

**Efecto del tiempo de freído del aceite de
palma (*Elaeis guineensis*) sobre las
características físico-químicas del biodiesel**

Kevin Estuardo Mis Solval

Zamorano, Honduras

Diciembre, 2008

ZAMORANO
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

Efecto del tiempo de freído del aceite de palma (*Elaeis guineensis*) sobre las características físico-químicas del biodiesel

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

Presentado por

Kevin Estuardo Mis Solval

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2008

Efecto del tiempo de freído del aceite de palma (*Elaeis guineensis*) sobre las características físico- químicas del biodiesel

Presentado por:

Kevin Estuardo Mis Solval

Aprobado:

Francisco Javier Bueso, Ph.D.
Asesor Principal

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

Carlos Quiroz, Ing. M.Sc.
Asesor

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

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

RESUMEN

Mis, K. 2008. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma (*Elaeis guineensis*) sobre las características físico-químicas del biodiesel. Proyecto de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. 30p.

La utilización de aceites cocinados para producir biodiesel tiene gran potencial para países subdesarrollados. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto del tiempo de freído del aceite de palma africana en las características físico-químicas del biodiesel. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar (DCA), donde se evaluó biodiesel producido a partir de aceite RBD de palma, biodiesel producido a partir de aceite de palma cocinado 30 minutos con pechugas de pollo a 180 °C y biodiesel producido a partir de aceite de palma cocinado 60 minutos con pechugas de pollo a 180 °C. Etanol fue utilizado en el proceso de transesterificación en una relación molar 6:1 (etanol: aceite) e hidróxido de sodio como catalizador (1% del aceite). Los resultados se analizaron mediante un ANDEVA y una separación de medias Tukey. Los tres biodiesel cumplieron con los parámetros de calidad establecidos por la norma ASTM D 6751. El aumento en el tiempo de freído del aceite de palma provocó cambios significativos en los tratamientos, induciendo a una disminución en el rendimiento de conversión de aceite a biodiesel, mayor oxidación, decremento de la temperatura del punto de enturbamiento, clarificación y amarillamiento del biodiesel; mientras que la acidez, poder calorífico y la escala a* del color no sufrieron variaciones significativas en el biodiesel. El costo variable de producir un litro de biodiesel a nivel de laboratorio fue US\$ 2.64 utilizando aceite RBD de palma, US\$ 1.07 utilizando aceite cocinado 30 minutos y US\$ 0.91 utilizando aceite cocinado 60 minutos.

Palabras clave: aceites cocinados, calorimetría, peróxidos, acidez, color.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
5. CONCLUSIONES.....	21
6. RECOMENDACIONES.....	22
7. RECONOCIMIENTOS.....	23
8. BIBLIOGRAFÍA.....	24
9. ANEXOS.....	27

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadro	Página
1 Norma de calidad ASTM D 6751	5
2 Norma de calidad EN 14214	5
3 Descripción de tratamientos	9
4 Distribución de tratamientos	9
5 Métodos analíticos utilizados en el experimento	11
6 Propiedades del biodiesel de aceite RBD y aceite cocinado de palma africana	13
7 Color en la escala L* a* b* del biodiesel de aceite RBD y aceite cocinado de palma africana.....	17
8 Costos variables de producción de biodiesel producido con aceite RBD de palma africana a nivel de laboratorio.....	19
9 Costos variables de producción de biodiesel producido con aceite cocinado 30 minutos a nivel de laboratorio	19
10 Costos variables de producción de biodiesel producido con aceite cocinado 60 minutos a nivel de laboratorio	20

Figura	Página
1 Proceso de transesterificación de triglicéridos a metil-ésteres ..	2
2 Etapas de transesterificación de un triglicérido	2
3 Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el rendimiento en biodiesel	13
4 Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el índice de peróxidos del biodiesel	14
5 Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el índice de acidez del biodiesel.....	15
6 Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el punto de enturbamiento del biodiesel	15
7 Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el poder calorífico del biodiesel.....	16
8 Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en cambios en la escala L* del color del biodiesel	17
9 Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en cambios en la escala a* del color del biodiesel.....	18

10	Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en cambios en la escala b* del color del biodiesel.....	18
Anexo		Página
1	Precisión de los métodos analíticos utilizados.....	28
2	Propiedades de los aceites utilizados en el ensayo antes de neutralización.....	28
3	Descripción de los costos variables del proyecto de investigación.....	29
4	Diagrama de flujo de producción del biodiesel.....	29
5	Distribución de la producción mundial de etanol y biodiesel en el 2006.....	30
6	Poder calorífico de diversos combustibles y biocombustibles.	30

1. INTRODUCCIÓN

Nuevas alternativas de generación de energía han sido desarrolladas en el transcurso de los últimos años, debido a aumentos en el precio del petróleo fósil, reducción de la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera y aprovechamiento de nuevos recursos naturales poco explotados por el hombre hasta ahora. Dentro de las nuevas alternativas energéticas se encuentran los biocombustibles los cuales han generado una gran controversia a nivel mundial por problemas relacionados con la seguridad alimentaria, ya que, las fuentes de materia prima que se utilizan actualmente para la fabricación de éste tipo de productos compiten directamente con el precio de los alimentos; lo anterior ha generado una alza en los precios de los alimentos, afectando directamente a los consumidores especialmente de países en vías de desarrollado. A raíz de lo anterior, se ha iniciado la búsqueda de nuevas alternativas para la producción de biocombustibles utilizando materias primas que no compiten con la producción de alimentos, entre éstas destacan principalmente cultivos alternativos como *Jatropha curcas*, residuos agroindustriales como aceites vegetales utilizados, y recientemente la utilización de algas productoras de lípidos para la producción de biodiesel. Los aceites vegetales utilizados presentan un gran potencial para poder ser utilizados como materia prima en la producción de biodiesel, teniendo como principal ventaja la de ser una fuente de materia prima relativamente barata. Diversos estudios han sido desarrollados para optimizar el aprovechamiento de este tipo de recursos que en la mayoría de los casos es manejado como un desecho especialmente en países subdesarrollados. La Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano, ha realizado diversas investigaciones acerca de la utilización de materias primas alternativas para la producción de biodiesel, entre las cuales se incluye el presente estudio; el cual pretende generar información que contribuya a desarrollar una tecnología que permita optimizar la producción del biocombustible a partir aceites vegetales utilizados, evitando con ello que la producción de biocombustibles represente un problema de seguridad alimentaria para las naciones subdesarrolladas.

El estudio se limitó a evaluar algunas propiedades físico-químicas del biodiesel elaborado con aceite RBD de palma africana y aceite de palma africana cocinado a 180 °C con pechugas de pollo. El principal objetivo del estudio fue determinar el efecto del tiempo de freído de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) en las características físico-químicas del biodiesel, mientras que los objetivos específicos fueron comparar la eficiencia de producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana RBD y aceite de palma africana cocinado, evaluar el efecto del tiempo y temperatura de freído del aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) en el rendimiento, color, índice de peróxidos, contenido de ácidos grasos libres, temperatura del punto de enturbamiento y poder calorífico en cada uno de los biodiesel producidos y por último, determinar si el biodiesel producido a partir de aceites cocinados cumplen con la norma de calidad establecida ASTM D 6751.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 METIL – ÉSTERS

De acuerdo con Rupilios y Ahmad (2007), los metil-ésteres son normalmente producidos por transesterificación de triglicéridos. En el proceso de transesterificación, los triglicéridos reaccionan con un alcohol, generalmente metanol o etanol en la presencia de un catalizador (KOH o NaOH); lo anterior produce metil-ésteres y glicerina (Figura 1).

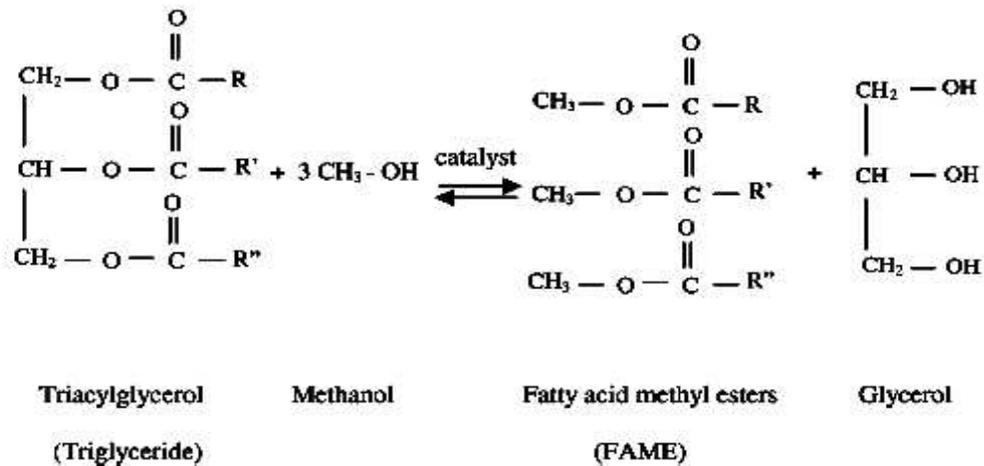


Figura 1. Proceso de transesterificación de triglicéridos a metil-ésteres

Según Marchetti *et al.* (2005), el proceso completo de transesterificación es normalmente una secuencia de tres etapas reversibles consecutivas. En la primera etapa, de un triglicérido una molécula de metil-éster es producida y una molécula de un diglicérido, en la segunda etapa, de un diglicérido una molécula de metil-éster es producida y una molécula de un monoglicérido, en la última etapa de la reacción se obtiene una molécula de glicerina y una molécula de metil-éster a partir de un monoglicérido.

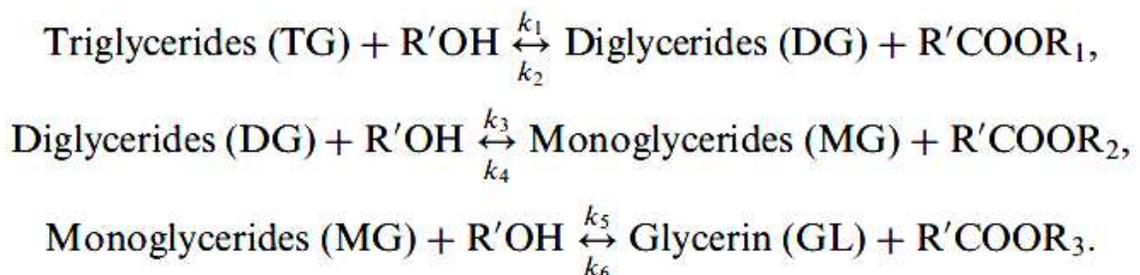


Figura 2. Etapas de la transesterificación de un triglicérido.

2.2 MATERIAL PRIMA

2.2.1 Aceites refinados

Para la producción de biodiesel, diversas fuentes de triglicéridos son empleadas hoy en día; por ejemplo, en Europa se utiliza el aceite de colza, Argentina, Brasil y Estados Unidos por su parte utilizan principalmente aceite de soya, mientras que Malasia, Indonesia, Tailandia, Colombia y Ecuador emplean especialmente aceite de palma, Filipinas utiliza aceite de coco generalmente. Es importante destacar que para el 2005, el aceite de colza se empleo para producir alrededor del 70% de la producción mundial de biodiesel, comparado con un 5% del total de biodiesel proveniente de aceite de palma. (Rupilio y Ahmad, 2007).

Starkman (2006), asegura que para el 2006 Honduras produjo alrededor de 15 mil galones diarios de biodiesel B100. Según un informe de la embajada de los Estados Unidos en Honduras, la nación hondureña empezará a producir biodiesel de aceite de palma africana a escala comercial a partir del 2008; actualmente en Honduras radican empresas que tienen capacidades instaladas de producción de hasta 30,000 galones de biodiesel por día las cuales empezarán a funcionar cuando la producción de biodiesel sea rentable. De acuerdo a US embassy – Honduras (2008) Honduras posee 90,000 Ha. del cultivo de palma africana, las cuales pretenden expandirse en los próximos años tomando en cuenta de que para suplir la demanda total de biodiesel en Honduras se necesitan de 300,000 hectáreas del cultivo.

De acuerdo con Zhang *et al.* (2003), el proceso de proceso de producción de biodiesel utilizando un catalizador alcalino y aceites vírgenes requiere de simples procesos y el empleo de equipo sencillo, lo anterior resulta en un menor costo fijo en un proceso productivo; la desventaja de este tipo de producción la representa los altos costos de los aceites vírgenes. En contraposición, la producción de biodiesel utilizando un catalizador ácido y aceites cocinados presenta una mayor rentabilidad debido al menor costo del aceite cocinado comparado con el aceite virgen.

2.2.2 Aceites cocinados

Berchmans e Hirata (2008), consideran la reducción en los costos de producción del biodiesel utilizando alternativas más baratas de materia prima entre las cuales se puede considerar algunas grasas animales, aceites vegetales no utilizados como alimentos, aceites vegetales cocinados y algunos subproductos de la refinería de aceites. De acuerdo con Wang *et al.* (2006), los aceites cocinados podrían presentar un serio problema de contaminación ambiental si estos no reciben el tratamiento adecuado. Países como China han establecido programas de recolección de este tipo de productos para la fabricación de biodiesel a través la agencia de protección ambiental autorizada por el gobierno; se ha estimado que solamente en la ciudad de Guangzhou, se recolectan alrededor de 20000 toneladas métricas cada año, de acuerdo con Canakci (2005), en Estados Unidos los aceites cocinados representan un tercio de la producción total de aceites y grasas, dentro de esta cantidad se incluyen las aproximadamente 2.5 billones de libras de aceite cocinado

que producen anualmente los restaurantes convencionales y cadenas de comidas rápidas establecidas en Estados Unidos.

De acuerdo a Calle *et al.* (2007), los aceites utilizados por la industria alimentaria pueden utilizarse como materia prima para la producción de biodiesel, siendo una materia prima mucho más económica comparada al resto. Sin embargo puede presentar altos contenidos de humedad y de ácidos grasos libres que pueden interferir con la eficiencia en la producción de biodiesel.

Los aceites cocinados poseen valores elevados de ácidos grasos libres (0.7% - 41.8%) y agua (0.01%- 55.38%); lo anterior, reduce significativamente la eficiencia de transesterificación en convertir la materia prima en biodiesel (Canakci, 2005). Según Tyson *et al.* (2004), se pueden procesar aceites cocinados que contengan valores de hasta 75% de ácidos grasos libres, sin embargo esto repercutirá directamente en los costos de fabricación del biodiesel, ya que, se requerirá de mayores instalaciones y reactivos para su elaboración. Además, valores por encima 50% de ácidos grasos libres en el aceite, hacen que el costo del biodiesel sea mayor comparado con el costo de biodiesel producido a partir de aceite con valores menores al 50% de ácidos grasos libres.

Ferrari *et al.* (2005), indica que el biodiesel producido a partir de aceites cocinados presenta la menor vida de almacenamiento por efecto de la autooxidación, lo antepuesto es debido principalmente a la destrucción de antioxidantes producto del calor del freído del aceite comparado con el biodiesel producido a partir de aceites refinados los cuales presentan una mayor estabilidad de almacenamiento

Diversos estudios se han realizado acerca de la producción de biodiesel a partir de aceites cocinados como el realizado por Freedman *et al.* (1984); citado por Zheng *et al.* (2006), quien determinó que el proceso de catalización ácida es más eficiente para la producción de biodiesel en aceites que exceden el 1% de ácidos grasos libres, lo anterior es comparado con el proceso de catalización alcalina. Además, en el mismo estudio realizado, se determinó que una relación molar aceite: metanol: ácido de 1:245:3.8 a 70 °C bajo un rango de agitación de 400 rpm durante 4 horas de reacción, el biodiesel alcanza un rendimiento del 99% de metil-ésteres de ácidos grasos. En otro estudio realizado por Al-Wydian y Al-Shyoukh (2002), determinaron que la combinación de H₂SO₄ al 2.25 M y etanol, éste último en la misma cantidad del peso del aceite empleado durante tres horas de reacción a 90 °C produce un biodiesel con la menor gravedad específica a partir de aceites cocinados. Un estudio similar se desarrolló por Mis y Sathivel (2008), en la Universidad Estatal de Luisiana, utilizando aceite de soya cocinado, en este estudio se determinó que el aumento en el tiempo de cocción del aceite provoca una baja en el rendimiento de conversión del aceite a biodiesel, mayor oxidación y clarificación del biodiesel

2.3 ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL BIODIESEL

Diversos parámetros de calidad han sido establecidos para evaluar el biodiesel dependiendo el país de origen, sin embargo, los principales parámetros son las normas ASTM D 6751 empleada por Estados Unidos y Canadá (Cuadro 1) y la norma EN 14214 (Cuadro 2) empleada por la Unión Europea.

Cuadro 1. Norma de calidad ASTM D 6751

Propiedad	Método	Límites	Unidades
Densidad		860 - 900	Kg/m ³
Punto de destello	D 93	130 min	°C
Agua	D 2709	0.05 max	% Volumen
Viscosidad a 40°C	D 445	3.5 - 5.0	mm ² /s
Ceniza sulfatada	D 874	0.02 max	%
Sulfuro total	D 5453	0.05 max	%
Corrosión de cobre	D 130	No. 3 max	
Número de cetano	D 613	47 min	
Punto de enturbamiento	D 2500	Reportar	°C
Residuos de carbón	D 4530	0.05 max	%
Número de acidez	D 664	0.80 max	mg KOH/g
Glicerina libre	D 6584	0.02	%

Fuente: Canakci, 2006.

Cuadro 2. Norma de calidad EN 14214

Propiedad	Método	Límites	Unidades
Contenido de éster	EN 14103d	96.5 min	
Densidad a 15°C	EN ISO 3675	860 - 900	Kg/m ³
Viscosidad a 40°C	EN ISO 3104	3.5 - 5.0	mm ² /s
Sulfuro total		10	mg/Kg
Número de cetano	EN ISO 5165	51	
Contenido de agua	EN ISO 12937	500	mg/Kg
Corrosión de cobre	EN ISO 2160	Clase 1	
Estabilidad oxidativa a 110°C	EN 14112	6	horas
Valor de acidez	EN 14104	0.5	mg KOH/g
Valor de yodo	EN 14111	120	
Contenido de metanol	EN 14103	0.2	% (m/m)
Contenido de monoglicéridos	EN 14105m	0.8	% (m/m)
Contenido de diglicéridos	EN 14105m	0.2	% (m/m)
Contenido de triglicéridos	EN 14105m	0.2	% (m/m)
Glicerina libre	EN 14105m	0.02	% (m/m)
Glicerina total	EN 14105m	0.25	% (m/m)
Contenido de fósforo	EN 14107p	10	mg/Kg

Fuente: Wikipedia, 2008.

2.3.1 Índice de peróxidos

Los metil-ésteres de ácidos grasos son susceptibles a reacciones de oxidación, es decir la acción del oxígeno sobre las insaturaciones de los ácidos grasos. La autooxidación es favorecida a medida que aumente la concentración de ácidos grasos insaturados, además otros factores coadyuvantes de la autooxidación son: temperatura, actividad de agua, presencia de peróxidos, ácidos grasos libres, metales divalentes, etc. Los primeros compuestos formados por la autooxidación son denominados hidroperóxidos los cuales son resultantes de la adición de átomos de oxígeno en los dobles enlaces de las cadenas de ácidos grasos; los hidroperóxidos son muy reactivos descomponiéndose en una gama muy amplia de sustancias entre las cuales se encuentran polímeros de alto peso molecular como lo son aldehídos, cetonas y ciertos ácidos, lo anterior genera la formación de gomas y sedimentos que podrían causar problemas al motor (Lenoir, 2008).

La oxidación del aceite puede ser catalizada por:

- Temperatura: La temperatura es un agente catalítico en cualquier reacción química, un aumento en la temperatura generalmente implica un aumento en la velocidad de reacción.
- Luz: La radiación ultravioleta promueve la formación de radicales libres presentes en la etapa inicial de la reacción de autooxidación.
- Iones metálicos: Los iones metálicos, particularmente hierro y cobre, catalizan la reacción de oxidación.
- Oxígeno: La autooxidación se presentará en mayor o menor grado según la cantidad de oxígeno presente.

2.3.2 Índice de acidez

De acuerdo con Lenoir (2008), los ácidos grasos libres (AGL) y los jabones son compuestos relacionados. En general el biodiesel es producido utilizando un catalizador alcalino como hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH). Los ácidos grasos libres presentes en el aceite reaccionarán con el catalizador en presencia de agua para formar jabones. Los jabones se precipitan después del proceso de reacción, dificultando la separación de la capa de jabón-glicerina del biodiesel. De acuerdo con Adisson (2004); citado por Anguaya (2007), un exceso de catalizador provoca la ruptura de los enlaces ésteres del biodiesel formando jabón y AGL que quedan disueltos en el biodiesel. La formación excesiva de AGL se conoce como índice de acidez en el ASTM de EE.UU. y en otros estándares internacionales de calidad. La formación de AGL es inevitable, éstos son electrolitos disueltos que aceleran los efectos de oxidación, es decir, la corrosión. Los efectos negativos directos que presentan los AGL repercuten en el equipo de inyección del motor, la obturación del filtro y la formación de depósitos.

2.3.3 Punto de enturbamiento

De acuerdo con López (2008), el punto de enturbamiento es la temperatura a la cual las parafinas y otras sustancias disueltas en el aceite se separan del mismo y forman cristales al enfriar el aceite, lo que genera un aspecto turbio. La solubilidad del aceite y el peso molecular de las sustancias disueltas influyen en el punto de enturbamiento, así pues, la solubilidad está directamente relacionada con la temperatura de la misma, al bajar ésta, la solubilidad disminuye, haciendo que algunas sustancias disueltas se separen de las sustancias disolventes. El peso molecular de las sustancias disueltas también influye en la capacidad del disolvente (en este caso aceite) para disolverlas. Cuanto menos sea el peso molecular en cuestión, más fácil será disolver dichas sustancias. Además, la presencia de sustancias extrañas y el almacenamiento prolongado influyen en el punto de enturbamiento, ya que los contaminantes se combinan o aglomeran parafinas y otras sustancias susceptibles de separarse del aceite, elevando el punto de enturbamiento. La norma ASTM D 2500 no contempla un valor específico, siendo solamente reportada la temperatura del punto de enturbamiento. Orellana (2007), reporta un punto de enturbamiento del biodiesel de aceite de palma sin refinar de 14.5 °C.

2.3.4 Poder calorífico

De acuerdo con la enciclopedia electrónica Wikipedia (2008), el poder calorífico es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación, además el poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión. La mayoría de los combustibles usuales son compuestos de carbono e hidrógeno, que al arder se combinan con el oxígeno formando dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) respectivamente. Los combustibles como el diesel con altos porcentajes de aromáticos tienen a tener un alto contenido de energía por galón. Un combustible con bajo poder energético por galón hará que el motor produzca menos energía. El biodiesel no contiene aromáticos pero sí contiene ácidos grasos con diferentes niveles de saturación e insaturación. Orellana (2007), determinó el poder calorífico del biodiesel de aceite de palma sin refinar el cual fue 37.8 KJ/kg.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO

El estudio se realizó en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ), localizado en el Valle del Yeguaré, departamento de Francisco Morazán a 30 km de la ciudad de Tegucigalpa, Honduras.

3.2 MATERIALES Y EQUIPO

Materiales

- Aceite RBD de palma africana marca Clover ® con antioxidante T.B.H.Q.
- Pechugas de pollo
- Papel aluminio
- Aceite RBD de palma africana
- Aceite de palma africana cocinado previamente neutralizado
- Etanol grado reactivo 95.5 % pureza, Merk ®
- Hidróxido de sodio en hojuelas (97% pureza), Sigma Aldrich
- Agua destilada

Equipo

- Hornilla Modelo PC-620 D Corning ®
- Colorímetro Colorflex ® Hunterlab Modelo 45/0
- Hornilla (Fisher Scientific ®).
- Cristalería de laboratorio
- Utensilios de cocina
- Estufa
- Balanza analítica Mettler , AE200
- Cronómetro
- Horno Fisher Isotemp Scientific ®.
- Agitador magnético.
- Decantador de 1000 ml. Kymax ®.
- Balanza analítica Modelo AE 200 Metler ®.
- Termómetro
- Calorímetro adiabático Parr ® instrument company CAT No. 1241
- Enfriador Brookfield ® TC-501 D-115

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Mediante un diseño completamente al azar (DCA) con tres repeticiones se analizaron las propiedades de los tratamientos (Cuadros 3 y 4). Las variables evaluadas fueron rendimiento, índice de peróxidos, ácidos grasos libres, temperatura de punto de enturbamiento, poder calorífico y color mediante la escala $L^* a^* b^*$.

Cuadro 3. Descripción de tratamientos.

Descripción	Tratamiento
Biodiesel producido a partir de aceite RBD de palma africana	T1
Biodiesel producido a partir de aceite de palma africana cocinado 30 minutos a 180°C con pechugas de pollo	T2
Biodiesel producido a partir de aceite de palma africana cocinado 60 minutos a 180°C con pechugas de pollo	T3

Cuadro 4. Distribución de tratamientos.

Tratamiento	Día 1	Día 2	Día 3
T1	R1	R2	R3
T2	R1	R2	R3
T3	R1	R2	R3

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Adecuación de la materia prima

Obtención de aceite de palma africana cocinado durante 30 minutos a 180°C con pechugas de pollo

- Se pesaron 300 g de aceite RBD de palma africana
- Se pesaron tres piezas de 100 g cada una de pechugas de pollo sin pellejo.
- Se calentó el aceite a 180°C por 5 min.
- Se añadió una pieza de 100 g de pechuga de pollo al aceite caliente, luego se frió durante 10 minutos, teniendo el cuidado de no quemar el pollo.
- Se dejó enfriar el aceite a temperatura ambiente durante 10 min.
- Se calentó nuevamente el aceite a 180°C por 5 min.
- Se añadió una segunda pieza de 100 g de pechuga de pollo al aceite caliente y se frió durante 10 minutos.
- Nuevamente, se dejó enfriar el aceite a temperatura ambiente durante 10 min.
- Se calentó por última vez el aceite a 180°C durante cinco min.
- Se añadió la última pieza de pollo de 100 g y se frió durante 10 min.
- Se enfrió el aceite a temperatura ambiente, luego se eliminaron impurezas mediante un filtrado con un colador convencional de cocina.
- Se pesó la cantidad de aceite obtenido.

Obtención de aceite de palma africana cocinado durante 60 minutos a 180°C con pechugas de pollo

- Se pesaron 300 g de aceite RBD de palma africana
- Se pesaron seis piezas de 100 g cada una de pechugas de pollo sin pellejo.
- Se realizaron los mismos pasos requeridos en el método de obtención de aceite cocinado tres veces cada una de 10 minutos. La diferencia fue en este caso que en lugar de cocinarlo tres veces el aceite fue cocinado seis veces durante 10 minutos.
- Se enfrió el aceite a temperatura ambiente, luego se eliminaron impurezas mediante un filtrado con un colador convencional de cocina.
- Se pesó la cantidad de aceite obtenida.

Neutralización y secado del aceite frito

- Se determinó la cantidad de ácidos libres que contenía cada muestra de aceite cocinado por medio del método oficial (AOAC) 940.28.
- Se utilizó la relación de 0.142 Kg de NaOH por cada Kg de ácidos grasos libres presentes en la muestra.
- Se realizó una solución del 10% con la cantidad de NaOH a utilizar para la neutralización del aceite frito.
- La muestra se mantuvo a una agitación constante de 500 rpm durante 20 minutos.
- Se decantó la muestra para separar las dos fases de la neutralización.
- Se secó la muestra a 105°C en el Horno Fisher Isotemp Scientific ® durante 12 horas para eliminar el exceso de agua de las muestras.

3.4.2 Producción del biodiesel

El procedimiento fue tomado de Baccaro, (2007):

- Se pesaron 200 g de aceite de palma africana en beakers de 1000 ml.
- Se calentó el aceite hasta 55 °C.
- Por separado, se realizó la mezcla del etanol relación 6:1 molar con respecto al aceite con el catalizador (NaOH 1% del peso del aceite).
- Una vez alcanzada la temperatura de 55°C, se mezcló el etóxido de sodio con el aceite.
- Se dejó reaccionar la solución por 60 min a 55°C a 700 rpm.
- Una vez completado el tiempo de reacción se colocó la matriz (biodiesel + glicerina + etanol) en un decantador para separar las fases.
- Se dejó reposar la matriz durante 60 minutos en el decantador.
- Se separó el biodiesel de la glicerina.
- Se agregó agua (1/3 de la cantidad de aceite) a 80°C al biodiesel.
- Se agitó la mezcla por un minuto.
- Se dejó reposar la mezcla por 30 minutos.
- Se separó el agua del biodiesel.
- Se colocó la muestra de biodiesel en el horno Fisher Isotemp Scientific ® a 105°C durante 12 horas.
- Se pesó la cantidad de biodiesel obtenida para determinar el rendimiento.

3.4.3 Análisis del biodiesel

Los análisis se realizaron por duplicado a cada una de las unidades experimentales (nueve). Los métodos empleados se describen en el cuadro 5.

Cuadro 5. Métodos analíticos utilizados en el experimento.

Parámetro	Método	Unidades
Color	ASTM D1500	L, a* y b*
Índice de peróxidos	AOAC Cd 8-53	meq O ₂ /kg
Índice de acidez	AOAC 940.28	mg KOH/g
Punto de enturbamiento	D 2500	°C
Poder calorífico	D 240	Kj/Kg

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los resultados de los análisis físico-químicos fueron procesados con la ayuda del software estadístico “Statistical Analysis System” (SAS ® v. 9.1). Utilizando una separación de medias Tukey se determinó las diferencias entre las propiedades de los tratamientos. Con la ayuda de esta herramienta se logró:

- Determinar si existieron diferencias estadísticas significativas en las características físico-químicas del biodiesel producido a partir de aceite RBD de palma africana y aceite de palma africana freído durante 30 y 60 min a 180°C.
- Determinar si el tiempo y temperatura de freído de un aceite de palma africana puede afectar las características físico-químicas del biodiesel.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PRECISIÓN DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS

Los métodos se desarrollaron de una manera aceptable, ya que, los coeficientes de variación presentaron valores menores del 20% entre las repeticiones realizadas (Anexo 1). El rendimiento presentó la menor variación (1.07%), mientras que el índice de acidez presentó la mayor variación (16.39%). Lo anterior indica que los métodos empleados durante el experimento fueron desarrollados de una manera aceptable.

4.2 CALIDAD DE LA MATERIA PRIMA

Las propiedades de la materia prima utilizada son descritas en el Anexo 2. Según el estándar de calidad ASTM D 6751, el % de ácidos grasos libres (% AGL) presentes en los aceites utilizados para elaborar biodiesel no debe exceder el 1%. Los aceites utilizados como materia prima cumplieron con los estándares de calidad establecidos (Anexo 2). Por otra parte, el incremento en el tiempo de freído del aceite de palma no produjo cambios significativos entre las muestras de aceite en términos de porcentaje de ácidos grasos libres, sin embargo sí incrementó significativamente el índice de peróxidos, presentando una mayor oxidación del aceite a medida se incrementó el tiempo de freído del mismo. De acuerdo a los estándares de calidad de los lípidos en general, el índice de peróxidos no debe sobrepasar el valor de los 10 meq O₂/Kg. El índice de peróxidos obtenido en cada una de las muestras de aceites utilizados como materia prima indican que la materia prima cumplió con el estándar establecido (Anexo 2).

Para el caso del color, no existe un parámetro de calidad de la materia prima establecido por la norma ASTM D 6751, sin embargo se puede observar el efecto del tiempo de cocción sobre la coloración del aceite. A medida se incrementó el tiempo de cocción del aceite, éste se oscureció (valores L* menores), además obtuvo una coloración más roja (-a*= verde, a*= rojo) y se volvió más amarillo (-b*= azul, b*= amarillo). Los parámetros de calidad de la materia prima fueron obtenidos con el objetivo de tener referencia sobre la calidad de la materia prima y el determinar contenido de NaOH a utilizar para neutralizar el aceite cocinado antes de ser transesterificado.

4.3 PROPIEDADES DEL BIODIESEL

Las propiedades que presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos fueron el rendimiento, índice de peróxidos, el punto de enturbamiento (Cuadro 6) y las escalas L* y b* del color (Cuadro 7). Por otra parte, los parámetros de índice de acidez, poder calorífico y escala a* del color fueron estadísticamente iguales en los tres tratamientos.

Cuadro 6. Propiedades del biodiesel de aceite RBD y aceite cocinado de palma africana.^{1,2}

Trat.	Rendimiento	Índice de peróxidos (meq O ₂ /kg)	Índice de acidez (mg KOH/g)	Punto de enturbamiento (°T)	Poder calorífico (Kj/Kg)
Biodiesel de aceite de palma	90.8 ± 1.44 ^a	0.10 ± 0.1 ^c	0.43 ± 0.06 ^a	12.72 ± 0.19 ^a	39.49 ± 0.01 ^a
Biodiesel de aceite de palma cocinado 30 min	85.83 ± 0.55 ^b	2.83 ± 0.31 ^b	0.43 ± 0.06 ^a	12.23 ± 0.12 ^b	39.49 ± 0.02 ^a
Biodiesel de aceite de palma cocinado 60 min	81.73 ± 0.38 ^c	6.23 ± 0.25 ^a	0.498 ± 0.10 ^a	11.78 ± 0.08 ^c	39.49 ± 0.03 ^a
Pr < F	<0.0001	<0.0001	0.4933	0.0005	0.9033
ASTM D 6751	-----	10 max	0.80 max	Reportar	Reportar

¹ Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas con un nivel de significancia del 5%.

² Letras iguales en la misma columna indican no diferencias estadísticas con un nivel de significancia del 5%.

4.3.1 Rendimiento

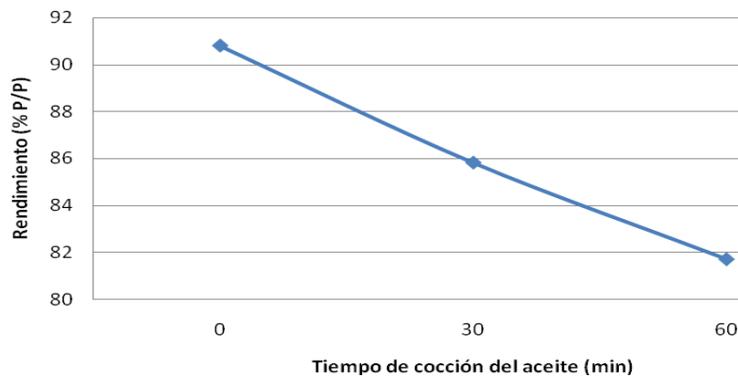


Figura 3. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el rendimiento en biodiesel

El biodiesel fabricado a partir de aceite RBD de palma africana presentó el mayor rendimiento (90.8%), lo anterior indica que el proceso de transesterificación fue más eficiente en este tratamiento. En segundo lugar se encuentra el biodiesel producido a partir de aceite de palma cocinado 30 minutos a 180 °C con pollo (85.83%), en último lugar se encuentra el biodiesel de aceite de palma cocinado 60 minutos a 180 °C con pollo (81.73%) (Figura 3).

Los resultados obtenidos son confirmados por Canaksi (2005), quien indica que los aceites cocinados generalmente presentan elevados valores de ácidos grasos libres (0.7% - 41.8%) y agua (0.01% - 55.38%) los cuales reducen significativamente la eficiencia de transesterificación en convertir la materia prima en biodiesel. En el estudio realizado por Mis y Sathivel (2008), se obtuvo la misma tendencia en el rendimiento de acuerdo al tiempo de freído del aceite, sin embargo, los rendimientos fueron alrededor del 5% menores utilizando aceite de soya. Los bajos rendimientos obtenidos se debieron a la utilización de etanol al 95% en lugar de metanol, ya que de acuerdo con Demirbas (2007), se pueden obtener rendimientos por encima del 95% utilizando metanol y aceites refinados.

4.3.2 Índice de peróxidos

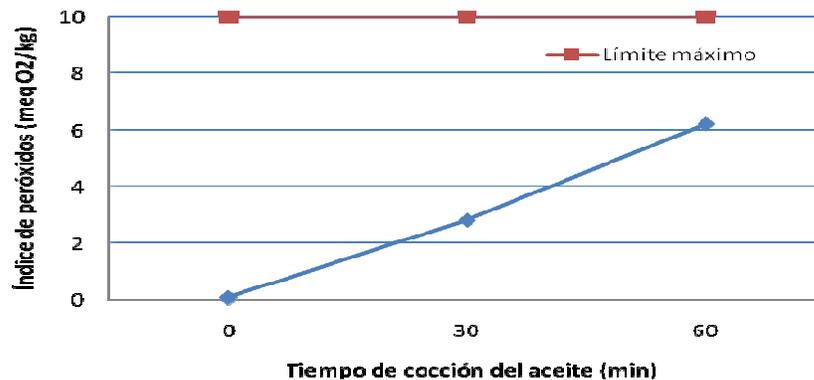


Figura 4. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el índice de peróxidos del biodiesel.

El tiempo de freído del aceite provocó cambios significativos en el nivel de oxidación del biodiesel. Así pues, el biodiesel producido a partir de aceite RBD de palma fue el que se oxidó menos (0.1 meq O₂/Kg), seguido del biodiesel producido a partir de aceite cocinado 30 minutos (2.83 meq O₂/Kg), mientras que el biodiesel producido a partir de aceite cocinado 60 minutos presentó el mayor índice de peróxidos (6.23 meq O₂/Kg) (Figura 4). La misma tendencia de oxidación se obtuvo en el estudio realizado por Mis y Sathivel (2008), con aceite de soya. Sin embargo, en este caso el biodiesel presentó una menor oxidación. Los resultados obtenidos son confirmados por Ferrati *et al.* (2005), quien asegura que el biodiesel fabricado a partir de aceites cocinados presenta mayores índices de oxidación debido a la destrucción de antioxidantes presentes en el aceite a causa del calor del freído del aceite. Ninguno de los tratamientos superó el límite de índice de peróxidos (10 meq O₂/Kg) establecido por la norma ASTM D 6751.

4.3.3 Índice de acidez

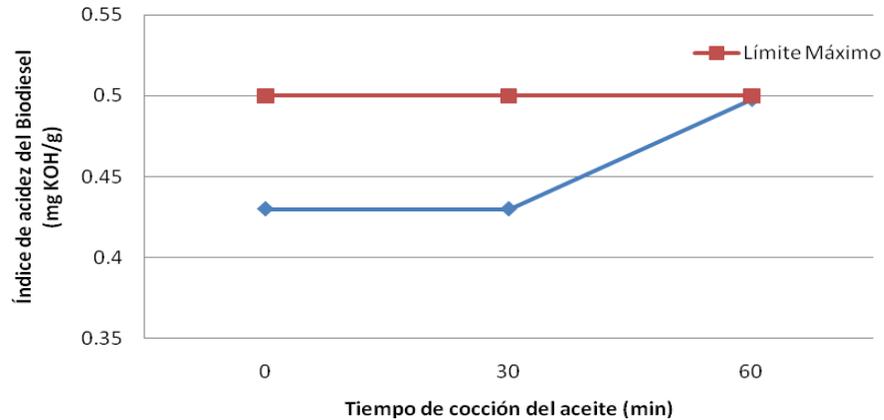


Figura 5. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el índice de acidez del biodiésel.

El índice de acidez fue igual estadísticamente para todos los tratamientos (Figura 5). Lo anterior se debió principalmente a que antes de la transesterificación de los aceites utilizados, éstos fueron neutralizados con NaOH para eliminar el exceso de ácidos grasos libres. La etapa de decantación del biodiésel para ser separado de la glicerina no presentó mayores problemas ya que no se produjeron altas cantidades de jabón y otros compuestos que hubiesen dificultado la separación, debido principalmente a que la materia prima utilizada presentó un % AGL menor al 0.5%, según Ma y Hanna (1999), valores por encima del 0.5% de AGL en la materia prima puede provocar la formación de jabones y geles en presencia de agua lo que incrementa la viscosidad del biocombustible. Resultados similares fueron obtenidos en el estudio realizado por Mis y Sahtivel (2008), en donde el tiempo de freído del aceite no afectó el índice de acidez.

4.3.4 Punto de enturbamiento

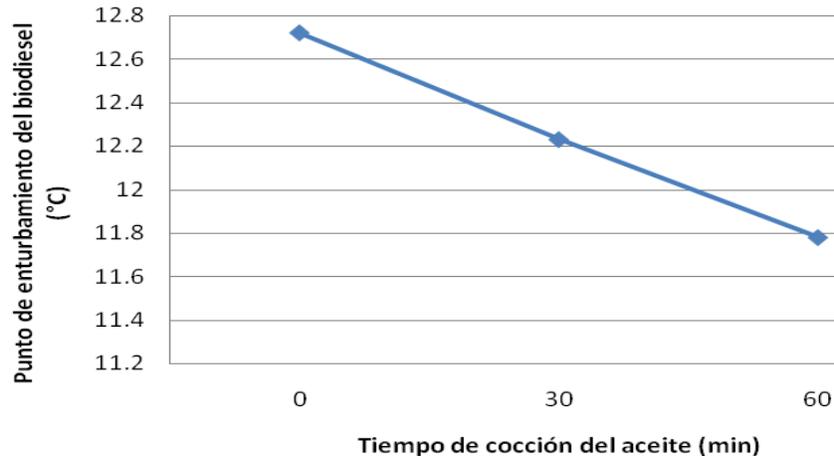


Figura 6. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el punto de enturbamiento del biodiésel

La Figura 6, muestra que a medida se incrementó el tiempo de freído del aceite el biodiesel disminuyó significativamente su punto de enturbamiento lo cual es un aspecto deseable en la calidad final del mismo. De acuerdo a López (2008), el punto de enturbamiento es la temperatura a la cual las parafinas y otras sustancias disueltas en el aceite se separan del mismo y forman cristales al enfriar el aceite. Este tipo de sustancias probablemente fueron degradadas producto de la temperatura y tiempo de freído del aceite haciendo que el biodiesel disminuyera su punto de enturbamiento. Así pues se pudo observar una relación inversa entre tiempo de freído del aceite y punto de enturbamiento. Orellana (2007), determinó el punto de enturbamiento del biodiesel de aceite de palma sin refinar el cual fue de 14.5 °C, esto se debió principalmente a que el aceite utilizado en este estudio fue aceite RBD el cual probablemente contenía menos impurezas que permitieron bajar el punto de enturbamiento del biodiesel.

4.3.5 Poder calorífico

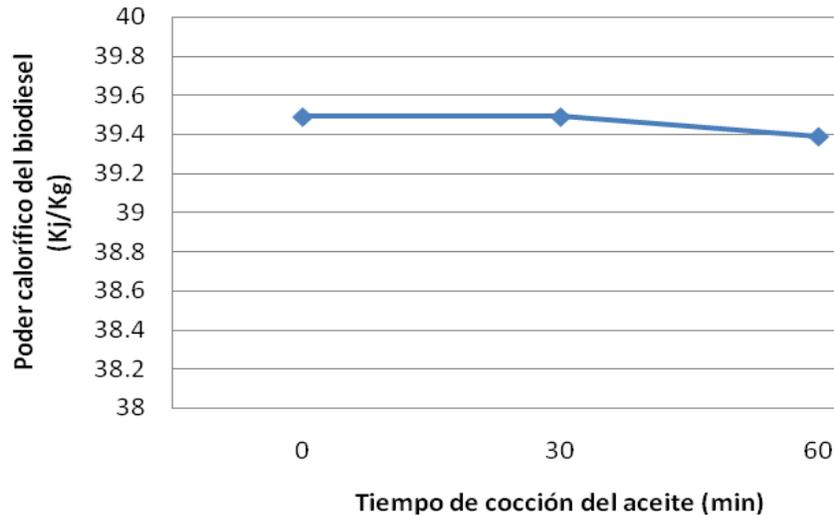


Figura 7. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en el poder calorífico del biodiesel.

El poder calorífico del biodiesel estadísticamente no fue afectado por el tiempo de freído del aceite. (Cuadro 6). Los resultados obtenidos se encuentran por debajo del poder calorífico que posee el diesel fósil (Figura 7). Los valores determinados fueron de 39.49 Kj/Kg para cada uno de los tratamientos evaluados comparados con 43.5 Kj/Kg que generalmente posee el diesel fósil (Tyson *et al.*, 2004), se pudo observar que los tratamientos poseen un 10% menos de energía comparado con la energía que posee el diesel fósil. Por otra parte Orellana (2007), determinó el poder calorífico del biodiesel de aceite de palma sin refinar el cual fue de 37.8 KJ/Kg. El mayor poder calorífico obtenido en el estudio se debió a la utilización de aceite refinado el cual probablemente contenía menos impurezas.

4.3.6 Color

Cuadro 7. Color en la escala L* a* b* del biodiesel de aceite RBD y aceite cocinado de palma africana.^{3,4}

Tratamiento	Color		
	L*	a*	b*
Biodiesel de aceite de palma	66.29 ± 2.77 ^b	-4.42 ± 0.74 ^a	27.88 ± 1.33 ^b
Biodiesel de aceite de palma cocinado 30 min	72.17 ± 2.82 ^a	-5.22 ± 0.56 ^a	30.69 ± 1.37 ^b
Biodiesel de aceite de palma cocinado 60 min	68.56 ± 0.77 ^{ba}	-5.39 ± 0.11 ^a	44.10 ± 0.51 ^a
Pr < F	0.0551	0.1446	<0.0001

³ Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas con un nivel de significancia del 5%.

⁴ Letras iguales en la misma columna indican no diferencias estadísticas con un nivel de significancia del 5%.

Escala L*

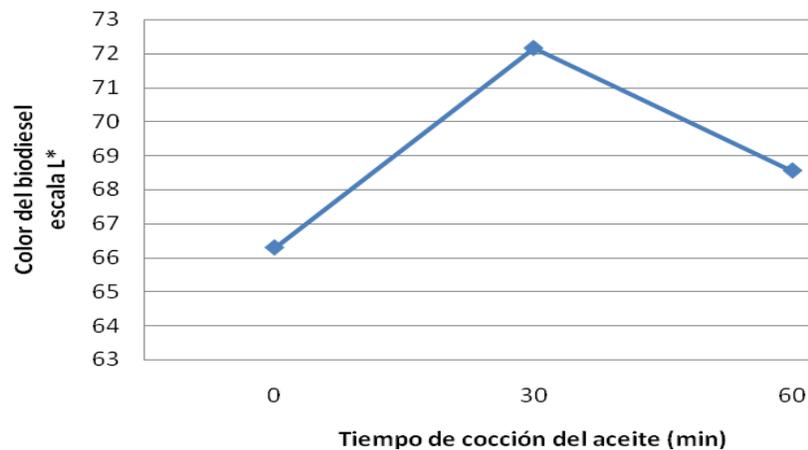


Figura 8. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en cambios en la escala L* del color del biodiesel.

La luminosidad de las muestras de biodiesel presentaron variaciones significativas estadísticamente de acuerdo al tiempo de freído del aceite (Cuadro 8). El biodiesel producido de aceite RBD de palma fue el más oscuro ($L^* = 66.29$) (el más oscuro de todos los tratamientos), el biodiesel producido a partir de aceite cocinado 30 minutos el que presentó el valor L^* más alto ($L^* = 72.17$), mientras que el biodiesel producido a partir de aceite cocinado 60 minutos presentó un valor intermedio ($L^* = 68.56$) (Figura 8). Comparado con el color inicial de la materia prima se puede observar que los tratamientos aumentaron su luminosidad. El mismo efecto fue observado en el estudio realizado por Mis y Sathivel (2008), en donde el biodiesel también sufrió un efecto “aclaramiento”.

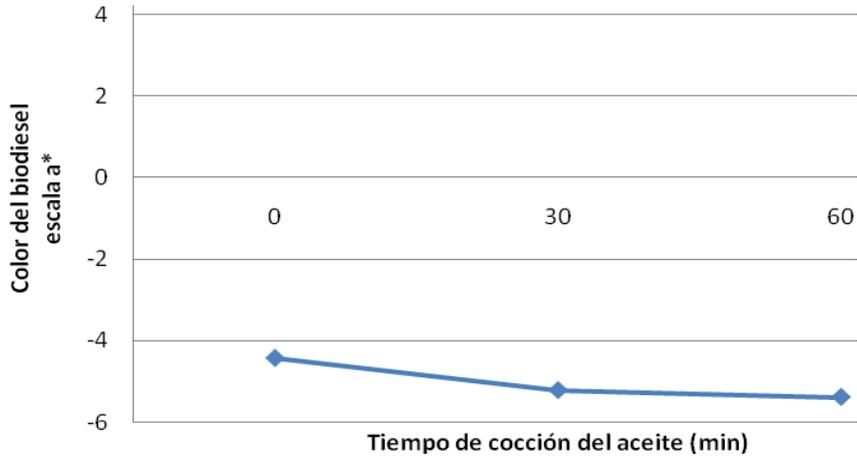
Escala a*

Figura 9. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en cambios en la escala a* del color del biodiesel.

El aumento en el tiempo de freído del aceite no provocó diferencias estadísticas significativas en la escala a* del color de las muestras de biodiesel (Figura 9).

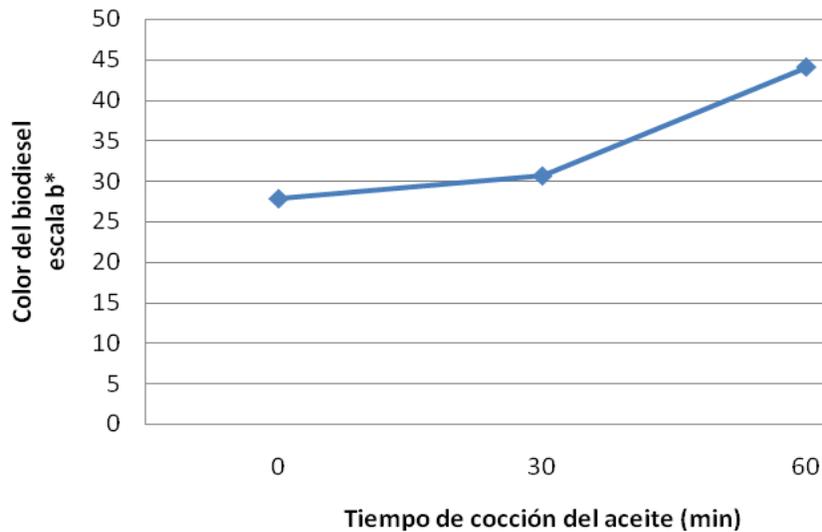
Escala b*

Figura 10. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma a 180 °C en cambios en la escala b* del color del biodiesel.

El aumento en el tiempo de freído del aceite provocó cambios significativos estadísticamente en la escala b* del color del biodiesel (Figura 10). El cocinado por 30 minutos no aumentó significativamente el valor de b* del biodiesel pero sí a 60 minutos

comparado con el control. Los valores reportados indican que según la escala b*, los tratamientos presentaron una coloración amarilla. Por otra parte, la materia prima presentó una coloración amarilla más intensa comparada a la coloración del biodiesel.

4.4 ANÁLISIS DE COSTOS

Se analizaron solamente costos variables de producción de biodiesel, ya que el análisis solamente se realiza a nivel de laboratorio en donde los costos fijos elevan el costo real del producto. Lo anterior se debe principalmente a que el equipo empleado fue subutilizado.

Cuadro 8. Costos variables de producción de biodiesel con aceite RBD de palma africana a nivel de laboratorio.

Materia prima	Cantidad	Costo unitario (US\$)	Costo total (US\$)
Aceite RBD de palma (Kg)	1	1.9	1.90
Etanol (L)	0.32	0.6	0.192
NaOH (Kg)	0.01	1.2	0.25
Agua (L)	0.3	0.1	0.03
Costo tratamiento			2.37
Costo litro			2.64

El costo variable de producir un litro de biodiesel de aceite RBD de palma africana a nivel de laboratorio fue US\$ 2.64 (Cuadro 8). El mayor costo lo representó el aceite RBD de palma el cual fue la principal materia prima para la producción del biodiesel. Es importante destacar que el aceite empleado se comercializa para consumo humano.

Cuadro 9. Costos variables de producción de biodiesel producido con aceite cocinado 30 minutos a nivel de laboratorio.

Materia prima	Cantidad	Costo unitario (US\$)	Costo total (US\$)
Aceite cocinado de palma (Kg)	1	0.38	0.38
Etanol (L)	0.32	0.6	0.19
NaOH (Kg)	0.012	25	0.3
Agua (L)	0.5	0.1	0.05
Costo tratamiento			0.92
Costo litro			1.07

El costo variable de producir un litro de biodiesel de aceite cocinado 30 minutos a nivel de laboratorio fue de US\$ 1.07 (Cuadro 9). De acuerdo con Canakci (2005), los aceites

de desecho pueden tener un valor del 10 al 20% del valor de un aceite refinado. En este caso se utilizó un valor del aceite del 20% comparado con el valor del aceite RBD; el costo variable del biodiesel producido a partir de aceite cocinado 30 minutos comparado con el costo variable biodiesel producido a partir de aceite RBD es 60% más económico.

Cuadro 10. Costos de producción de biodiesel producido con aceite cocinado 60 minutos a nivel de laboratorio.

Materia prima	Cantidad	Costo unitario (US\$)	Costo total (US\$)
Aceite RBD de palma (Kg)	1	0.19	0.19
Etanol (L)	0.32	0.60	0.19
NaOH (Kg)	0.013	25	0.325
Agua (L)	0.5	0.1	0.05
Costo tratamiento			0.76
Costo litro			0.91

El costo de producir un litro de biodiesel de aceite cocinado 60 min fue de US\$ 0.91 (Cuadro 10). En este caso se utilizó un costo del aceite del 10% del valor del aceite RBD de palma africana. El costo variable de producir biodiesel a partir de aceite cocinado 60 minutos comparado con el costo variable de producir biodiesel a partir de aceite RBD es 65% más económico.

5. CONCLUSIONES

- Los biodiesel producidos con aceite usado de palma cumplieron con los parámetros evaluados de la norma ASTM D 6751.
- El aceite de palma africana cocinado durante 30 y 60 min a 180 °C puede ser utilizado como materia prima para la fabricación de biodiesel.
- La eficiencia de producción de biodiesel fue mayor utilizando aceite RBD de palma africana comparado con aceites cocinados.
- Fue más económico utilizar aceite de palma cocinado para la producción de biodiesel comparado con la utilización de aceite RBD.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio que relacione tiempo de freído con rendimiento, calidad y la estabilidad en anaquel del biodiesel producido a partir de aceites cocinados.
- Evaluar rendimiento y calidad del biodiesel elaborado con aceites con mayor número de ciclos de freído y aceites provenientes de otros procesos de freído: pescado, papas, etc.
- Realizar un estudio sobre el aprovechamiento de los subproductos de la producción de biodiesel como lo son la glicerina y el agua utilizada para lavado del biodiesel la cual podría tener potencial para la producción de biogás.
- Realizar un estudio de factibilidad de producción de biodiesel a escala comercial a partir de aceites cocinados producidos en Honduras.
- Evaluar nuevas alternativas producción de energía renovable a partir de desechos agroindustriales producidos en la Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano.

7. RECONOCIMIENTOS

El autor agradece al Dr. Francisco Javier Bueso por su apoyo y asistencia brindada en la realización de este proyecto, a todo el personal del Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ) y a todas las personas que hicieron posible la ejecución de este estudio.

8. BIBLIOGRAFÍA

AL-WIDYAN, M.I.; AL-SHYOUKH, A.O. 2002. Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. *Bioresource technology* 85. 253-256 p.

ANGUAYA VELÁZQUEZ, C. A. 2007. Estudio de estabilidad en almacén del biodiesel obtenido de aceite de soya (*Glycine max*), palma africana (*Elaeis guineensis*), maíz (*Zea mays*), higuera (*Ricinus communis*) y piñón (*Jatropha curcas*). Proyecto de graduación, Ingeniero en Agroindustria Alimentaria. EAP, El Zamorano, Honduras. 71p.

BACCARO DÍAZ, J.R. 2007. Evaluación de rendimiento de biodiesel elaborado a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y etanol anhidro de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Proyecto de graduación, Ingeniero en Agroindustria Alimentaria. EAP, El Zamorano, Honduras. 34 p.

BERCHMANS, H.J.; HIRATA, S. 2008. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology* 99. 1716- 1721 p.

CANAKCI, M. 2005. The potencial of restaurant waste lipids as biodiesel feedstock. *Bioresource Technology* 98. 183-190.

CALLE MARAVI, J.; COELLO GUEVARA, J.; NAZARIO RAMIREZ, M.; CASTILLO SÁNCHEZ, L.; CASTRO PAREJA, P. 2007. Producción de biodiesel a pequeña escala a partir de aceites usados en la ciudad de lima (en línea). Consultado el 20 de septiembre del 2008. Disponible en: www.solucionespracticas.org.pe/publicaciones/pdf/aceitesusados.pdf

DEMIRBAS, A. 2007. Studies on cottonseed oil biodiesel prepared in non-catalytic SCF conditions. *Bioresource Technology* 99. 1125- 1131 p.

FERRARI, R., DA SILVA OLIVEIRA, V., SCABIO, A. 2005. Oxidative stability of biodiesel from soybean oil fatty acid ethyl esters. *Scientia Agricola*. Vol. 62 No. 3. 291-295.

- LENOIR, C. 2008. Análisis de la producción de biodiesel (en línea). Consultado el 19 de septiembre. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/biodiesel/biodiesel.htm>
- LÓPEZ RODRIGO, O. 2008. Propiedades físicas de los lubricantes. Consultado el 27 de septiembre del 2008. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos10/filu/filu.shtml>
- MA, F. HANNA, M.A. 1999. Biodiesel production: a review¹. *Bioresource technology* 70 (1999) 1-15 p.
- MARCHETTI, J.M.; MIGUEL, V.U.; ERRAZU, A.F. 2005. Possible methods for biodiesel production. *Renewable & sustainable energy reviews* 11 (2007) 1300-1311.
- MIS, K.; SATHIVEL, S. 2008. Thermal degradation of biodiesel produced from fried soybean oil. Louisiana State University. 1 0 p.
- ORELLANA ZELAYA, J.J. 2007. Evaluación de calidad de biodiesel elaborado con palma africana (*Elaeis guineensis*) y etanol. Proyecto de graduación, Ingeniero en Agroindustria Alimentaria. EAP, El Zamorano, Honduras. 52 p.
- RUPILIUS, W.; AHMAD, S.; 2007. Palm oil and palm kernel oil as raw materials for basic oleochemicals and biodiesel. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 109(2007) 433 – 439 p.
- STARKMAN M. 2006. Uso del Biodiesel en Honduras (en línea). Consultado el 8 de julio del 2008. Disponible en: http://www.sag.gob.hn/index.php?option=com_content&task=view&id=341&Itemid=135
- TYSON, K.S.; BOZELL, J.; WALLACE, R.; PETERSEN, E.; MOENS, L. 2004. Biomass oil analysis: Research needs and recommendations. National Renewable energy laboratory. United States. Technical report. 116 p.
- US EMBASSY – HONDURAS. 2008. El futuro de la Palma Africana en Honduras (en línea). Consultado el 10 de junio del 2008. Disponible en: http://honduras.usembassy.gov/embajada/secciones/econ_afpalm_sp.pdf
- WANG, Y.; OU, S.; LIU, P.; XUE, F.; TANG, S. 2006. Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 252 (2006) 107-112 p.
- WIKIPEDIA. 2008. EN 14214 (en línea). Consultado el 20 de septiembre del 2008. Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/EN_14214
- WIKIPEDIA. 2008. Poder Calorífico (en línea). Consultado el 27 de septiembre del 2008. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_cal%C3%B3rica

ZHANG, Y.; DUBÉ, M.A.; MCLEAN, D.D.; KATES, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource technology* 89. 1-16 p.

ZHANG, Y.; DUBÉ, M.A.; MCLEAN, D.D.; KATES, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensibility analysis. *Bioresource technology* 90. 229-240 p.

ZHENG, S.; KATES, M.; DUBÉ, M.A.; MCLEAN, D.D.; 2006. Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil. *Biomass & Bioenergy* 30. 267-272 p.

9. ANEXOS

Anexo 1. Precisión de los métodos analíticos utilizados.

Parámetro	Desv. Est.	%C.V.	Media
Rendimiento (%)	0.92	1.1	86.12
Índice de peróxidos (meq O ₂ /Kg)	0.24	7.7	3.06
Índice de acidez (meq KOH/Kg)	0.07	16.4	0.45
Punto de enturbamiento (°C)	0.14	1.1	12.24
Poder calorífico (Kj/Kg)	0.02	0.1	39.49
L*	2.33	3.4	69.01
a*	0.54	-10.9	-5.01
b*	1.14	3.3	34.22

Anexo 2. Propiedades de los aceites utilizados en el ensayo antes de neutralización.^{5,6}

Aceite	% Ácidos grasos libres	Índice de peróxidos (meq O ₂ /kg)	Color		
			L*	a*	b*
Aceite de palma	0.142 ^a	0.067 ^c	64.66 ^a	-5.45 ^b	28.597 ^b
Aceite de palma cocinado 30 min	0.233 ^a	2.4 ^b	57 ^b	6.18 ^a	58.17 ^a
Aceite de palma cocinado 60 min.	0.25 ^a	6.167 ^a	53.54 ^b	6.916 ^a	55.45 ^a
Pr □ F	0.07	□0.0001	0.0003	□0.0001	□0.0001

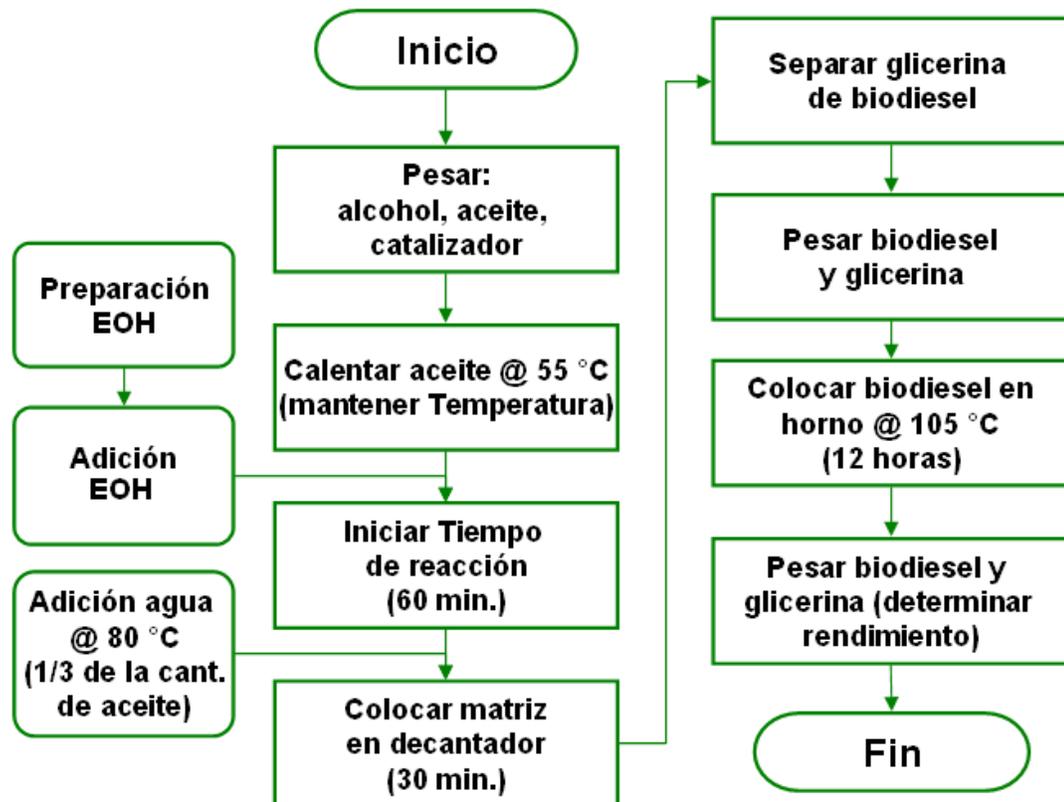
⁵ Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas con un nivel de significancia del 5%.

⁶ Letras iguales en la misma columna indican diferencias estadísticas con un nivel de significancia del 5%.

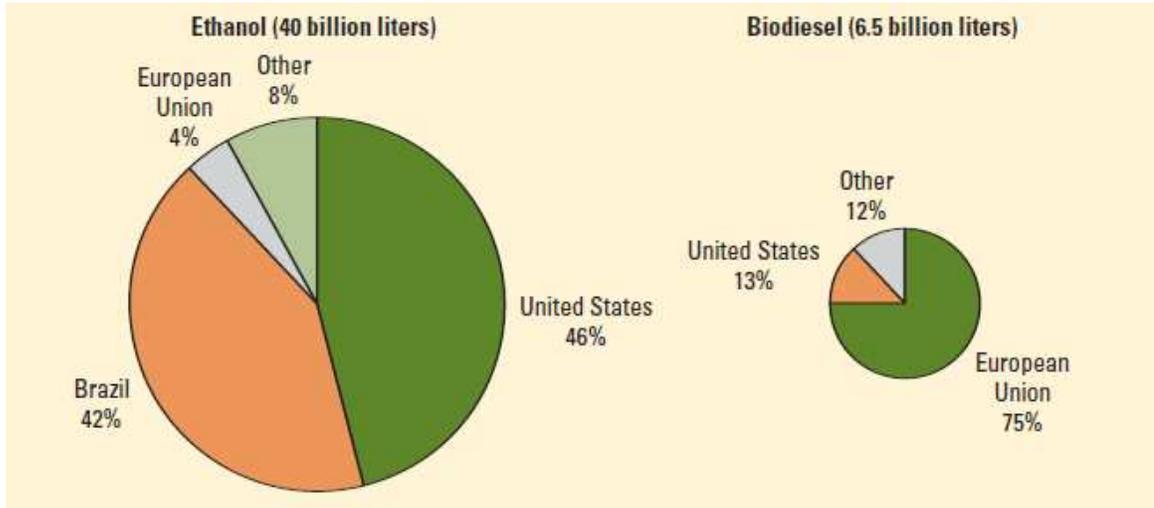
Anexo 3. Descripción de los costos variables del proyecto de investigación.

Descripción	Cantidad	Unidades	Precio (\$)	Total
Aceite RBD de palma africana	1	Galón	6.50	6.5
Pechugas de pollo	4	Kg	3.35	13.4
Análisis de peróxidos	18	unidades	11.5	207.0
Análisis de ácidos grasos libres	18	unidades	15.0	270.0
Análisis de color	18	unidades	0.0	0.0
Análisis de degradación térmica	18	unidades	14.50	261.0
Metanol	1	litro	1.0	1.0
Hidróxido de sodio (NaOH)	75	g	10.0	10.0
Total				\$768.9

Anexo 4. Diagrama de flujo de producción del biodiesel.

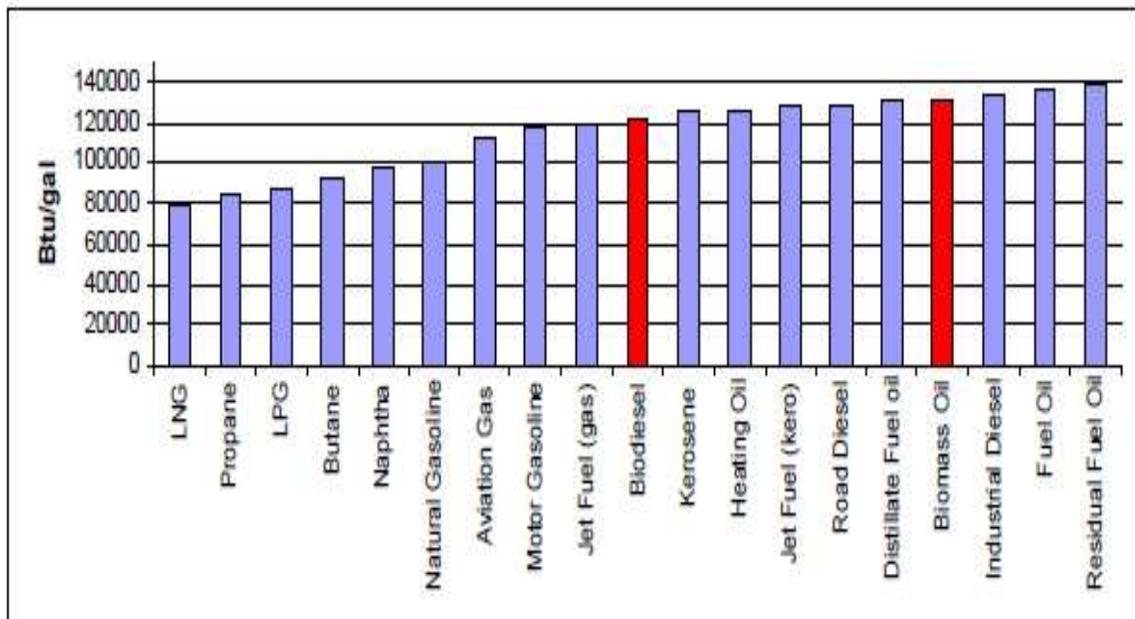


Anexo 5. Distribución de la producción mundial de etanol y biodiesel en el 2006.



Fuente: Banco Mundial. 2007.

Anexo 6. Poder calorífico de diversos combustibles y biocombustibles.



Fuente: Tyson *et al.*, 2004.