

Caracterización de un biocombustible obtenido a partir de aceite vegetal de desecho

Characterization of the biofuel obtained from waste vegetable oil

*MSc. José Gandón-Hernández, gandon@quimica.cujae.edu.cu;
Ing. Yanelis Caridad Torres-Baratute, MSc. Marilyn García-Díaz.*

Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba

Resumen

La transformación de los aceites vegetales en biocombustibles se ha venido estudiando desde el primer tercio del siglo XX, y en la actualidad se presenta como una solución atractiva para los problemas de la reutilización y el vertimiento indiscriminado del aceite residual de origen alimentario. Los biocombustibles de forma general poseen propiedades físicas muy similares a las del combustible Diesel, no obstante, es de gran importancia caracterizarlos casuísticamente, principalmente en cuanto a su % de humedad, viscosidad, densidad, índice acidez, corrosión al cobre y la presencia de impurezas. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar un biocombustible obtenido de un aceite residual de una industria alimentaria. Para obtener el biodiesel se siguieron todos los pasos establecidos y principalmente para el análisis de las propiedades físicas, se usaron las normas ASTM. Los resultados obtenidos tanto para el combustible, así como para las mezclas B5 y B10 permiten asegurar que pueden ser utilizados como combustible Diesel.

Palabras clave: *biocombustibles, aceite vegetal usado, transesterificación.*

Abstract

The transformation of the vegetable oils into biofuels has been come studying from the first third of the XX century, and in present time it is presented like an attractive solution for the problems of the reuse and the indiscriminate dumping of the residual vegetable oil of alimentary origin. These biofuels in a general way possesses similar physical properties that the Diesel fuel, nevertheless it is of great importance to characterize them casuistically, mainly as for their content of humidity, viscosity, density, acidity index, corrosion to the copper and presence of sludges. This work has as objective to characterize a biocombustible obtained from a residual oil of an alimentary industry. To obtain the biofuel all the steps they were continued and for the analysis of the physical properties mainly the norms of ASTM were used. The results obtained so much for the fuel, as well as for the mixtures B5 and B10 allow to assure that they can be used as Diesel fuel.

Keywords: *biofuel, used vegetable oil, transesterification.*

Introducción

Los combustibles fósiles y la energía nuclear proporcionan, en la actualidad, el 90 % de la energía que anualmente se utiliza en el mundo.

Motivado por el crecimiento de la población, la extensión de la producción industrial y el uso masivo de tecnologías, desde mediados del siglo XX comenzó a crecer la preocupación por el agotamiento de las reservas de petróleo y por el deterioro ambiental. Desde entonces se impulsó el desarrollo de energías alternativas basadas en recursos naturales renovables y menos contaminantes, como la luz solar, las mareas, el agua y la biomasa /1/.

La biomasa es la materia orgánica que constituye todos los seres vivos, sus productos y desechos. Se dice que es una fuente de energía renovable pues su formación no lleva miles de años, siendo su tasa de utilización no mucho mayor que la de su formación.

En términos energéticos, la biomasa se puede utilizar directamente - como es el caso de la leña - o transformarla para producir los biocombustibles. Es por ello que, a diferencia de los combustibles fósiles que provienen de la materia orgánica acumulada durante enormes períodos de tiempo, los biocombustibles provienen de una fuente renovable /2/.

La creciente demanda de productos básicos agrícolas para la producción de biocombustibles está teniendo importantes repercusiones en los mercados agrícolas aumentando las preocupaciones acerca del efecto negativo para la seguridad alimentaria de millones de personas en todo el mundo /3/.

Cuando se trata de aceites residuales o descartados de las producciones alimentarias, lejos de significar su desarrollo un riesgo para el sostenimiento alimentario, resulta una vía factible y ventajosa para tratar un peligroso residual. El aceite vegetal usado puede catalogarse como un peligro para la salud cuando se utiliza reiteradamente y por otro lado su vertimiento indiscriminado puede ocasionar serios daños al medio ambiente.

Ha quedado demostrado que la mejor manera de tratar el aceite vegetal descartado es mediante la reacción de transesterificación, de la que pueden obtenerse productos de alto valor añadido: ésteres y glicerina. Los ésteres

poseen características que permiten su uso como biocombustibles y la glicerina posee un sinnúmero de aplicaciones /4/.

Soluciones de esta índole constituyen un factor determinante en el desarrollo local ya que se basan en la identificación y aprovechamiento de los recursos y potencialidades endógenas de centros industriales y de servicios, así como de comunidades o asentamientos poblacionales.

Puede entonces afirmarse que la transformación del aceite vegetal residual en un biocombustible resulta recomendable desde los puntos de vista energético, medioambiental y social.

En este trabajo se estudia la importancia de los procesos de purificación de los ésteres metílicos obtenidos a partir de la transformación de aceite de soya descartado en un establecimiento de producción de alimentos pre-fritos. Se caracteriza el biocombustible obtenido, se aplican los procedimientos correspondientes para la purificación y se determinan las principales propiedades de los ésteres obtenidos comparándose con las de sus similares reportados en la literatura y con las del combustible Diesel regular.

Fundamentación teórica

Transesterificación

La reacción química que mejores resultados ha demostrado tener para obtener biocombustible es la transesterificación. Esta consiste en la reacción entre un triglicérido (compuesto por una molécula de glicerol esterificada por tres moléculas de ácidos grasos), contenido en el aceite vegetal o grasa animal y un alcohol ligero (metanol o etanol) utilizando un catalizador, obteniéndose como productos glicerina y ésteres derivados de los tres ácidos grasos de partida, es decir, biocombustible. Comúnmente se suele usar metanol como alcohol de sustitución, en cuyo caso el biocombustible estará compuesto por ésteres metílicos /5/.

Difícilmente la reacción de transesterificación consigue ser completa, por lo que los productos obtenidos de la reacción, principalmente los ésteres se encuentran contaminados con otros compuestos, como pueden ser triglicéridos que no reaccionaron, alcohol, catalizador, mono y diglicéridos, jabones y

glicerol. Por esta razón, después de la transesterificación es necesario someterlos a un proceso de purificación.

Lavado de los ésteres o biocombustible

Después de la reacción y de la decantación inicial, algunas impurezas solubles en agua quedan en la fase ésteres. Estos residuos siempre van a aparecer, independientemente de la calidad de la reacción y del aceite. Lavar el combustible con agua remueve las impurezas ya mencionadas, pero no remueve mono y diglicéridos, contaminantes que resultan de una reacción incompleta y que afectan la calidad del biocombustible /6/.

El lavado también tiene otras dos ventajas: detiene el curso de la reacción lenta que algunas veces ocurre, lo cual puede lograrse removiendo el metanol y el catalizador y además brinda información para el control de calidad /7/.

Cuatro son los modos principales de lavar los ésteres: lavado con burbujas, mediante atomización, con agitación y el lavado estático.

Secado del biocombustible

Por último, el biocombustible debe someterse a un proceso de secado antes de ser enviado al almacenamiento. Existen tres modos principales de secar los ésteres: secado por rocío y calentamiento, secado simple por calentamiento y secado al sol. En algunos sistemas industriales, se procede a la destilación del biocombustible con vista a la obtención de un producto de mayor pureza.

Control de calidad

Los motores Diesel de hoy requieren un combustible limpio, además que permanezca estable bajo las distintas condiciones operacionales. El biocombustible es el único combustible alternativo que puede usarse directamente en cualquier motor diesel, sin necesidad de modificaciones /8/.

Las propiedades físicas del biocombustible son similares a las del combustible Diesel, con densidad equivalente y viscosidad ligeramente superior. Presenta, como inconveniente, un poder calorífico que es alrededor de un 10 % inferior, así como el hecho de que a bajas temperaturas tiende a solidificarse en condiciones de frío extremo. Debido a ello, debe ser tratado con aditivos específicos, aunque esta práctica también se aplica al propio gasóleo. Como

ventajas cabe mencionar que presenta un número de cetano superior al del combustible Diesel, mejorándolo si se emplea como aditivo de éste y que presenta un punto de inflamación más alto, permitiendo un almacenamiento mucho más seguro. Como sus propiedades son similares a las del combustible Diesel de petróleo, se prefiere mezclarlos en diferentes proporciones, destacándose que la mezcla con bajas fracciones de biocombustible prácticamente no difiere del Diesel de petróleo en cuanto a sus propiedades /9/.

Particularmente en este trabajo se estudió la importancia de los procesos de purificación de los ésteres metílicos obtenidos a partir de la transformación de aceite de soya descartado en un establecimiento de producción de alimentos pre fritos. Para cumplir con el objetivo de caracterizar el biocombustible obtenido, se aplicaron los procedimientos correspondientes para la purificación, se determinaron las principales propiedades de los ésteres obtenidos y se compararon con las de sus similares reportados en la literatura y también con las del combustible Diesel regular /10/.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Para llevar a cabo el estudio se utilizaron muestras de aceite vegetal residual proveniente de un establecimiento industrial de productos cárnicos conformados y pre fritos.

Reactivos: metanol 99,0 %, NaOH 95,0 % y combustible Diesel.

Cristalería: probeta de 100 mL, embudos decantadores de 500 mL, bureta de llave de vidrio de 25 o 50 mL, pipetas de 1 mL, 5mL, 10 mL y de 50 mL, matraz o erlenmeyer de 250 o 500 mL con cuello 29/32 de vidrio esmerilado, condensador o refrigerante Liebig de 300 mm de boca esmerilada 29/32.

Equipos: desecador, pH metro, viscosímetro, reactor de 1 L, estufa eléctrica, balanza analítica, densímetro de vidrio, agitador mecánico, baño termostatado.

Otros: mallas filtrantes y lámina de cobre con 99,9 % de pureza.

Procedimiento experimental

Acondicionamiento de los aceites vegetales usados:

La muestra de aceite se filtró a través de una malla filtrante, con el fin de eliminar posibles restos de alimentos provenientes del proceso de fritura. Para minimizar el agua presente en la muestra se calentó a 100°C durante 30 minutos; de esta manera puede asegurarse la obtención de un rendimiento adecuado en la reacción de transesterificación /6/.

Determinación de la cantidad de hidróxido a emplear

Cuando el aceite es nuevo - sin cocinar - se necesitan 3,5 gr de NaOH por litro de aceite para catalizar la transesterificación. Pero cuando el aceite es usado se requiere una cantidad superior para neutralizar los ácidos grasos libres que se forman durante el proceso de fritura, los cuales pueden afectar, e inclusive impedir, la transesterificación. Es por ello que el aceite usado fue sometido a una valoración con el propósito de conocer la cantidad necesaria de NaOH en este caso. La técnica experimental seguida se describe a continuación:

Se disolvió 1 g de aceite en 10 mL de alcohol etílico (también puede usarse alcohol isopropílico), se adicionaron 3 gotas de fenolftaleína al 1% y se tituló con disolución de NaOH 0,1 N hasta alcanzar una coloración débilmente rosa, persistente unos 30 segundos.

Cuando se alcanzó esta condición se detuvo el proceso de valoración y se calculó el volumen utilizado de la solución de referencia en mL:

$$(V_f - V_o) = T \quad (1)$$

donde:

V_f : Volumen final en mL

V_o : Volumen inicial en mL

T : Volumen medio de la disolución de referencia en mL

El procedimiento se realizó por triplicado, se obtuvo el valor medio del volumen de referencia, el cual se sustituyó en la ecuación (2) para estimar la cantidad de NaOH requerida para estas condiciones experimentales.

$$x = T + 3,5 \quad (2)$$

Siendo:

X : Cantidad de hidróxido de sodio en g

Elaboración del metóxido

El metóxido es la mezcla del alcohol con el catalizador a utilizar en la reacción de transesterificación. Esta operación se realizó usando un agitador magnético, a temperatura y presión atmosférica en un recipiente limpio y seco. Dado que la humedad y el dióxido de carbono disminuyen la acción del metóxido, se hizo indispensable mantener tapado el recipiente que contiene la mezcla hasta el momento de agregarla en el reactor.

Reacción de transesterificación

Primeramente, se calentó la muestra de aceite hasta alcanzar 50 °C, seguidamente se vertió en reactor de 1000 mL que se encontraba sumergido en un baño termostatado a esa misma temperatura. A continuación, se le añadió cuidadosamente el metóxido agitando para favorecer la homogenización y asegurar un buen rendimiento de la reacción.

La agitación se realizó con un agitador mecánico a una velocidad de 250 min⁻¹ durante 20 minutos, manteniendo la temperatura constante /11/.

Alcanzado el tiempo establecido, se trasvasó la mezcla a un embudo separador y se dejó reposar unas 12 horas aproximadamente, visualizándose inmediatamente la aparición de dos fases (fase de ésteres metílicos y fase de glicerina). Por último, se realizó la separación de ambas fases mediante decantación.

Proceso de lavado

Se realizó el lavado de las muestras de forma estática, utilizando agua corriente en una proporción de 1:1 en volumen con los ésteres. Se realizaron tantos lavados como los necesarios para que el agua desechada alcanzara un PH que pudiera considerarse neutro.

Proceso de secado

Una vez concluida la etapa de lavado, los ésteres metílicos (biocombustible) se secaron mediante calentamiento en una estufa eléctrica a una temperatura de 100°C. Como la turbidez de la muestra es un indicador de la presencia de humedad, este proceso se extendió hasta que los ésteres metílicos se tornaron transparentes.

Propiedades físico-químicas de los ésteres obtenidos

Las propiedades estudiadas y las normas correspondientes se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Propiedades estudiadas

Propiedad	Norma
Presencia de jabón	ASTM D 2986
Presencia de catalizador	ASTM D 6751
Humedad	ISO 662.2001
Viscosidad cinemática	ASTM D 445.2011
Densidad	ASTM D 1298.2009
Corrosión a la lámina de cobre	ASTM D 130
Índice de acidez	AOCS Cd 3 - 63

Propiedades físico-químicas de las mezclas biocombustible–combustible Diesel

El biocombustible puede usarse solo o como una mezcla con combustible Diesel. Las mezclas se clasifican por el porcentaje de biocombustible en la mezcla mediante el llamado "factor B"; así por ejemplo un B20 contiene un 20 por ciento de biocombustible.

Fueron analizadas mezclas de 5 % y 10 % de ésteres metílicos con diesel, dado que los mejores resultados en cuanto a las propiedades de los combustibles, se obtienen a concentraciones bajas de biocombustible /12/.

Resultados y su discusión

Obtención del biocombustible

El ensayo realizado para la determinación de la cantidad de NaOH a utilizar en la reacción, reportó un valor promedio de 5,3 g de NaOH por litro de aceite. La reacción de transesterificación alcanzó un rendimiento promedio de 89,33 %, este valor está en correspondencia con lo reportado en las referencias bibliográficas que para este tipo de aceite que lo sitúa entre 90 y 93%, debido a que el contenido en componentes polares e insaponificables del aceite original

y los producidos en el calentamiento a altas temperaturas en presencia de aire afectan el buen desarrollo de la reacción de transesterificación /13,14/.

Purificación de los ésteres metílicos

Se realizaron cuatro lavados a cada lote de ésteres metílicos. En el primer lavado se formó una capa de pequeño espesor entre el agua y la fase de ésteres metílicos; esta no es más que una emulsión que se crea habitualmente en el primer lavado cuando se combinan el agua, los ésteres metílicos y otras impurezas que actúan como emulsionantes. Este fenómeno aparece en el primer lavado, pues en esta etapa la fase de ésteres se encuentra saturada de contaminantes como glicerina libre, jabón, restos de catalizador y metanol, mono y diglicéridos. Esta emulsión se eliminó junto con la fase pesada mediante decantación para garantizar la continuidad del proceso de lavado.

En los tres lavados siguientes no se detectó la presencia de restos de la emulsión lo que demostró la efectividad de la primera etapa del proceso de lavado. La presencia de la emulsión y la turbidez del agua se pueden apreciar en la Figura1 donde puede observarse como tanto la fase del biocombustible y la del agua se van haciendo cada vez más translúcidas lo que constituye un indicativo de que va alcanzando la purificación requerida.

El control del lavado no solo se realizó visualmente, sino que también se midió sucesivamente el pH de agua residual pues en la medida que este se aproxime más al valor neutro, más eficiente será el lavado.



Fig. 1 Resultados de las cuatro etapas del lavado donde se evidencia la translucidez como indicativo de la purificación lograda.

En la tabla 2 aparecen los resultados del análisis del agua residual.

Tabla 2
Resultados del pH del agua residual. El valor entre
paréntesis representa la desviación estándar
correspondiente

Lavado	pH A 26°C	Observaciones
Primero	9,21 (0,01)	Se aprecia turbidez.
Segundo	7,44 (0,008)	Casi transparente
Tercero	7,28 (0,09)	Transparente
Cuarto	7,24 (0,08)	Transparente

Como puede apreciarse el agua residual puede considerarse prácticamente neutra y no resulta factible consumir agua en esta fase del proceso de purificación.

Una vez concluido el lavado, las muestras se sometieron al proceso de secado. Este proceso constituye una etapa imprescindible en la purificación del biocombustible pues siempre quedan moléculas de agua y de alcohol que deben ser eliminadas mediante la evaporación de las mismas. Para esta operación se utilizó el método del calentamiento simple a 100 °C en una estufa durante 30 minutos; tanto la temperatura como el tiempo han sido avalados por otros investigadores /15/.

Los resultados de las etapas o procedimientos de lavado y secado de por si no permiten asegurar la calidad del biocombustible, por lo que para su definitiva aceptación debe someterse a una serie de análisis físico-químicos y pruebas cuyos resultados deben ser comparados con las normas internacionales vigentes.

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos. Mediante la misma se pueden comparar no solamente con las normas sino también con los reportes de otros investigadores /16, 17/.

Mediante la evaluación se puede apreciar lo siguiente:

- La densidad y el índice de acidez del biocombustible obtenido concuerdan tanto con la norma como con los reportes bibliográficos.
- La viscosidad cinemática se ajusta a la norma, lo que no se cumple para todos los reportes bibliográficos.

- El valor de la humedad está por encima del de la norma y aunque esto sucede también con otros reportes, de aquí se infiere que la etapa de secado debe ser mejorada.
- El contenido de jabón resulta muy satisfactorio en cuanto a la norma.
- Los resultados en cuanto a la corrosión al cobre resultaron excelentes

Del análisis integral de estos atributos se puede concluir que el biocombustible obtenido es perfectamente apto para ser utilizado en motores de combustión interna.

Tabla 3
Comparación de los resultados experimentales con los obtenidos por otros autores.
El valor entre paréntesis representa la desviación estándar correspondiente

Propiedades	Unidades	Resultados experimentales	/18/	/19/	/20/	/21/	/22/	Norma
Densidad a 15°C	g/mL	0,8850 (0,0020)	0,8900	0,8823 - 0,8874	0,8751	0,8850	0,8552	0,8600-0,900 ASTM D 1298
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	5,2210 (0,005424)	3,5400	5,2900	3,6000	7,9320	-	1,9000 - 6,0000 ASTM D 445
Índice de acidez	mg NaOH/g de muestra	0,1696 (0,00856)	0,3800	0,1000	0,2350	0,8000	-	0,8 máximo ASTM D 5751
Humedad	% volumétrico	0,2457 (0,00565)	-	< 0,0050	-	-	0,5070	0,05 máximo ASTM D 42709
Contenido de jabón	ppm	372,1730 (0,001245)	377,50 00	-	-	250,00 00	-	500 máximo ASTM D 2709
Corrosión al cobre (3 h a 50 °C)	grado de corrosión	1a	-	1a	-	1a	1a	1a mínimo - 3 máximo ASTM D 130

Debido a que los volúmenes del biocombustible obtenidos a partir de aceites residuales pueden resultar muy limitados y a algunos inconvenientes del uso de los biocombustibles puros, resulta aconsejable utilizarlos mezclados con combustible Diesel.

En la tabla 4 se muestran los resultados experimentales de los parámetros físico-químicos de las mezclas estudiadas, lo cual facilita su comparación con los establecidos por la norma UNE EN 590 para el combustible Diesel.

Tabla 4
Comparación de las mezclas con el Diesel. El valor entre paréntesis representa la desviación estándar correspondiente

Propiedades	Unidades	B5	B10	Diesel UNE EN 590
Densidad a 15°C	g/mL	0,853 0 (0,002 7)	0,855 0 (0,003 0)	0,882 0 - 0,845 0
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2,565 0 (0,004 426)	2,757 8 (0,005 010)	2,000 0 - 4,500 0
Índice de acidez	mg NaOH/g de muestra	0,077 2 (0,007 96)	0,0950 (0,008 24)	-
Humedad	% volumétrico	0,245 7 (0,005 65)	-	-
Corrosión al cobre (3 h a 50 °C)	grado de corrosión	1a	-	-

De la comparación se puede apreciar que la densidad difiere en menos de 2 % con respecto a lo establecido en la norma y la viscosidad cinemática concuerda de forma excelente con la misma.

El resto de las propiedades, aunque no se especifican para el Diesel, se encuentran todas en los rangos normados para el biocombustible.

Conclusiones

- 1. Se obtuvo un rendimiento promedio para la transformación igual a 89,33 %, este valor está en correspondencia con lo reportado en las referencias bibliográficas para este tipo de aceite.**
- 2. Como el biocombustible tiene que cumplir con estrictas exigencias técnicas y ambientales, así como requisitos de seguridad, sus propiedades fueron evaluadas mediante la comparación con lo que indican las normas ASTM, para establecer la calidad de los biocombustibles.**
- 3. Las propiedades del biocombustible permiten asegurar que el mismo puede ser utilizado como combustible alternativo de equipos Diesel.**
- 4. El valor de la humedad está por encima de la norma y aunque esto sucede también con otros reportes, de aquí se infiere que la etapa de secado debe ser perfeccionada.**

5. **Al igual que con el biocombustible, se realizó la comparación de mezclas B5 y B10 con el combustible Diesel y los resultados coincidieron satisfactoriamente con los señalados por la norma correspondiente.**

Bibliografía

1. DE JUANA, J. *et al.* : “Energías renovables para el desarrollo”. Thomson Editores, Paraninfo S.A., España, 2003, p. 311.
2. KNOTHE, G.; KRAHL, J.; VAN GERPEN, J.: The Biodiesel Handbook. AOCS Press, Champaign Illinois, United States of America, 2005.
3. ZHANG, Y. *et al.*: “Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment” en Bioresource Technology, N° 89, 2003, p. 1-16.
4. ZHANG, Y.: “Biodiesel production from waste cooking oil: 2.Economic assessment and sensitivity analysis” en Bioresource Technology, N° 89, 2003, p. 229-240.
5. GERPEN, M.J. *et al.*: “Biodiesel Processing and Production”, *Fuel Processing Technology*, Vol. 97, 2005, p. 671-678.
6. RAMOS, M.J. *et al.*: “Influence of fatty acid composition of raw material on biodiesel properties” , *Bioresourse Technology*, Vol. 100, 2009, p. 261-268.
7. CASTRO, P. *et al.*: “Producción de biodiésel a pequeña escala a partir de aceites usados en la ciudad de Lima”.Intermediate Technology Development Group (ITDG). Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) de Lima, Perú. 2006.
8. CRESPO, V.; MARTÍNEZ,M.; ARACIL, J.:“Biodiesel: una alternativa real al gasóleo mineral” , Ingeniería Química, Madrid, 2001, p. 135-145.
9. MEHER, S.:“Aspects of biodiesel production by transesterification. A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, p. 248-268.
10. Dermibas, A. “Characterization of biodiesel fuels” , *Energy Sources. Part A*, Vol. 31, 2009, p. 889-896.

11. FUKUDA, H.; KONDO, A.: "Biodiesel fuel production by transesterification of Oils" , *Journal of Bioengineering*, Vol. 95, No.5, 2001, p. 405-416.
12. LAFONT, J.: "Análisis químicos de mezclas Biodiesel de aceite cocinado usado y Diesel por Espectroscopia Infrarroja", *Información Tecnológica*, Vol. 22, No. 4, 2011, p. 35-42.
13. KLEINOVA, K.: "Utilization of used frying oils in FAME production", Proceedings of 44th. International Petroleum Conference, Bratislava, September, 2009.
14. Briggs, M.; Palligarnai, V.: "Biodiesel production-current state of three art and challenges", *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Vol. 35, 2008, p. 421-430.
15. YUSUF, A.: "Alternative Diesel fuels from vegetable oils", *Bioresource Technology*, Vol. 50, 1994, p. 153-163.
16. MURUGESAN, A. *et al.*: "Production and análisis of Biodiesel from non-edible Oils-A review", *Renawable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 4, 2009, p. 825-834.
17. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, P.A. 19428-2959. United States of America.
18. SARMIENTO, R.: "Propiedades físicas y químicas del biodiesel vs Diesel del petróleo" [consultado el 17 de febrero del 2015] www.energiaadebate.com
19. GOUW, T.H.; VLUGTER, J.C.: "Physical properties of fatty acid methyl esters. Density and molar volumen", *Journal American Chemical Society*, Vol. 41, 1964, p. 142-145.
20. FIRESTONE, D.: "Regulation on frying fat and oil. Deep Frying. Chemistry, Nutrition, and Practical Applications". Perkins, E.G. & Rickson, M.D. Editors, AOCS Press, Champaign, Illinois, United States of America, 1996, p. 323-334.
21. ENCINAR, J.M.; GONZÁLEZ J.F.: "Biodiesel from used frying oil. Variables affecting the yields and characteristics of the Biodiesel", *Industrial Engineering Chemistry Research*. Vol. 44, 2005. p. 5491-5499.

22. SHEEHAN J.; CAMOBRECO V.; DUFFIELD J.: “An Overview of biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles”. US Department Energy and US Department Agricultural. Colorado. United States of America. 2005.