menor ese intervalo, mayor el número de cetano. El número de cetano decrece con la disminución del tamaño de las cadenas de los ácidos grasos y con la disminución de las insaturaciones. Biodiesel muy ricos en ácidos grasos saturados pueden presentar problemas en la quema del combustible (Knothe, 2005; Zappi et al., 2003).

Uno de los mayores problemas con el uso del biodiesel son sus propiedades de fluidez a bajas temperaturas indicadas por los puntos de fluidez (PF) y punto de enturbamiento. El punto de enturbamiento es la temperatura en la cual el material graso se torna nebuloso debido a la formación de cristales y la solidificación de ácidos grasos saturados. Los sólidos y cristales crecen rápidamente y se aglomeran, obstruyendo filtros y líneas de combustibles causando problemas de operación en los motores. Con la disminución de la temperatura, más sólidos son formados. Compuestos grasos saturados tienen puntos de

fusión más altos que los insaturados. Biodiesel con cantidades significativas de ésteres de ácidos grasos saturados presentarán PF y PN más altos y serán menos indicados para climas fríos (Knothe, 2005).

El nivel de saturación de la palma por lo general está en un rango de 50 a 55%, mientras que para los aceites de soya, piñón, maíz e higuera el nivel de saturación no pasa el 20% del total de perfil de ácidos grasos (Schuler, 2000, citado por Rodríguez y Schneider, 2005).

La viscosidad es otro de los factores más importantes para el funcionamiento correcto de los motores diesel. La viscosidad aumenta con el largo de la cadena (número de átomos de carbono) y con la saturación. Esa característica también es válida para los alcoholes, o sea que a mayor tamaño de la cadena del alcohol utilizado en la transesterificación mayor la viscosidad del producto. Es así que, ésteres etílicos son más viscosos que ésteres metílicos. La configuración de los enlaces dobles (*cis* o *trans*) tiene cierta influencia, siendo los *trans* más viscosos (Knothe, 2005).

Se presenta en el Cuadro 1, una comparación de las propiedades entre biodiesel de diversas fuentes y el diesel convencional. La viscosidad cinemática es importante pues su valor determina la facilidad con que el combustible será bombeado hasta la cámara de combustión, así como la uniformidad en la quema del mismo. La densidad también influye en el bombeo del combustible.

Cuadro 1. Algunas propiedades combustibles de cinco aceites vegetales y diesel.

Biodiesel	Viscosidad cinemática (mm²/s)	Número de cetano	Densidad (g/ml)
Maní	4.9	54	0.88
Soya	4.5	45	0.89
Palma	3.6	63	0.88
Girasol	4.6	64.3 – 70	0.86
Canola	4.2	51 - 59.7	0.88

Fuente: Knothe (2005).

Aditivos que funcionan como mejoradores de las características de flujo, como los ésteres de sorbatos y etoxilatos de sorbatos son utilizados para mejorar el desempeño del biodiesel en países con climas fríos. Así mismo el uso de sistemas de calentamiento para las líneas de combustible han dado buenos resultados sobre la fluidez del biodiesel a bajas temperaturas (Soriano y Migo, 2005).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Todos los análisis de las propiedades físico-químicas, combustibles y extracciones se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano, ubicado en el valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, 32 Km de Tegucigalpa, Honduras.

3.2. MATERIALES

- Cristalería de laboratorio.
- Columna DB-23 (60m, 0.25mm, 0.25 μ m) μ m, Agilent[®].
- Jeringa 10 μ l, graduación 0.1 μ l.
- Hidróxido de potasio, 99% puro, grado reactivo, Sigma Aldrich[®].
- Sulfato de potasio 99%, grado reactivo, Fisher Scientific[®].
- Nitrógeno conteniendo <10 mg O₂/kg.
- Carbonato de sodio 95%, grado reactivo, Fisher Scientific[®].
- Metanol al 95% grado reactivo, Fisher Scientific[®].
- Hidróxido de potasio KOH 95%, grado reactivo, Fisher Scientific[®].
- Soportes universales.
- Placas de calentamiento de laboratorio.
- Termómetros.
- Papel aluminio.
- Tolueno 95%, grado reactivo, Fisher Scientific[®].
- Éter de petróleo 99%, grado reactivo, Fisher Scientific[®].
- Agitadores magnéticos.
- Aceites de soya, maíz, palma, higerilla y piñón.

3.3. EQUIPO

- Cromatógrafo de gases GC system Agilent[®] Serie 6890. Detector de ionización de llama (FID) Agilent[®].
- Balanza analítica Mettler AE 200.
- Balanza de precisión Denver Instrument Modelo XIE-510.
- Centrífuga IEC Model K.
- Hornos NAPCO Modelo 630 y Fisher Scientific[®].

- Soxhlet LABCONCO®.
- Tanque de nitrógeno.
- Vortex Genie 2™.
- Calorímetro de bomba de oxígeno Parr modelo 1341.
- Campana de flujo laminar LABCONCO Modelo 47700.

3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Inicialmente se utilizó un Diseño Completo al Azar (DCA), en el que se emplearon 10 tratamientos, representados por los aceites de piñón, higuierilla, maíz, palma, soya y los biodiesel obtenidos a partir de ellos, con tres repeticiones para cada tratamiento, obteniéndose 30 unidades experimentales.

Posteriormente se utilizó nuevamente un Diseño Completo al Azar (DCA), en el que se tuvieron 21 tratamientos (Cuadro 2), representados por cinco niveles de sustitución de aceites de piñón, higuierilla, maíz y soya por aceite de palma de 20 a 100%, consiguiendo 63 unidades experimentales, al realizar por triplicado cada tratamiento.

Se trabajó para todo el estudio con unidades experimentales de 350g, para lo que se pesaban los aceites considerando siempre los niveles de sustitución que previamente se habían planteado para cada tratamiento (Cuadro 3).

Los tratamientos difirieron en un porcentaje determinado, con el fin de evaluar el efecto en las propiedades físico-químicas y combustibles por la sustitución del aceite de palma con cada uno de los otros cuatro aceites.

Cuadro 2. Mezclas (palma, soya, higuierilla, piñón y maíz) evaluadas.

Aceite	% de Sustitución con otros aceites en aceite de palma				
	20	40	60	80	100
Soya	T1	T5	T9	T13	T17
Higuierilla	T2	T6	T10	T14	T18
Pinón	T3	T7	T11	T15	T19
Maíz	T4	T8	T12	T16	T20
Palma					T21

Cuadro 3. Niveles de sustitución de aceites de piñón, higuierilla, maíz y soya con aceite de palma en la elaboración de biodiesel para tandas de 350g.

Aceite	% de Sustitución con otros aceites en aceite de palma				
	20	40	60	80	100
Soya	70	140	210	280	350
Higuerilla	70	140	210	280	350
Pinón	70	140	210	280	350
Maiz	70	140	210	280	350
Palma	280	210	140	70	0

La sustitución del aceite de palma se estableció para disminuir la cantidad utilizada de tal aceite, debido a que esta materia prima es la que se está utilizando en Honduras y muchos otros países latinos como primera fuente para elaborar biodiesel, sin considerar el potencial de producir biodiesel en mezcla o completamente a partir de otras oleaginosas.

Como tercer y último diseño experimental se utilizó un Diseño Completo al Azar (DCA), en el que se prepararon 6 tratamientos, conformados por los biodiesel de piñón, higuierilla, maíz, palma, soya y diesel de petróleo, teniendo de esa manera 18 unidades experimentales al realizar triplicados para cada tratamiento. Comparar las propiedades combustibles entre biodiesel y diesel de petróleo fue el objetivo de este diseño.

3.5. MÉTODOS

3.5.1 Extracción con solventes de aceites de piñón e higuierilla

Inicialmente las semillas se descascarillaron manualmente. Luego se maceraron para facilitar la penetración del solvente que consecuentemente llevó a una mejor extracción del aceite. Se formaron bolsas de aproximadamente 50 gramos de muestra las cuales se envolvieron en papel filtro y luego un conjunto de 8 bolsas se colocaban en un matraz, donde se dejaban en reposo junto con el solvente por 24 horas.

Luego de la extracción se separó el material sólido y la fase líquida se recolectó, para separar el solvente del aceite bruto obtenido. El aceite recolectado pasó a un proceso de secado en horno a 105°C por una hora. Posteriormente se realizó un filtrado al vacío para separar los sólidos en suspensión y otras partículas insolubles en aceite. Nuevamente se calentó el aceite a 110°C e inmediatamente este pasó a un segundo filtrado para así finalmente obtener el aceite listo para producción de biodiesel.

3.5.2. Análisis físico-químicos de los aceites

Los aceites fueron analizados de acuerdo a normas de la AOCS (American Oil Chemistry Society) y de la AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Los análisis para los biodiesel puros (B-100) y los niveles de sustitución que constituían los tratamientos se

realizaron de acuerdo con modificaciones sobre las normas de la ASTM (*American Society of testing and materials*).

La caracterización química de los aceites de piñón, higuera, maíz, soya y palma, fue realizada determinando parámetros como: índice de acidez, índice de ácidos grasos libres, contenido de humedad e índice de peróxidos.

Es conocido que el proceso de transesterificación es influenciado por las propiedades químicas del aceite utilizado. Según Barbosa 2006, la acidez ideal de un aceite destinado a producción de biodiesel debe estar por debajo de 2 mg KOH/g y así también el contenido de humedad por debajo de 0.5%, si ambos factores estuvieran por encima de los mencionados límites la producción de biodiesel se vería afectada en diferentes aspectos como rendimiento y tiempo de separación de fases entre monoalquil ésteres y glicerina.

Altos índices de acidez tienen un efecto negativo sobre la calidad del aceite, al punto de tornarlo impropio para la alimentación humana o incluso para fines carburantes. Además de eso, la pronunciada acidez de los aceites puede catalizar reacciones intermoleculares de los triacilglicérols, al mismo tiempo en que la estabilidad térmica del combustible es afectada en la cámara de combustión, la elevada acidez libre tiene acción corrosiva sobre los componentes metálicos del motor.

3.5.2.1. Índice de acidez

Para realizar este análisis se utilizó el método de determinación de porcentaje de ácidos grasos libres para aceites crudos y refinados descrito por la 940.28 de la AOAC (1997) y el resultado final obtenido de ácidos grasos libres se multiplicó por 1.99 para obtener el índice de acidez. Se tomaron muestras por duplicado de los cinco aceites considerados para el estudio. Los resultados obtenidos se reportaron en porcentaje.

3.5.2.2. Ácidos grasos libres

Para realizar este análisis se utilizó el método de determinación de ácidos grasos libres para aceites crudos y refinados descritos por la 940.28 de la AOAC (1997). Se tomaron muestras por duplicado de los cinco aceites considerados para el estudio, reportando los datos en porcentaje.

3.5.2.3. Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad en los aceites, se utilizó el método de destilación con tolueno AOCS Ca2a-45. Reportándose los resultados en porcentaje.

3.5.2.4. Viscosidad dinámica

Los resultados de viscosidad dinámica se obtuvieron utilizando un viscosímetro de Brookfield modelo RVDVII+, utilizando el acople número 1 y 100 RPM para todos los tratamientos por duplicado. La viscosidad fue medida en Pa·s a 40°C, utilizándose 350 ml de cada aceite.

3.5.2.5. Índice de peróxidos

Para esta evaluación se consideró el método Cd 8-53 de la AOCS, realizando pruebas por duplicado para cada uno de los cinco aceites utilizados. Los resultados se reportaron en meq peróxidos/kg.

El índice de peróxidos muestra el grado de enranciamiento que ha sufrido un aceite por exposición a factores promotores de la formación de compuestos primarios de la oxidación. Entre los factores que influyen mayormente en la rancidez de los aceites están: el calor, la luz, presencia de O₂ y metales. La aglomeración de compuestos poliméricos fruto de un avanzado proceso de rancidez altera la viscosidad en los aceites los cual es transmitido a los productos que se obtengan de sus uso como materias primas.

3.5.2.6. Perfil de ácidos grasos de cuatro aceites en estudio

Para determinar el perfil de ácidos grasos de los aceites de palma, soya, maíz y piñón se utilizó el método cromatográfico 996.06 de la AOAC, acondicionando previamente las muestras para su inyección en el CG.

Se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent modelo 6890, en conjunto con el software ChemStation. En el método de análisis se establecieron las siguientes condiciones: la temperatura del inyector fue 210°C en modo split; utilizando una columna DB-23 (60m, 0.25mm, 0.25µm); un detector FID a 210°C y la temperatura de horno a 40°C, 1min, 25°C/min hasta 120°C, 1.3°C/min hasta 200°C, 20 min. La temperatura de la columna fue de 260°C +/- 10°C. Todo el análisis tuvo un tiempo de corrido de 135 minutos utilizando nitrógeno como gas de acarreo. Los resultados se reportaron en porcentaje.

3.5.3. Reacción de transesterificación para obtención de biodiesel por ruta metílica

Inicialmente se preparó el metóxido de potasio para lo cual se mezcló 20 g de metanol con un gramo de KOH por cada 100 gramos de aceite en un beaker con agitación constante, hasta diluir totalmente el KOH.

En seguida se adicionó el metóxido de potasio, a los aceites contenidos en otro beaker colocado sobre una placa de calentamiento con agitación magnética, para efectuar la reacción de transesterificación por 60 minutos en un rango de temperatura de 50 a 60°C.

Al término de la reacción, la mezcla fue transferida a un decantador cónico, con el propósito de separar las fases. Después de 20 minutos fue posible observar dos fases bien distintas: una fase rica en ésteres metílicos (biodiesel) menos densa y más clara, y una fase rica en glicerina más densa y más oscura.

Una vez obtenido el biodiesel impuro, se siguió con la etapa de secado en la que se mantuvo el biodiesel en un horno a 100 °C por 15 minutos, con el objetivo de evaporar el agua y el alcohol residual. Por último se realizó un lavado para arrastrar sustancias hidrosolubles como metanol o catalizador presentes en el biodiesel.

Las mezclas del aceite de palma con los aceites de piñón, higuierilla, maíz y soya se realizaron previo al proceso de transesterificación, durante la etapa de pesaje de las materias primas, dosificando las cantidades de acuerdo al nivel de sustitución establecido en el diseño experimental.

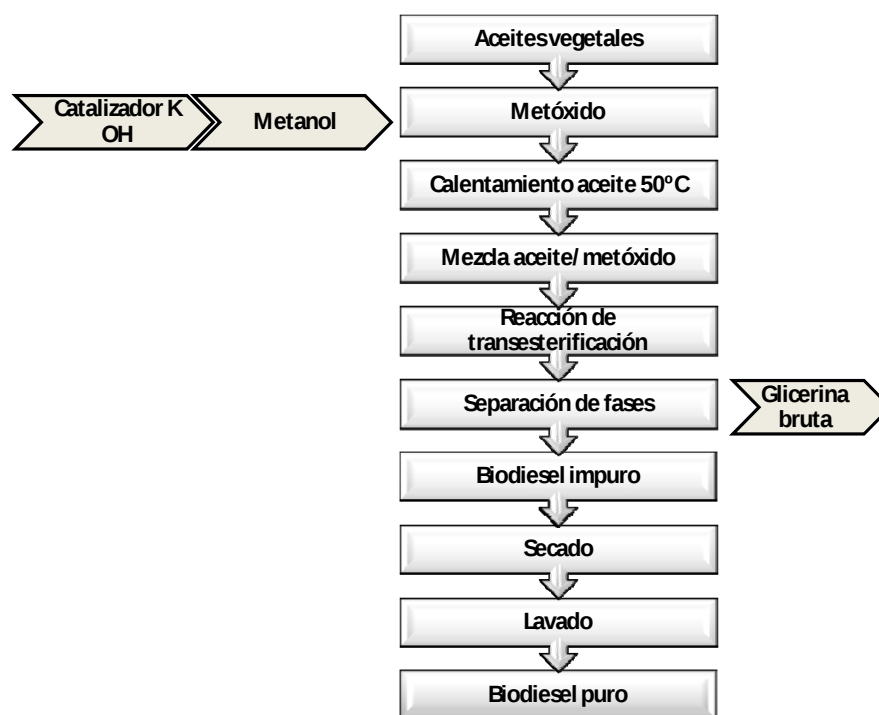


Figura 4. Flujo de proceso para obtención de biodiesel por la ruta metílica.

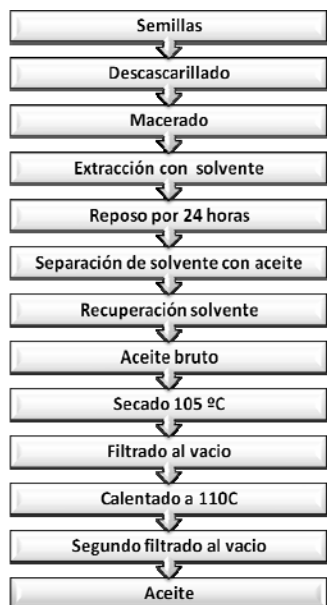


Figura 5. Flujo de proceso para extracción de aceites a partir de semillas de piñón e higuerilla.

3.5.4. Análisis físico-químicos realizados a los biodiesel

3.5.4.1. Densidad

La densidad relativa (20°C/4°C) de las muestras se determina según las Normas ASTM D 1298, D-4052 o NBR 7148, utilizándose un densímetro digital, DA-110M, fabricado por Mettler Toledo. Sin embargo para el presente estudio por no contar con el densímetro digital se procedió inicialmente a medir en un balón volumétrico de 5 ml las muestras por duplicado para cada biodiesel, luego se determinó su peso en una balanza analítica y finalmente por la relación de masa/volumen se determinó la densidad para cada muestra en g/ml.

3.5.4.2. Viscosidad dinámica

El método oficial ASTM D 445 cita que para determinar la viscosidad del biodiesel es necesario evaluar la viscosidad cinemática, sin embargo al determinar la densidad del biodiesel y la viscosidad dinámica de este, se puede obtener el dato de viscosidad cinemática.

En el LAAZ no se pudo evaluar directamente la viscosidad cinemática, ya que no cuenta con viscosímetros de tubo capilar Cannon-Fenske, que son los necesarios para el método ASTM D 445.

Los resultados de viscosidad dinámica se obtuvieron utilizando un viscosímetro de Brookfield modelo RVDVII+, con un acople número 1 y 100 RPM para todos los tratamientos por duplicado. La viscosidad fue medida en (Pa·s) y se utilizaron 350 ml de muestra a una temperatura de 40°C.

3.5.4.3. Punto de enturbamiento

Según lo descrito en la metodología ASTM D 2500, el punto de enturbamiento se determina visualizando de cerca, el combustible normalmente claro, mientras se enfría bajo condiciones cuidadosamente controladas, siendo así necesario el uso de un aparato especialmente diseñado para desarrollar el método. Para el presente trabajo por no contar con el aparato de análisis automático para el punto de enturbamiento en el laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano, se modificó el método descrito por la ASTM.

El análisis se realizó utilizando un aparato regulador de temperatura, el cual es un accesorio para el viscosímetro de Brookfield. De esta manera se logró una tasa de reducción constante de 1.2 a 1.5 °C/min al sumergir las muestras en el colector diseñado para enfriar las muestra al transferir el frío que es cedido por la circulación constante de agua a baja temperatura. El regulador de temperatura permitió llevar la muestra hasta 1°C.

Para los biodiesel en que el punto de enturbamiento fue inferior a 1°C, se utilizó un congelador con el que se conseguía disminuir la temperatura de la muestra hasta -15°C. Los resultados obtenidos fueron reportados en °C.

3.5.4.4. Poder calorífico

El poder calorífico fue determinado con un calorímetro de bomba de oxígeno Parr modelo 1341 de acuerdo con el manual de instrucciones del aparato. Muestras de 1 gramo aproximadamente se pesaban y colocaban en la bomba calorimétrica a una presión de 15 atm. La bomba se sumergía en 2 litros de agua. Luego de la estabilización de la temperatura, la muestra y el oxígeno presurizado se quemaban con auxilio de una unidad de ignición. La temperatura del agua aumentaba y la diferencia entre las temperaturas final e inicial era utilizada para calcular el poder calorífico que se reportó en cal/g. Los tratamientos fueron analizados por duplicado.

3.5.4.5. Rendimiento

Los rendimientos de los ésteres producidos se calcularon considerando la estequiometría de la reacción de transesterificación y calculándose la masa molecular media de los triglicéridos con base en la composición de ácidos grasos de cada aceite. Los resultados fueron reportados en porcentaje.

Se utilizó la formula utilizada por Guarieiro 2006 (Figura 6), para la determinación del rendimiento de biodiesel.

$$m_{FB100} = \frac{m_{IA} * (MM_A + 4)}{MM_A} \quad R = \frac{m_f * 100}{m_{FB100}}$$

Figura 6. Formula utilizada para cálculo de rendimiento de biodiesel

Donde:

Mf = masa final
Mfb100= Masa final de
biodiesel 100
MIA = Masa inicial de
aceite
MMA= Masa molar de
aceite

3.5.5. Análisis estadístico

El primer diseño estadístico se planteó con el propósito de evaluar el efecto de la transesterificación sobre propiedades iniciales de los aceites. Los resultados de densidad, poder calorífico y viscosidad se analizaron en el programa estadístico SAS® versión 9.1 por medio de un análisis de varianza (ANDEVA), con la prueba de separación de medias Tukey, utilizando el modelo lineal general (GLM). Con un nivel de significancia de $P < 0.05$.

En el segundo diseño se evaluaron: densidad, poder calorífico, punto de enturbamiento, viscosidad y rendimiento de los biodiesel. Los resultados obtenidos se analizaron en el programa estadístico SAS® versión 9.1, por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) con la prueba de separación de medias ajustadas Tukey, utilizando el modelo lineal general (GLM) y fijando un nivel de significancia de $P < 0.05$.

Por último los resultados de densidad, poder calorífico y viscosidad obtenidos de los biodiesel y diesel se analizaron en el programa estadístico SAS® versión 9.1, por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) con la prueba de separación de medias Tukey. Fijando un nivel de significancia de $P < 0.05$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS ACEITES Y BIODIESEL OBTENIDOS

Conforme a los resultados presentados en el Cuadro 4 el índice de acidez estuvo por debajo de 0.1 mg de KOH/g, para los aceites convencionales de maíz, soya y palma, mientras que para los aceites de piñón e higuierilla se encontraron índices de acidez próximos a los 4 mg de KOH/g.

De acuerdo con Knothe (2005), el nivel óptimo de acidez para un aceite que será dirigido a la producción de biodiesel debe ser inferior a 1 mg KOH/g, con lo que se determinó que las condiciones ideales de acidez fueron presentadas únicamente por los aceites de maíz, palma y soya; mientras que los aceites alternativos de piñón e higuierilla no cumplieron con las norma mínima de calidad establecida.

Se discutirá posteriormente, que la alta acidez inicial de los aceites de piñón e higuierilla mermaron los rendimientos de los biodiesel que se obtuvieron al partir de ambos aceites como materias primas.

Otro de los parámetros químicos evaluados fue el contenido de ácidos grasos libres, el cual representa la mitad de la acidez de acuerdo con el método 940.28 de la AOAC (1997). Según Barbosa (2006), el índice de ácidos grasos libres superior al 1% afecta negativamente el mecanismo de la reacción de transesterificación, con efectos negativos iguales a los que se presentan por el alto índice de acidez.

Los índices de peróxidos obtenidos para los cinco aceites considerados para el presente estudio se ubicaron en un rango de 2 a 9 meq de peróxidos/Kg; siendo los aceites de soya y maíz los que presentaron menor y mayor índice de peróxidos respectivamente.

Los altos índices de peróxidos (Cuadro 4), para los aceites de palma y maíz estuvieron influenciados por el prolongado tiempo de almacenamiento que ambos aceites tenían al momento que fueron obtenidos. Asimismo el perfil de ácidos grasos que compone el aceite de maíz influyó directamente sobre el nivel de rancidez ya que existe una relación directa entre el mayor grado de insaturación (presencia de enlaces dobles) y la alta incidencia de rancidez en los aceites.

Según Arce (2006), el nivel máximo permisible de peróxidos es de 0.5 meq/Kg, con lo que se puede sostener que el nivel de rancidez de todos los aceites evaluados no cumplió

con el padrón de calidad establecido, afectando esta condición la estabilidad y calidad de los biodiesel.

Cuadro 4. Propiedades químicas de los aceites evaluados.

Parámetro	Aceites				
	Palma	Soya	Maíz	Piñón	Higerilla
Índice de ácidos grasos libres (%)	0.04	0.02	0.03	2.00	2.00
Índice de acidez (mg KOH/g)	0.08	0.04	0.06	3.98	3.98
Contenido de Humedad (%)	0.10	0.00	0.20	0.40	0.40
Índice de peróxidos (meq perox/kg)	4.99	2.05	9.01	2.98	2.96

Se determinaron los mismos parámetros químicos de los aceites para los biodiesel. Luego del proceso de transesterificación el contenido de humedad disminuyó (Cuadro 5). Tal hecho es justificado por la etapa de secado que implicó la producción de biodiesel, en el que se mantuvieron los biodiesel por 3 horas en un horno a 105°C.

Todos los biodiesel cumplieron con la normativa ASTM D6751, que establece como límite máximo de acidez 0.5 mg KOH/g.

La disminución de la acidez y por tanto de los ácidos grasos libres en los biodiesel obtenidos de piñón e higerilla estuvo relacionado con reacciones de saponificación que ocurren entre los ácidos grasos libres y el hidróxido de potasio que se utilizó como catalizador de la reacción de transesterificación. De esta manera ocurrió la neutralización de los ácidos grasos libres y por ende la disminución del índice de acidez.

De acuerdo con el Cuadro 5 el índice de peróxidos que presentaron los biodiesel, fue inferior a los aceites. Esta reducción se manifestó debido a la solubilidad en agua de los compuestos secundarios que se forman de la oxidación como los hidroperóxidos y peróxidos, los mismos que fueron arrastrados durante la etapa de lavado del biodiesel con agua caliente a 85-90°C.

Cuadro 5. Propiedades químicas de los biodiesel

Parámetro	Biodiesel				
	Palma	Soya	Maíz	Piñón	Higerilla
Índice de ácidos grasos libres (%)	0.05	0.02	0.03	0.10	0.13
Índice de acidez (mg KOH/g)	0.10	0.05	0.05	0.20	0.25
Contenido de Humedad (%)	0.10	0.00	0.00	0.10	0.20
Índice de peróxidos (meq perox/kg)	2.98	1.50	8.46	0.99	2.50

4.2. PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS

Para determinar la composición de AG saturados, insaturados y poliinsaturados de los aceites evaluados, se realizaron los correspondientes análisis cromatográficos.

4.2.1. Aceite de palma

El aceite de palma RBD que se utilizó para este estudio fue obtenido a través de Corporación Dinant. Según resultados obtenidos (Cuadro 6) el aceite de palma presentó 51.15% de AG saturados, 38% de AG monoinsaturados (ácido oleico) y 10.5% de AG poliinsaturados (ácido linoleico) en su composición.

El perfil de ácidos grasos típico para el aceite de palma corresponde a: 50 a 55% de AG saturados, 35 a 40% de AG monoinsaturados (oleico) y 10.5% de AG poliinsaturados. Estos porcentajes reportados en la literatura son bastantes acordes a los obtenidos en el presente estudio (Schuler, 2000, citado por Rodríguez y Schneider, 2005).

El alto grado de saturación que presentó el aceite de palma (51%) en su composición conllevó a efectos negativos sobre ciertas propiedades combustibles de los biodiesel que se obtuvieron al usarlo como materia prima, tal es el caso del punto de enturbamiento alto que presentó en comparación a biodiesel obtenidos de fuentes de aceite con menor saturación, así también propiedades como viscosidad y poder calorífico se vieron afectadas por el grado de saturación de este aceite.

Cuadro 6. Perfil de ácidos grasos de los aceites evaluados

Tipo de saturación	Ácidos grasos	Número de carbonos	Aceites				
			Palma	Soya	Maíz	Piñón	Higuerilla
			-----%-----				
Saturados	Mirístico	C14:0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	Palmítico	C16:0	45.2	11.0	10.0	16.4	2.0
	Esteárico	C18:0	4.9	4.5	3.0	5.5	3.0
	Araquídico	C20:0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Insaturados	Palmitoléico	C16:1	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
	Oléico	C18:1	38.0	21.6	40.0	40.5	3.0
	Ricinoléico	C18:1	0.0	0.0	0.0	0.0	85.0
	Vaccénico	C18:1	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0
	Eicosanóico	C20:1	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
Poliinsaturados	Linoleico	C18:2	10.5	54.0	48.0	37.0	1.0
	Linolénico	C18:3	0.0	6.7	0.0	0.0	5.0

4.2.2. Aceite de soya

El contenido de ácidos grasos saturados en el aceite de soya fue 16%, mientras que los AG monoinsaturados y poliinsaturados sumaron entre ambos 85% del total de la composición de ácidos grasos (Cuadro 6), lo que concuerda con la literatura (Schuler, 2000, citado por Rodríguez y Schneider, 2005).

El ácido graso encontrado en mayor proporción como parte del perfil del aceite de soya evaluado fue el linoleico (54%). El alto contenido de ácido linolénico (6.7%) en comparación a los demás aceites evaluados, concede al aceite de soya ciertas características que son ventajosas al momento de evaluar sus propiedades como materia prima para elaboración de biodiesel, pero también lo vuelve más susceptible al daño por oxidación.

4.2.3. Aceite de maíz

El perfil de AG para el aceite de maíz (Cuadro 6), utilizado en este estudio estuvo mayormente constituido por AG poliinsaturados: ácido linoléico (48%), ácido oleico (40%). Estos datos obtenidos concuerdan con la literatura (Schuler, 2000, citado por Rodríguez y Schneider, 2005).

El nivel de saturación fue bajo, representando apenas un 13% del perfil. A partir de los resultados obtenidos se puede definir que los aceites de soya y maíz, debido a su alto contenido de ácidos grasos de cadena larga y alta insaturación mostraron ventajas frente a los biodiesel de otras fuentes en propiedades combustibles evaluadas como: alto poder calorífico y bajo punto de enturbamiento.

4.2.4. Aceite de piñón

El nivel de saturación e insaturación para el aceite de piñón mostró niveles similares al de los aceites de soya y maíz analizados, siendo la saturación 22%. El ácido palmítico fue el de mayor presencia con 16%, en tanto que la insaturación y poliinsaturación sumaron un 79% en el perfil de AG para este aceite.

4.2.5. Aceite de higuera

En el análisis realizado se obtuvo 85% de ácido ricinoleico (Cuadro 6). El perfil de ácidos grasos obtenido fue similar al reportado en la literatura (Vasconcellos 2002).

De acuerdo con Coneição y Candeia (2007), el costo de producción del biodiesel de higuera es menor al de otras fuentes de aceites vegetales, esto debido a la solubilidad en alcohol del aceite de higuera permitiendo que la transesterificación ocurra a temperatura ambiente.

4.3. COMPARACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y COMBUSTIBLES DE LOS ACEITES Y BIODIESEL

Las diferencias en las propiedades físico-químicas de los biodiesel estuvieron directamente influenciadas por el perfil de ácidos grasos que presentaron los aceites. De esta manera mayor grado de saturación como el aceite de palma (50%) derivó en mayor punto de enturbamiento. Por otra parte mayor tamaño de las cadenas de ácidos grasos de los aceites de maíz y soya (oleico C18:1 y linoleico C18:2), cedieron mayor poder calorífico a los biodiesel de ambas fuentes.

Como se muestra en el Anexo 1 y Figura 7, existieron diferencias significativas entre viscosidad a 40°C, poder calorífico y densidad de los aceites y biodiesel. La mayor viscosidad y con un valor bastante alto la presentó el aceite de higuierilla (0.21 Pa·s) seguido por los aceites de palma, piñón, maíz y soya.

La viscosidad estuvo influenciada por el nivel de saturación e insaturación que presentaron los aceites, siendo menos viscosos a mayor insaturación, como fue el caso de la soya y maíz. Para el caso del aceite de higuierilla este presentó tan elevada viscosidad por la presencia de un grupo hidroxilo en el carbono 12 de la cadena de 18 carbonos que constituye el ácido ricinoléico, que a su vez forma entre 85 y 90 % de la composición del aceite.

El proceso de transesterificación disminuye la viscosidad de los aceites vegetales. De esta manera estos pueden ser utilizados como combustibles en forma de metil ésteres (biodiesel), al reemplazar la glicerina de los triglicéridos por los radicales de alcoholes de cadena corta como el metanol (Figura 7).

La mejor viscosidad por ser la más baja la mostró el biodiesel de piñón (0.016 Pa·s), seguido por el aceite de soya y maíz que a la vez manifestaron diferencias significativas entre ellos. Se puede notar también que tanto el biodiesel de palma como el de higuierilla mostraron diferencias significativas entre sí, siendo estos a su vez los de mayor viscosidad.

En este estudio se obtuvieron viscosidades en el rango de 0.016 a 0.023 Pa·s, con lo que se cumple con lo reportado en la literatura (Lang y Dalai, 2001).

Los biodiesel de maíz y soya mostraron el mayor poder calorífico (10646 y 10562 cal/g respectivamente), siendo significativamente diferentes entre sí (Anexo 1 y Figura 8). El alto poder calorífico de ambos biodiesel se debió al tamaño grande de las cadenas de ácidos grasos que componen tales biodiesel.

De acuerdo con El National Renewable Energy Laboratory (2004), el poder calorífico del biodiesel de soya es 9000cal/g, lo cual difiere en un 15% con los resultados obtenidos para el biodiesel de soya en este estudio. Esta situación se pudo dar por diferencias en el perfil de ácidos grasos del aceite de soya proveniente de diferentes zonas.

Los aceites también manifestaron un poder calorífico elevado e incluso superaron a los biodiesel que se produjeron a partir de otras fuentes de aceite, como el caso del aceite de soya en comparación a los biodiesel de palma, piñón e higuierilla (Figura 8). Por esta causa se sustenta que un aceite puede ser quemado en un motor diesel como combustible, sin embargo su utilidad esta limitada por otros parámetros técnicos como la baja volatilidad y alta viscosidad.

Debido al cambio de la molécula de glicerol por tres de metanol en la estructura del triglicérido cuando ocurre el proceso de transesterificación, se incrementa el poder calorífico de los biodiesel en comparación al de los aceites, ya que las tres moléculas de metanol contienen mayor poder de calorífico que el glicerol. De esta manera se puede observar en los resultados obtenidos que el biodiesel de soya aumentó su poder calorífico en un 7% comparándolo con el aceite. De la misma forma se dieron incrementos en el poder calorífico para los biodiesel obtenidos de palma, maíz, piñón e higuierilla en 1, 10, 3 y 1% respectivamente.

Observando la densidad de los aceites y biodiesel (Anexo 1 y Figura 9), se puede notar que sólo el aceite de higuierilla manifestó diferencias significativas con los demás aceites y biodiesel, presentando a la vez la mayor densidad.

Se encontraron diferencias significativas entre aceites y biodiesel (Figura 9), se puede ver que siempre se encontraron diferencias significativas entre aceites y biodiesel, mostrando menor densidad los biodiesel en comparación a los aceites. Este comportamiento fue igual al reportado por Da Silva (2005), donde establece un rango de densidad entre 0.86 y 0.88 g/ml para biodiesel de soya, palma y girasol.

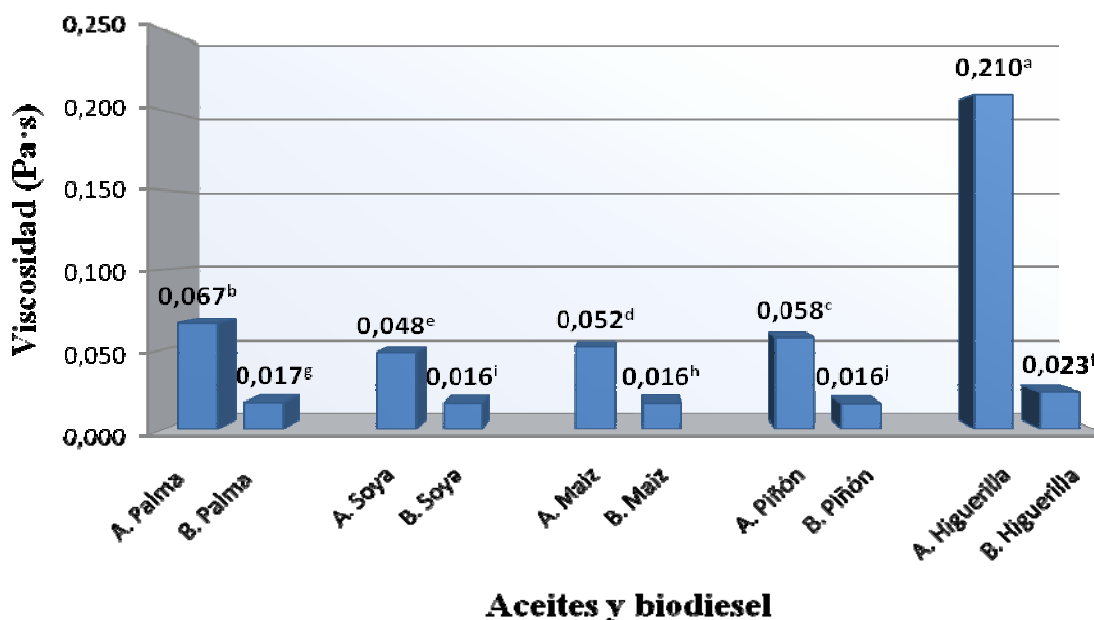
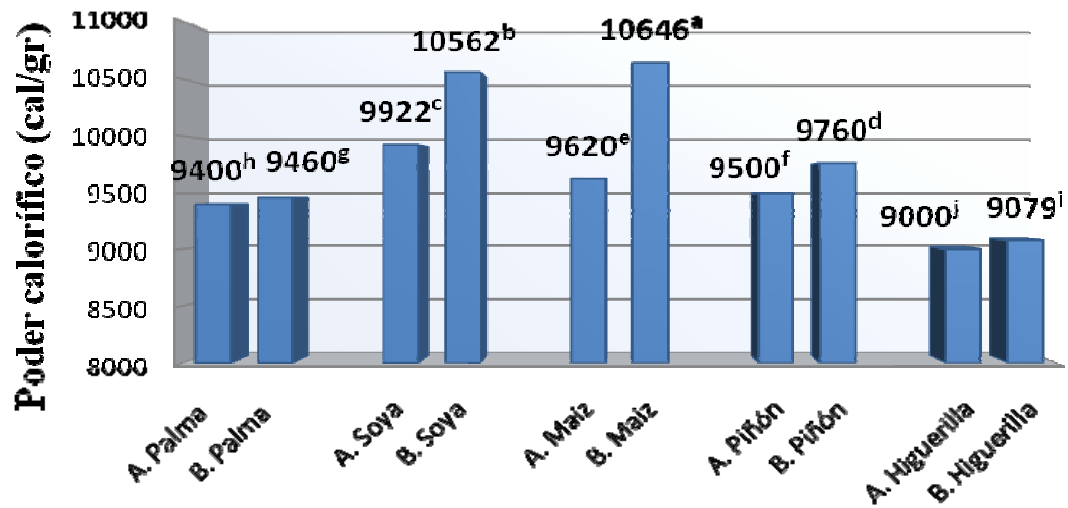
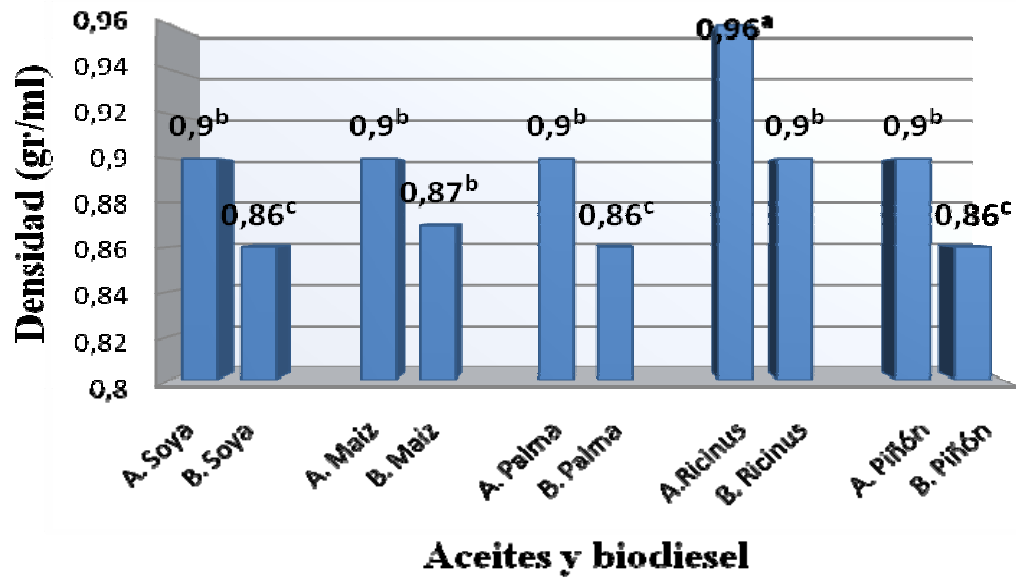


Figura 7. Efecto de la transesterificación sobre la viscosidad de los aceites.



Aceites y biodiesel

Figura 8. Comparación del poder calorífico entre los aceites y biodiesel.



Aceites y biodiesel

Figura 9. Comparación entre las densidades de aceites y biodiesel.

4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS QUÍMICAS Y COMBUSTIBLES ENTRE TRATAMIENTOS

4.4.1. Punto de enturbamiento

El menor punto de enturbamiento lo manifestó el biodiesel puro de higuierilla (-5.33°C), seguido por los biodiesel de maíz, soya, piñón que a la vez fueron significativamente diferentes entre sí (Anexo 2 y Figura 10).

Al realizar las sustituciones por el aceite de palma vemos que los mejores valores de punto de enturbamiento por ser los más bajos, fueron obtenidos para los biodiesel de maíz e higuierilla en 80% de sustitución del aceite de palma (Figura 10).

El biodiesel de palma mostró un punto de enturbamiento alto (6.6°C), asimismo los biodiesel que se obtuvieron con sustituciones de 20% de aceites de soya, maíz, piñón e higuierilla por palma conducen a mayores dificultades de partida del motor y a la pérdida de potencia del equipo debido a la obstrucción por los cristales que se forman en los filtros del sistema de combustible.

El problema de la aparición de cristales a altas temperaturas se da principalmente por el contenido alto de ácidos grasos saturados en la composición de los aceites vegetales, como el aceite de palma, constituido principalmente por 50% de ácido palmítico y esteárico. Los ácidos grasos saturados tienden a alinearse entre sí y posteriormente a encogerse al disminuir la temperatura constantemente, motivo por el que se manifiesta la formación de cristales en el biodiesel de palma a 6.6°C .

La fluidez en bajas temperaturas del biodiesel de palma mejoró cada vez que se sustituyó por mayor proporción de otros aceites vegetales más insaturados como los de maíz, soya, higuierilla y piñón, manifestando diferencias significativas entre diferentes niveles de sustitución y por el tipo de aceite utilizado (Figura 10).

El biodiesel que presentó el punto de enturbamiento más bajo (6.6°C), con la menor sustitución de aceite insaturado fue el obtenido con 20% de aceite de soya (Figura 10).

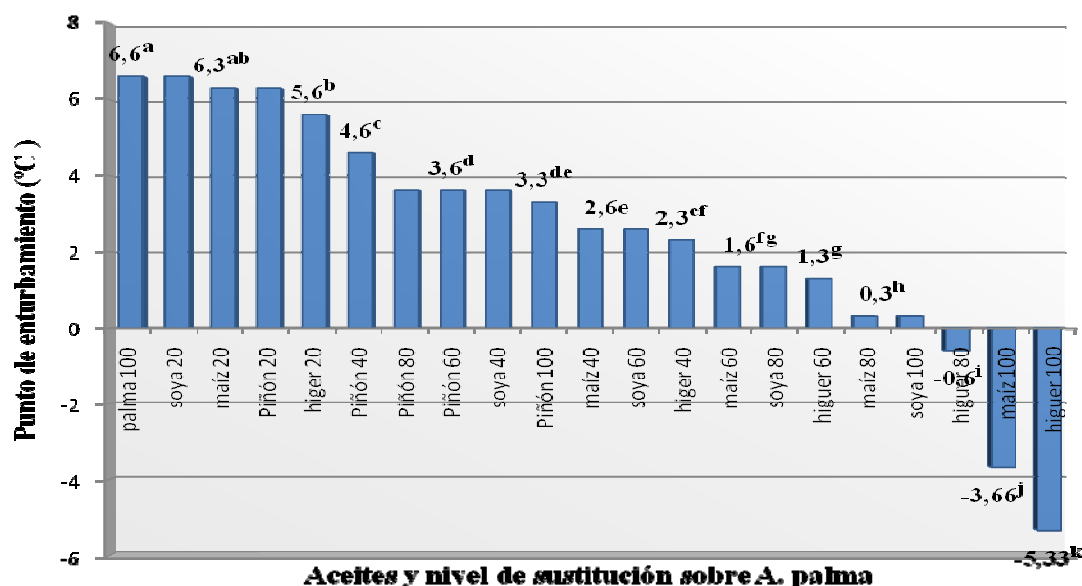


Figura 10. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre el punto de enturbamiento de los biodiesel.

4.4.2. Viscosidad

Las mejores viscosidades por ser las menores, correspondieron a los biodiesel de aceites puros de palma, maíz, soya y piñón. El aceite de piñón mostró la viscosidad más baja (0.0157 Pa·s). No mostraron diferencias significativas los cuatro tratamientos mencionados (Anexo 3 y Figura 11).

Según Barbosa (2006), la viscosidad es una medida de la resistencia del biodiesel al escurrimiento. Su control tiene como objetivos permitir una buena atomización del biodiesel y preservar su característica lubricante. Valores bajos de viscosidad pueden llevar al desgaste excesivo en las partes auto-lubrificantes del sistema de inyección, y daños a los pistones, asimismo altas viscosidades pueden llevar a un aumento del trabajo de la bomba de combustible, que trabajará forzada y con mayor desgaste, además de proporcionar mala atomización del combustible con consecuente combustión incompleta y aumento de las emisiones de humo y material particulado.

Los mayores valores de resistencia a la fluidez se obtuvieron de los biodiesel en los que se utilizó aceite de higuera puro y con niveles de sustitución del 20 al 80%. Se encontraron diferencias significativas a medida se disminuyó el nivel de sustitución del aceite de higuera por el aceite de palma, siendo la sustitución de 20% la que presentó la viscosidad más baja (0.0194 Pa·s) entre los cinco tratamientos.

Las sustituciones de aceites de soya y maíz de 20, 40, 60 y 80%, mostraron menores viscosidades en los biodiesel a medida que sustituían el aceite de palma en mayor proporción. Se evidenciaron diferencias significativas entre los ocho tratamientos obtenidos con las mencionadas sustituciones.

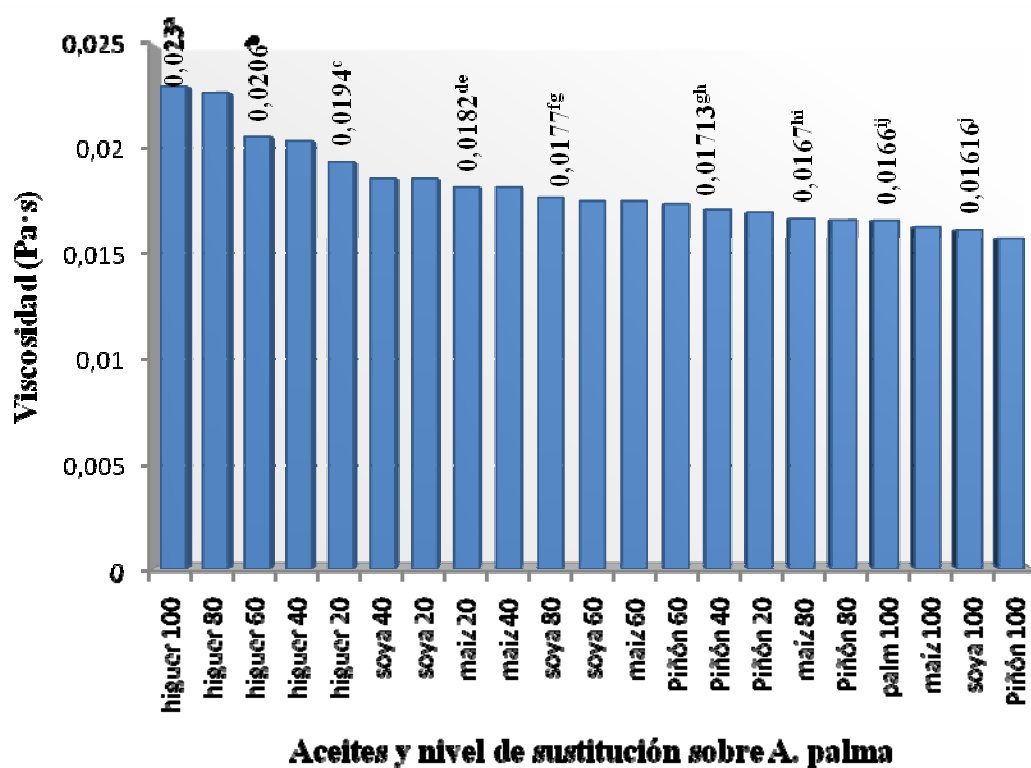


Figura 11. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre la viscosidad de los biodiesel.

4.4.3. Densidad

El biodiesel de aceite puro de higuerilla, obtuvo la mayor densidad (0.89 g/ml). Asimismo las sustituciones que se hicieron desde el 20 al 80% del aceite de higuerilla por aceite de palma, manifestaron altas densidades sin presentar diferencias significativas entre sí. Por otra parte sí hubo diferencias significativas entre los cuatro niveles de sustitución y el biodiesel puro de higuerilla (Anexo 4 y Figura 12).

Variaciones en la densidad llevan a una significativa variación en la masa de combustible inyectada, imposibilitando la obtención de una buena mezcla de aire/combustible lo que aumenta la emisión de contaminantes como monóxido de carbono y material particulado (Coneição y Candeia, 2007).

No existieron diferencias significativas entre las densidades de los biodiesel de palma, piñón, maíz, soya con sus niveles de sustitución de 20 a 80% y puros. La menor densidad fue de 0.856 g/ml correspondiente al biodiesel de palma puro y de soya al 60% de sustitución (Figura 12).

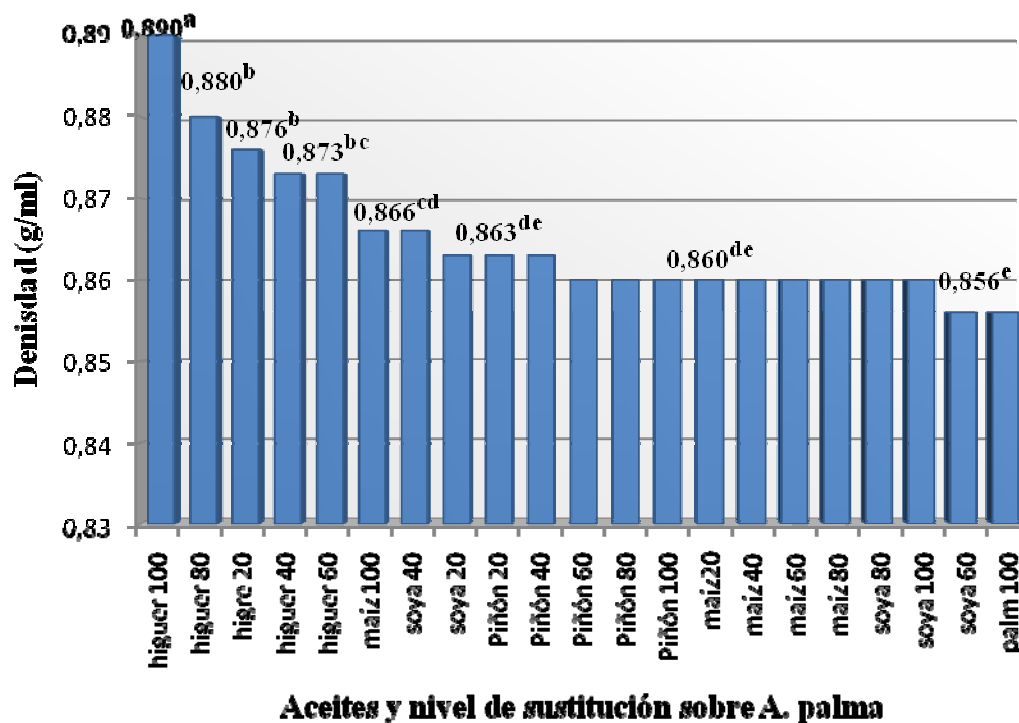


Figura 12. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre la densidad de los biodiesel.

4.4.4. Poder calorífico

Los resultados del análisis calorimétrico para los biodiesel se pueden observar en el Anexo 5 y Figura 13. Los biodiesel de maíz y soya mostraron los mayores valores de poder calorífico (10646 y 10562 cal/g respectivamente), seguidos por las sustituciones en 80% de ambos aceites por aceite de palma. También se encontraron diferencias significativas entre todos los tratamientos evaluados lo cual permitió ver el efecto tanto por tipo de aceite como por nivel de sustitución, sobre el poder calorífico que se genera al quemar los biodiesel.

Los menores valores de poder calorífico se manifestaron para los biodiesel de aceite puro de higuera (9078 cal/g) y sus cuatro niveles de sustitución por aceite de palma.

Se puede observar que siempre se mantuvo la tendencia de que a mayor grado de sustitución del aceite de palma por uno de los cuatro aceites, excepto higuera, aumentó poder calorífico para los biodiesel (Figura 13).

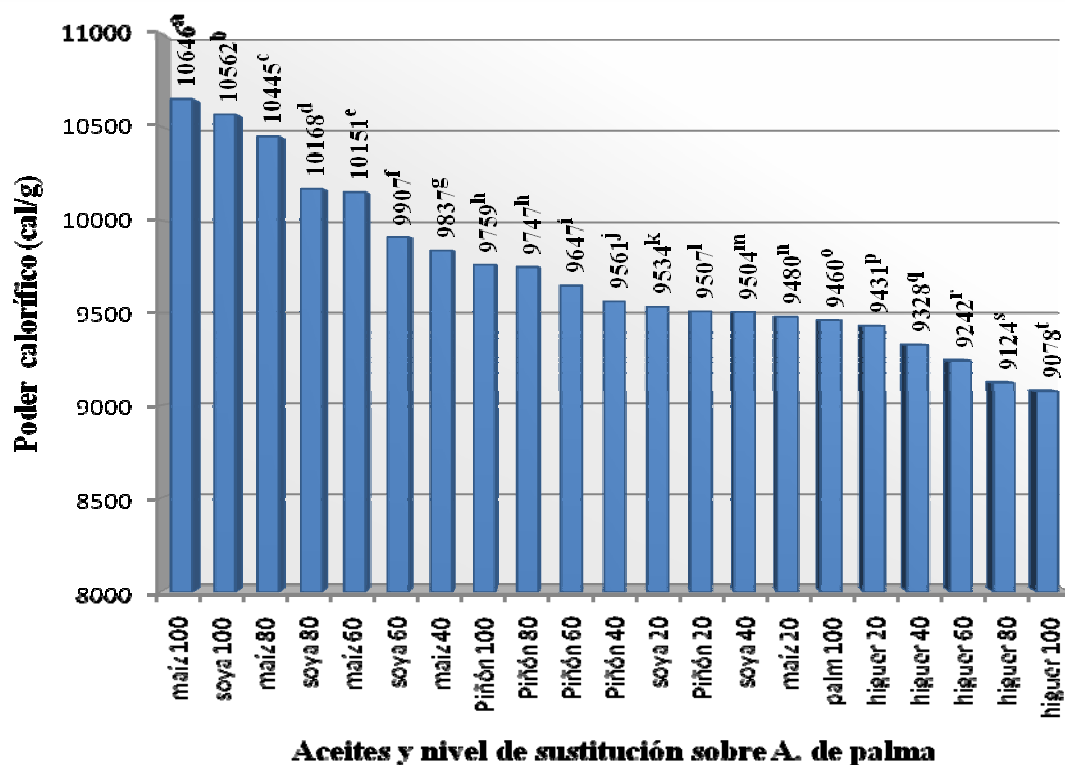


Figura 13. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre el poder calorífico de los biodiesel.

4.4.5. Rendimiento

En el Anexo 6 y Figura 14, se presentan los rendimientos de los biodiesel. Los mayores rendimientos de biodiesel se obtuvieron a partir de los aceites puros de soya y maíz con sus cuatro niveles de sustitución correspondientes. El biodiesel de palma puro estuvo en este grupo que no manifestó diferencias significativas entre los 11 tratamientos que lo conforman.

Por otra parte, los menores rendimientos fueron manifestados por los biodiesel de higuerilla y piñón, debido a que el índice de ácidos grasos libres para ambos aceites fue de 2% con lo que parte de la masa de metil ésteres (biodiesel) obtenida, se perdió en forma de jabón formado por la reacción entre la base utilizada como catalizador para la reacción de transesterificación y los ácidos grasos libres presentes en los aceites.

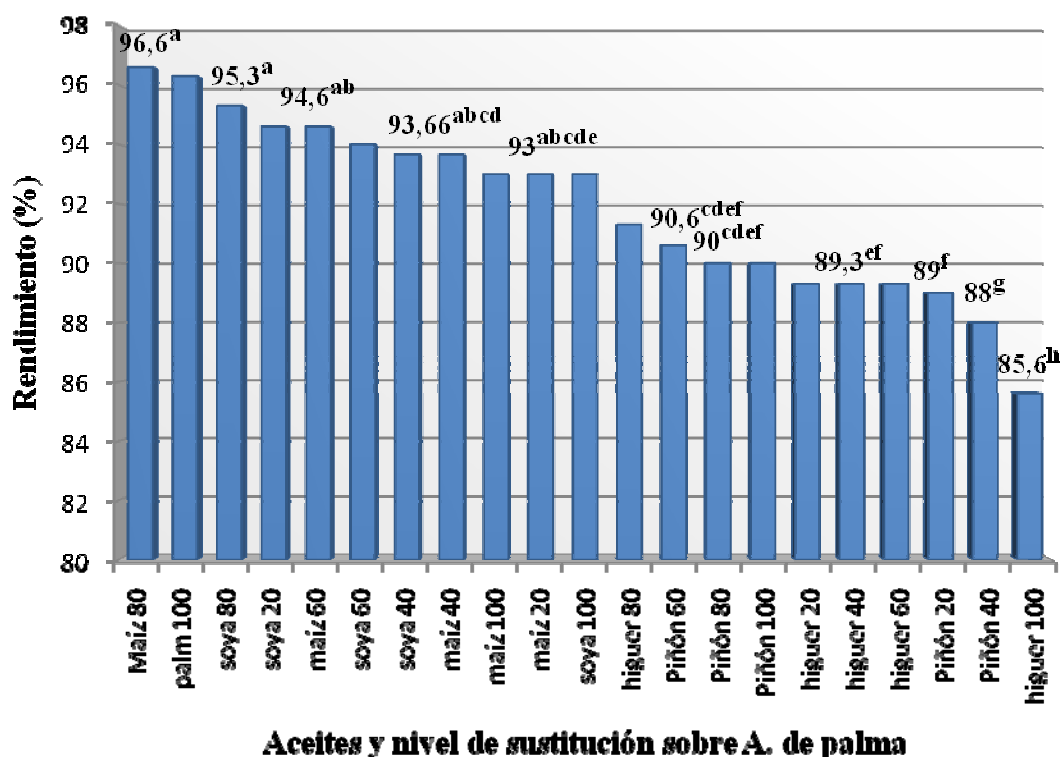


Figura 14. Efecto de la sustitución del aceite de palma sobre el rendimiento de los biodiesel.

4.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS QUÍMICAS Y COMBUSTIBLES ENTRE LOS BIODIESEL PUROS Y EL DIESEL DE PETRÓLEO.

En el Anexo 7 y las Figuras 15, 16 y 17 se presentan los resultados de viscosidad, poder calorífico y densidad de los biodiesel y diesel. A partir de estos se puede inferir que la mejor y menor viscosidad, así como también el mayor poder calorífico lo mostró el diesel de petróleo. Puede notarse también diferencias significativas entre todos los biodiesel y el diesel de petróleo en las evaluaciones calorimétricas y de viscosidad realizadas.

De acuerdo con El National Renewable Energy Laboratory, la energía contenida en un combustible es caracterizada por la cantidad de calor que se genera cuando el combustible se quema bajo condiciones ambientales y los productos se enfrían también bajo condiciones iniciales. Esto lo definen como poder calorífico. Así han determinado que el biodiesel de soya tiene un poder calorífico de 9000 cal/g y el diesel de petróleo 10166 cal/g, teniendo de esta manera que el diesel convencional es superior en poder calorífico al biodiesel de soya en un 11.5%.

Aunque las normativas para diesel corriente y para el biodiesel no especifican valores a cumplir para el poder calorífico, los resultados de esta propiedad combustible para los

biodiesel obtenidos, mostraron una diferencia apreciable respecto al valor del diesel corriente (11231cal/g).

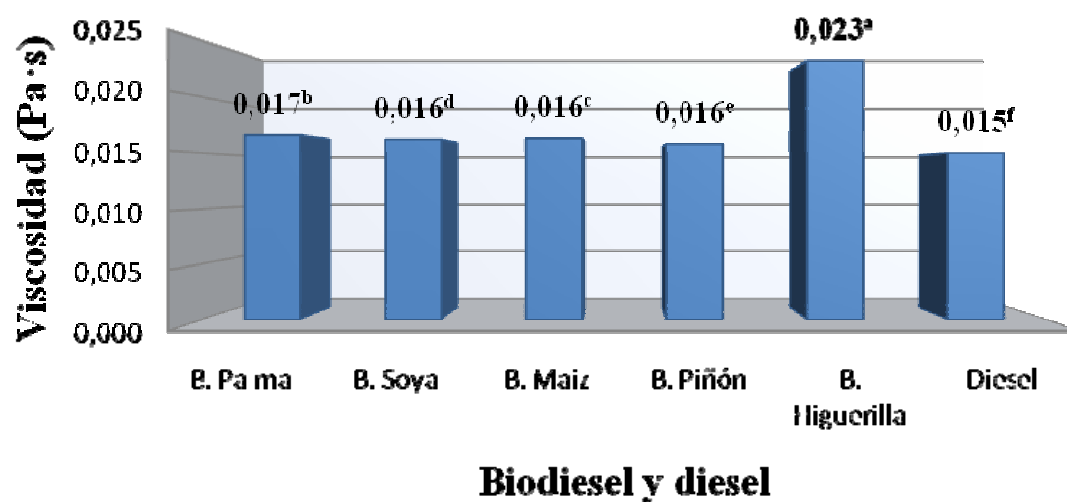


Figura 15. Comparación de la viscosidad entre los biodiesel obtenidos y diesel de petróleo.

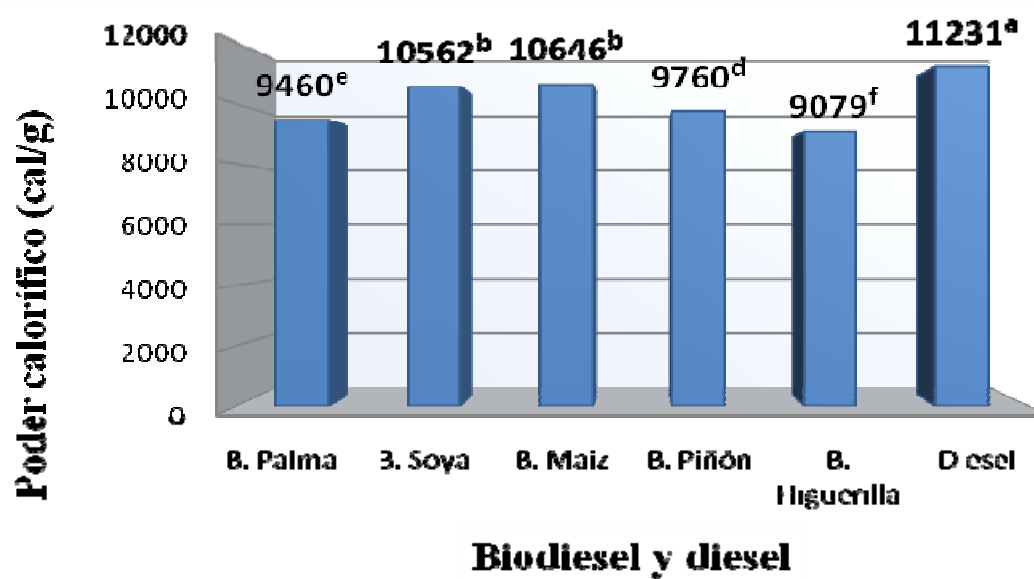


Figura 16. Comparación del poder calorífico entre los biodiesel obtenidos y diesel de petróleo.

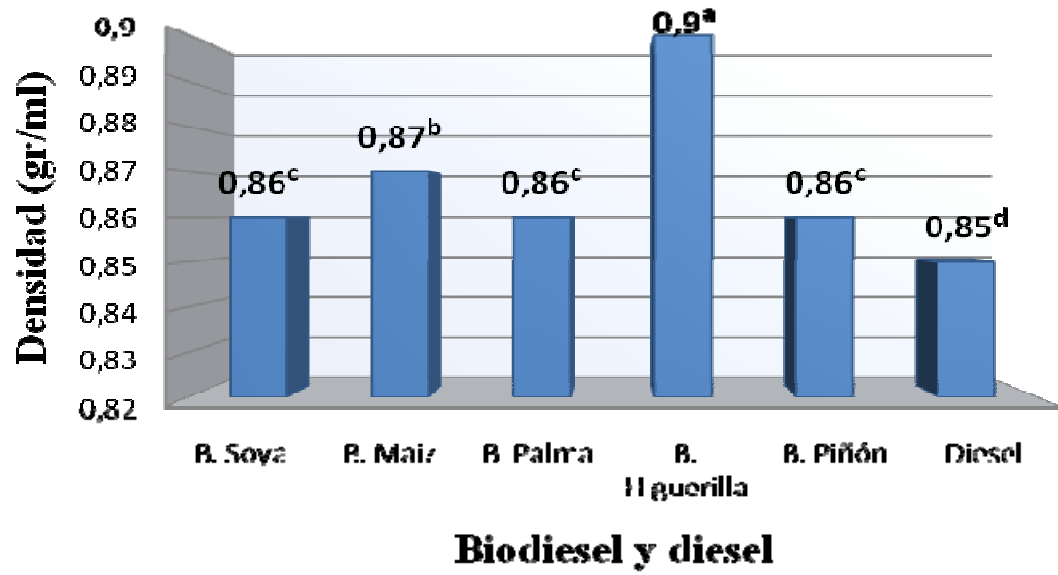


Figura 17. Comparación de las densidades entre los biodiesel obtenidos y diesel de petróleo.

5. CONCLUSIONES

- La sustitución con aceite de higuera en forma parcial y total fue la más efectiva para disminuir el punto de enturbamiento de los biodiesel.
- La sustitución con aceite de maíz en forma parcial y total fue la más efectiva para incrementar el poder calorífico de los biodiesel.
- Las sustituciones parciales y totales con los aceites de maíz, soya, piñón e higuera no fueron efectivas en disminuir la viscosidad del biodiesel de palma.
- La acidez inicial de los aceites de piñón e higuera provocaron menores rendimientos en los biodiesel obtenidos con sustituciones parciales y totales de ambos.
- Ninguna sustitución fue eficiente para mejorar el rendimiento de los biodiesel, debido a que el aceite de palma contó con buenas características iniciales de calidad.
- Las propiedades de viscosidad, densidad y poder calorífico del diesel de petróleo fueron mejores a la de todos los biodiesel evaluados, siendo el poder calorífico del diesel superior en un 5% al biodiesel de maíz.

6. RECOMENDACIONES

- Estudiar otras propiedades combustibles del biodiesel como: punto de fulgor, número de cetano y contenido de mono y diglicéridos.
- Evaluar a través de un estudio a escala piloto la producción de biodiesel con aceites alternativos de piñón e higuera.
- Aprovechar la disponibilidad de maquinaria agrícola en Zamorano para realizar pruebas de rendimiento, potencia y consumo en sus motores.
- Considerar la elaboración y caracterización del biodiesel que se puede obtener a partir de los residuos grasos que se generan de la planta de cárnicos de Zamorano.
- Estudiar más a fondo el comportamiento reológico de los biodiesel que se obtienen de diferentes fuentes de triglicéridos.
- Comparar el rendimiento y consumo en los motores entre el biodiesel puro (B100) y en mezcla con diesel de petróleo.
- Evaluar el efecto en las propiedades combustibles al sustituir una vez ya elaborados los biodiesel.

7. BIBLIOGRAFÍA

Barbosa, J. 2006. Obtenção, caracterização e estudo termoanalítico de biodiesel de milho (*Zea mays*). Brasil. Tesis mestre en química. Universidade Federal da Paraíba 138p.

Becerra, R. 2006. Cromatografía Gasosa Aplicada à Caracterização de Biodiesel (en línea). Consultado el 15 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.gcbio.com/>.

Coello; Gnecco. 2000. Producción de biodiesel a pequeña escala a partir de recursos oleaginosos amazónicos en el Perú (en línea). Consultado el 23 de julio de 2007. Disponible en: <http://www.itdg.org.pe/publicaciones/pdf/Produccion%20biodiesel%20selva%20Peru.pdf>

Coneição, P; Candeia, R. 2007. Avaliação da viabilidade de se produzir biodiesel através da transesterificação de óleo de grãos de café defeituosos. Brasil. Tesis Ingeniero Químico. Universidade Federal de Mato Grosso. 105p.

Dantas, J. 2006. Estudo termoanalítico cinético e reológico de biodiesel derivado do óleo de algodão (*Gossypium hisutum*). Brasil. Ingeniero Químico. Universidade Federal da Paraíba 86p.

Ferrari, R. 2005. Biodiesel de soja – Taxa de conversao em ésteres etílicos. Consultado el 1 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.sebraeminas.com.br>

Goldemberg, 2003. Vías de valorización energética de la biomasa (en línea). Consultado el 3 de julio de 2007. Disponible en: <http://www.intitutoideal.org>

Martínez, L.; Villamizar, S. 1995. Producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD. Consultado el 4 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.scielo.org.co>

National biodiesel board. Cold Flow impacts. (en línea). Consultado el 10 de agosto de 2007. Disponible en: www.nationalbiodieselboard.com

Roossi, F. 1998. Producción de biocombustible alternativo al diesel obtenido de aceite de soya usado en frituras. Consultado el 1 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/qn/v23n4/2654.pdf>

Rodriguez; Schneider. Caracterização do biodiesel de diferentes óleos produzido por biocatálise com enzima lipozyme im. 2005. II Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel

Soriano, L; Migo, S. 2005. Síntese e análise econômica de produção de biodiesel a partir de matérias-primas regionais. Brasil. Tesis Ingeniero Químico. Universidade Federal do Rio Grande do Norte -UFRN, Núcleo de Tecnologia-NT. 98p.

Vasconcelos, L. 2005. Compatibilidade de misturas de biodiesel de diferentes oleaginosas. Consultado el 12 de agosto de 2007. Disponible en: <http://www.biodiesel.gov.br>

Vasconcellos, J. 2002. Estudo da viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de residuos gordurosos. Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade Regional de Blumenau.

Vargas, C. 1998. Energía y medio ambiente. Universidad Nacional de Colombia. Consultado el 22 de agosto de 2007. Disponible en: <http://www.cinara.univalle.edu.co>

Wust, E. 2004. Estudo da viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de residuos gordurosos. Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade Regional de Blumenau.

8. ANEXOS

Anexo 1. Propiedades físicas y combustibles de aceites y biodiesel.

Aceites/biodiesel		Viscosidad (Pa·s) (40°C)	Poder calorífico (cal/g)	Densidades (g/ml) (20°C)
Aceites	Palma	0.068±0.025 ^b	9400±50.0 ^h	0.87±0.05 ^b
	Soya	0.048±0.175 ^c	9922±10.2 ^c	0.90±0.01 ^b
	Maíz	0.051±0.065 ^d	9620±7.5 ^e	0.90±0.03 ^b
	Piñón	0.057±0.150 ^c	9500±25.5 ^f	0.90±0.04 ^b
	Higuerilla	0.210±0.153 ^a	9000±22.0 ^j	0.96±0.03 ^a
Biodiesel	Palma	0.0166±0.04 ^g	9460±17.5 ^g	0.86±0.00 ^b
	Soya	0.0162±0.06 ⁱ	10562±16.0 ^a	0.86±0.01 ^b
	Maíz	0.0163±0.06 ^h	10646±15.5 ^b	0.87±0.01 ^b
	Piñón	0.0158±0.04 ^j	9760±7.5 ^d	0.86±0.03 ^b
	Higuerilla	0.0232±0.05 ^f	9079±34.0 ⁱ	0.90±0.04 ^b

*Promedios con letras diferentes son estadísticamente diferentes (P<0.05)

Anexo 2. Punto de enturbamiento de biodiesel puros y mezclados con palma.

Tratamiento	Punto de enturbamiento (°C)	Separación de medias
palm 100	6.6±1.10	A
soya 20	6.6±0.60	A
maíz 20	6.3±0.60	AB
jatro 20	6.3±0.50	AB
higue 20	5.6±0.57	B
jatro 40	4.6±1.00	C
jatro 80	3.6±1.10	D
jatro 60	3.7±0.60	D
soya 40	3.6±1.00	D
jatro 100	3.3±0.57	DE
maíz 40	2.6±0.60	E
soya 60	2.6±0.57	E
higue 40	2.3±0.60	EF
maíz 60	1.6±0.80	FG
soya 80	1.6±0.90	FG
higue 60	1.3±0.80	G
maíz 80	0.3±0.57	H
soya 100	0.3±0.57	H
higue 80	-0.6±1.00	I
maíz 100	-3.66±1.00	J
higue 100	-5.33±1.10	K

*Promedios con letras diferentes son estadísticamente diferentes (P<0.05)

Anexo 3. Viscosidad de biodiesel puros y mezclados con palma.

Tratamiento	Viscosidad (Pa·s) (40°C)	Separación de medias
higuer 100	0.0232±0.20	A
higuer 80	0.0227±0.26	A
higuer 60	0.0206±0.57	B
higuer 40	0.0204±0.87	B
higuer 20	0.0194±0.87	C
soya 40	0.0186±0.86	D
soya 20	0.0182±0.86	DE
maiz 20	0.0182±0.20	DE
maiz 40	0.0177±0.20	EF
soya 80	0.0175±0.11	FG
soya 60	0.0174±0.12	FG
maiz 60	0.0171±0.12	FGH
jatro 60	0.0171±0.10	GH
jatro 40	0.0170±0.12	GH
jatro 20	0.0167±0.20	GHI
maíz 80	0.0166±0.10	HI
jatro 80	0.0166±0.15	HI
palm 100	0.0163±0.86	IJ
maíz 100	0.0162±0.24	IJ
soya 100	0.0158±0.15	J
jatro 100	0.0157±0.25	J

*Promedios con letras diferentes son estadísticamente diferentes (P<0.05)

Anexo 4. Densidad de biodiesel puros y mezclados con palma.

Tratamiento	Densidad (g/ml) (20°C)	Separación de medias
higuer 100	0.89±0.01	A
higuer 80	0.88±0.00	B
higre 20	0.88±0.01	B
higuer 40	0.87±0.01	BC
higuer 60	0.87±0.01	BC
maíz 100	0.87±0.01	CD
soya 40	0.87±0.01	CDE
soya 20	0.86±0.01	DE
jatro 20	0.86±0.01	DE
jatro 40	0.86±0.01	DE
jatro 60	0.86±0.00	DE
jatro 80	0.86±0.00	DE
jatro 100	0.86±0.00	DE
maíz20	0.86±0.00	DE
maíz 40	0.86±0.00	DE
maíz 60	0.86±0.00	DE
maíz 80	0.86±0.00	DE
soya 80	0.86±0.00	DE
soya 100	0.86±0.00	DE
soya 60	0.85±0.01	E
palm 100	0.85±0.00	E

*Promedios con letras diferentes son estadísticamente diferentes (P<0.05)

Anexo 5. Poder calorífico de biodiesel puros y mezclados con palma.

Tratamiento	Poder calorífico (cal/g)	Separación de medias
maíz 100	10646±3.60	A
soya 100	10562±8.73	B
maíz 80	10445±4.04	C
soya 80	10168±7.21	D
maíz 60	10151±8.54	E
soya 60	9907±6.65	F
maíz 40	9837±2.52	G
jatro 100	9759±5.51	H
jatro 80	9747±2.52	H
jatro 60	9647±3.61	I
jatro 40	9561±5.13	J
soya 20	9534±22.37	K
jatro 20	9507±2.52	L
soya 40	9504±5.03	M
maíz 20	9480±19.66	N
palm 100	9460±1.00	O
higuer 20	9431±27.54	P
higuer 40	9328±7.21	Q
higuer 60	9242±2.52	R
higuer 80	9124±4.04	S
higuer 100	9078±7.09	T

*Promedios con letras diferentes son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$)

Anexo 6. Rendimiento de biodiesel puros y mezclados con palma.

Tratamiento	Rendimiento (%)	Separación de medias
Maíz 80	96.6±1.16	A
palm 100	96.3±0.58	A
soya 80	95.3±0.58	A
soya 20	94.6±1.53	AB
maíz 60	94.6±0.58	AB
soya 60	94.0±1.00	ABC
soya 40	93.7±1.53	ABCD
maíz 40	93.7±0.58	ABCD
maíz 100	93.7±1.00	ABCD
maíz 20	93.0±1.73	ABCDE
soya 100	93.0±2.52	ABCDE
higuer 80	91.3±3.01	BCDEF
jatro 60	90.6±1.54	CDEF
jatro 80	90.0±3.21	CDEF
jatro 100	90.0±4.36	CDEF
higuer 20	89.3±2.09	EF
higuer 40	89.3±2.08	EF
higuer 60	89.3±3.06	EF
jatro 20	89.0±3.61	F
jatro 40	88.0±2.00	G
higuer 100	85.6±5.13	H

*Promedios con letras diferentes son estadísticamente diferentes ($P<0.05$)

Anexo 7. Propiedades de biodiesel y diesel.

Biodiesel/diesel		Viscosidad (Pa·s) (40°C)	Poder calorífico (cal/g)	Densidad (g/ml) (20°C)
Biodiesel	Palma	0.0166±0.040 ^b	9460±20.00 ^e	0.86±0.02 ^c
	Soya	0.0162±0.025 ^d	10562±4.00 ^b	0.86±0.02 ^c
	Maíz	0.0163±0.020 ^c	10646±20.50 ^c	0.87±0.00 ^b
	Piñón	0.0158±0.020 ^e	9760±20.50 ^d	0.86±0.00 ^c
	Higuerilla	0.0232±0.000 ^a	9079±70.50 ^f	0.90±0.03 ^a
Diesel		0.0150±0.090 ^f	11231±19.00 ^a	0.85±0.03 ^d

*Promedios con letras diferentes son estadísticamente diferentes (P<0.05)