

MAURICIO A. SIERRA S.<sup>1</sup> - LEONARDO QUIÑONES CANTOR<sup>2</sup> - ADRIANA MEJÍA TERÁN<sup>3</sup> - YUDTANDULY ACUÑA M.<sup>4</sup>

# Evaluación de ésteres etílicos de aceites usados y aceite de palma como biocombustible

**Recibido:** 5 de febrero de 2014

**Aceptado:** 6 de febrero de 2015

## Resumen

En la obtención de ésteres etílicos se emplean aceites vegetales usados y mezclados con aceite de palma RBD. Este trabajo evalúa la influencia del tratamiento del aceite usado, el empleo de etanol anhidro tipo industrial en diferentes relaciones molares, con KOH y CH<sub>3</sub>ONa como catalizadores, sobre el rendimiento de la reacción. Los mejores resultados se obtienen con una mezcla 80:20 de aceite de palma RBD y aceite gastado sin tratar, relación molar etanol:aceite de 9:1 y 0,5% p/p de CH<sub>3</sub>ONa como catalizador a 60 °C. En el caso de KOH como catalizador, se obtienen rendimientos inferiores, sin embargo, su comportamiento es menos influenciado por cambios en la calidad de las materias primas empleadas.

**Palabras clave:** biodiesel, transesterificación, aceites vegetales, biocombustibles

## Ethyl esters evaluation from used oil and palm oil as a biofuel

## Abstract

Waste vegetable oils and their mixture with RBD palm oil are used to obtain ethylic esters with the purpose of evaluating the influence of treatment of waste vegetable oils, the use of industrial anhydrous ethanol in different molar ratios and the use of KOH and CH<sub>3</sub>ONa as catalyst on the yield of reaction. The best results are obtained using a mixture 80:20 of RBD palm oil and waste vegetable oil without treatment, 9:1 molar ratio of ethanol:oil and 0,5% w. CH<sub>3</sub>ONa as catalyst to 60 °C. The use of KOH as catalyst provides lower yields of reaction; however their behaviour is less influenced by changes in the quality of the raw materials.

**Key words:** Biodiesel, Transesterification, Vegetable oils, Biofuels.

•••••

<sup>1</sup> Ingeniero Químico MSc, Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, Docente coordinador de Investigación programa de Ingeniería Agroindustrial, Bogotá, Colombia. Email: sierra.mauricio@uniagraria.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniero Químico MSc. CORPODIB - Investigador en temas energéticos y ambientales.

<sup>3</sup> Ingeniera Agroindustrial MSc, Fundación Universitaria Agraria de Colombia - UNIAGRARIA, Directora del Programa de Ingeniería Agroindustrial, Bogotá, Colombia.

<sup>4</sup> Ingeniera Biotecnológica MSc, Fundación Universitaria Agraria de Colombia - UNIAGRARIA, Docente Programa de Ingeniería Agroindustrial, Bogotá, Colombia.

## Introducción

El Biodiesel, un biocombustible obtenido por reacción de transesterificación entre un aceite vegetal y un alcohol (Knothe et al., 2005), se presenta como una promisorio alternativa para la disminución del consumo de Diesel, debido a su similitud en propiedades fisicoquímicas como densidad, viscosidad, número de cetano, calor de combustión, entre otros. Además, posee características como baja toxicidad, biodegradabilidad y la posibilidad de reducir la emisión de contaminantes tales como CO, SOx, y material particulado, lo hacen superior a su similar de origen fósil (Suárez, 2003).

La obtención de ésteres etílicos a partir de aceites vegetales gastados (AVG) en mezcla con aceite de palma RBD (refinado, blanqueado y desodorizado) y etanol, para ser usados como combustibles en motores tipo Diesel, supone tres ventajas adicionales: i) materia prima de bajo costo, ii) establece una alternativa para la disposición final de los aceites usados provenientes de la industria de alimentos, que en la actualidad son reciclados para fabricar jabones de baja calidad, alimento para animales, vertidos al alcantarillado o, reutilizados en puestos de comidas rápidas, representando un gran riesgo para la salud de los consumidores y iii) con el uso de etanol, las materias primas son de origen 100% renovable,

lo cual garantiza un ciclo cerrado del carbono y una reducción neta de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (May et al., 1995).

## Marco conceptual

El Biodiesel es un derivado de los aceites vegetales, obtenido por alcoholisis (transesterificación), con alcoholes de bajo peso molecular. La transesterificación se lleva a cabo usualmente en fase líquida y uno de los reactantes es parcialmente soluble y se disuelve poco a poco al progresar la reacción (el aceite es parcialmente soluble en etanol).

La reacción es reversible, por tanto, para lograr altas conversiones se suele trabajar con exceso de alcohol a la temperatura de burbuja de la mezcla y catalizadores de naturaleza básica, ácida o enzimática (Ullman, 1969). Otros procesos que no incluyen catalizadores son la transesterificación a 250 °C y alta presión y la transesterificación con metanol supercrítico, que requiere una relación molar 42:1 alcohol:aceite con tiempos de reacción de 6 min. (Schuchardt et al., 1998).

Los catalizadores ácidos son efectivo, pero, requieren un tiempo de reacción prolongado y temperaturas superiores a 100 °C para su acción. Se usan en transesterificación cuando los aceites poseen grados de acidez muy altos, que perjudican la acción de los catalizadores básicos. Se emplea

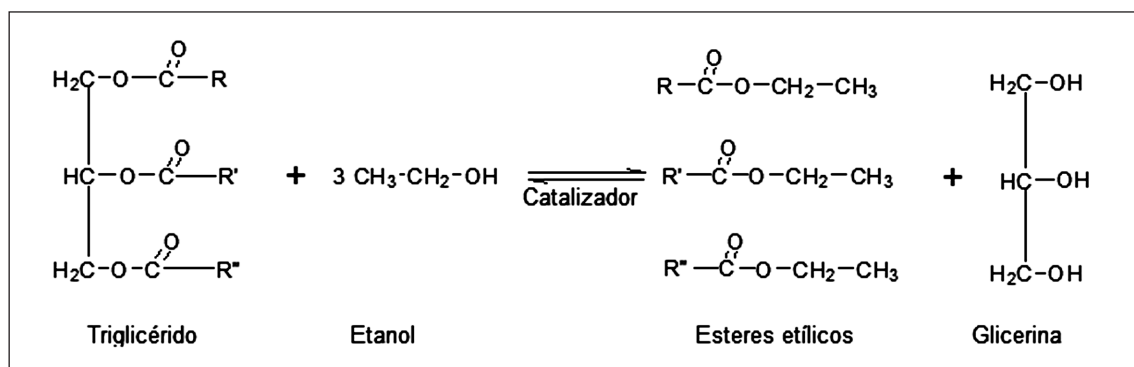


Figura 1. Reacción de transesterificación para obtener ésteres etílicos

Fuente: Elaboración propia, 2014.

Tabla 1. Arreglo experimental.

Relación molar etanol: aceite	Catalizador (Cantidad % p, aceite) /Temperatura (°C) / Aceite					
	KOH (1.5 %)			CH <sub>3</sub> ONa (0.5%)		
	Ebullición (76 °C)			60 °C		
9:1	(1) MGP20	(2) AGB	(3) AGST	(7) MGP20	(8) AGB	(9) AGST
15:1	(4) MGP20	(5) AGB	(6) AGST	(10) MGP20	(11) AGB	(12) AGST

Fuente: Elaboración propia, 2014.

ácido sulfúrico, clorhídrico, sulfónico y catalizadores heterogéneos (Khan, 2002).

Los catalizadores básicos son los más usados, siendo el KOH, NaOH, carbonatos de sodio y potasio, así como los alcóxidos metálicos (metilato, etilato, de sodio o potasio), los más estudiados, pues son económicos y dan buenos resultados, siempre y cuando, el contenido de agua en el medio de reacción sea mínimo y la acidez sea cercana a 1 %, con el fin de evitar la formación de jabones y geles que inhiben la capacidad catalítica de las bases y evitan la separación de la glicerina (Darnoko, 2000). El KOH y NaOH se emplean en proporciones que oscilan entre 0,5 y 1,5 % p/p del aceite; para los alcóxidos metálicos se recomiendan valores entre 0,3 y 0,5 % p/p con respecto al aceite (Fillieres, 1995).

## Metodología experimental

El desarrollo experimental contempla la obtención de ésteres etílicos a partir de aceites vegetales gastados y su mezcla con aceite de palma refinado, blanqueado y desodorizado (RBD), mediante transesterificación con etanol, empleando catalizadores básicos como hidróxido de potasio (KOH) y metilato de sodio (CH<sub>3</sub>ONa). Se estudian los efectos del tipo de aceite y su grado de tratamiento, el tipo de catalizador, así como la relación molar etanol:aceite sobre el rendimiento de la reacción.

## Materias primas

Todos los reactivos empleados en la fase de experimentación con propósitos de análisis o caracterización de materias primas son grado analítico. Se emplean: hidróxido de potasio, yoduro de potasio, etanol anhidro, ácido acético, metilato de sodio, tiosulfato de sodio, dietileter, ácido peryódico, ácido cítrico m-hidratado, cloroformo y hexanos.

El aceite de palma RBD es suministrado por Acegrasas S.A., el aceite vegetal gastado compuesto por aceite de soya y oleína de palma (relación 70:30 p/p), es recolectado de diversos puntos de la cadena de restaurantes Kentucky Fried Chicken®; la mezcla entre estos dos aceites se realiza en el laboratorio. El etanol empleado en la transesterificación es anhidro tipo industrial, suministrado por Quisol S.A., el KOH y CH<sub>3</sub>ONa son grado analítico.

## Definición de variables y arreglo experimental

De acuerdo con los ensayos preliminares realizados y las variables a estudiar, se establece el valor de de los niveles correspondientes a cada una de estas. El arreglo consiste en un diseño experimental 2<sup>K</sup>, en el cual se estudian las interacciones de cada variable y se muestra en la tabla 1.

AGST es aceite gastado sin tratar, AGB es aceite gastado blanqueado y MPG20 es mezcla

de palma RBD y AGST en proporción 80:20. Los números en paréntesis indican el orden en que se realizan los ensayos.

## Métodos

### Adecuación del aceite gastado

El aceite vegetal gastado (AVG), se filtra a 60 °C con un filtro tipo industrial para retirar restos de comida y sustancias carbonáceas, luego es calentado a 120 °C para retirar la humedad presente, obteniéndose así el AGST. Como tratamiento se establece el blanqueamiento, para ello, se emplea una mezcla de materiales absorbentes como arcillas y carbón activado, tonsil actisil® 220FF y Trisyl® 615 en proporción 69:5:24:2 a 100 °C. El grado de blanqueamiento se determina midiendo la transmitancia en un espectrómetro de luz a 580 nm y 40 °C tomando como patrón de transmitancia a 0 % el AGST y para el 100 % aceite puro (mezcla de aceite de soya y oleína de palma en relación 70:30 p/p). El AGST se somete a blanqueamiento hasta obtener una transmitancia de 76 %.

### Transesterificación

La reacción se realiza en un reactor de cuatro bocas de 500 ml con 4 deflectores y agitación mecánica. El sistema de reacción está conectado a un baño térmico con solución de etilenglicol-agua que mantiene su temperatura constante y un sistema de condensación para retornar el alcohol evaporado.

La reacción se efectúa por 2 horas, con 200 g de aceite de  $PM = 841$  g/mol, con exceso de alcohol y catalizador según lo requerido en el arreglo experimental y con una velocidad de agitación de 700 RPM. El aceite se precalienta en el reactor a 60 °C o 70 °C dependiendo del catalizador, el cual se solubiliza por aparte en etanol justo antes de la reacción para evitar la hidratación de este último (Freedman, 1984), luego, se vierte al re-

actor y se eleva la temperatura hasta la requerida para la experimentación.

Al finalizar la reacción ocurre una separación de fases, en la que, la liviana corresponde a ésteres etílico  $PM = 291,7$  g/mol, y la pesada a glicerina. Dado que el etanol en exceso interfiere con el proceso de separación, se retira por destilación hasta 100 °C. Posteriormente a la separación de fases por decantación, que dura de 5 a 10 horas, se retira el producto y se lava tres veces con una solución de ácido cítrico al 0,05-0,01 % en agua; en cada lavado se emplea 50 % de solución con respecto al biodiesel.

### Procedimiento de análisis

El rendimiento de la reacción se cuantifica de dos maneras: i) Pesando los ésteres etílicos obtenidos para establecer el rendimiento con respecto al estequiométrico y ii) determinando por titulación la glicerina (G) y los  $\alpha$ -monoglicéridos ( $\alpha$ -MG) liberados en la reacción, esto permite estimar mediante balances de materia la producción de ésteres etílicos (EE) mediante la ecuación 1, para posteriormente calcular el rendimiento estequiométrico, que para ambos casos está dado por la ecuación 2.

$$m_{EE} = 3(\eta_{Gm} \overline{PM}_{EE}) + 2(\eta_{MGm} \overline{PM}_{MG}) \quad \text{Ec. 1}$$

$$\% \text{Rendimiento}_{EE} = \frac{m_{EE}}{(3(\eta_{GTA} - \eta_{GLa}) \overline{PM}_{EE})} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $m$  es la masa,  $\eta$  el número de moles,  $PM$  el peso molecular,  $Gm$  la glicerina titulada en la muestra,  $MGm$  los momoglicéridos titulados en la muestra,  $GLa$  la glicerina libre en el aceite. La glicerina se determina mediante la norma AOCS Ca 14-56 y los  $\alpha$ -MG mediante la norma AOCS Cd 14-57. Aquí no es posible determinar el contenido de MG totales; sin embargo, pueden estimarse si se tiene en cuenta que los  $\alpha$ -MG y  $\beta$ -MG, establecen un equilibrio en

el que usualmente los  $\beta$ -MG = 0,15 $\alpha$ -MG. Debido a la imposibilidad de titular los diglicéridos y triglicéridos (DG yTG), se toman en conjunto como materia que no reaccionó.

El Biodiesel obtenido es sometido a los análisis típicos para combustibles tipo diesel bajo las normas ASTM y específicos para el biodiesel (acidez, glicerina, MG) realizados bajo las normas AOCS.

## Resultados y análisis

Las características básicas determinadas en laboratorio para los aceites empleados en los ensayos se muestran en la tabla 2.

### Rendimiento de reacción

Los resultados de la experimentación final establecida, se muestran en la tabla 3.

### Efectos del procedimiento

La comparación de los rendimientos obtenidos por titulación y por peso de EE separados por decantación, revela que este tipo de separación es ineficiente, pues en promedio para los ensayos, se pierde 11,4 % de producto. Los rendimientos obtenidos por titulación no contemplan el Biodiesel obtenido a partir de los DG en la masa

reactante, esto quiere decir que, los rendimientos pueden ser superiores a los reportados en el desarrollo experimental.

### Efecto de la relación molar etanol: aceite

En general, en los dos catalizadores empleados, se observa un efecto positivo sobre el rendimiento de la reacción al aumentar la relación molar etanol:aceite.

Al analizar el rendimiento de la reacción por separación de EE mediante decantación, se observa un leve efecto positivo empleando AGB o MPG20 y es más notorio al emplear AGST. Se debe tener en cuenta que la presencia de sustancias como dímeros, polímeros hidroperóxidos pueden formar interferentes o actuar como tales y los ácidos grasos libres (AGL) presentes en el aceite, pueden formar jabones o producir agua durante la reacción. Todas estas sustancias pueden actuar como emulsificantes que dificultan los procesos de separación de los EE, por tanto, el efecto positivo, en especial para el AGST, cuyo contenido de sustancias es mayor, puede atribuirse a la disminución en la concentración de las mismas, conforme aumenta el contenido de etanol en la mezcla reactante y el desplazamiento del equilibrio a la derecha por el principio de Le Chatelier.

Tabla 2. Características de los aceites empleados.

Propiedad	Método	AGST	AGB	MGP20
Acidez total (% A. Oleico)	NE 55.012	4.94	4.16	1.14
Valor ácido (mg KOH/g Aceite)	NE 55.011	9.82	8.27	2.27
Humedad y volátiles (% w)	NE 55.020	0.041	0.027	0.015
Glicerol total (% w)	AOCS Ca 14-56	10.42	9.70	11.01
Glicerol libre (% w)	AOCS Ca 14-56	0.04	0.11	0.03
Transmitancia (a 580 nm)	***	0	76	79

Fuente: Elaboración propia, 2014

Tabla 3. Rendimiento en producción de ésteres etílicos.

Ensayo	Relación molar EtOH	Aceite	Rendimiento de E.E. por peso (%)	Rendimiento de E.E. por titulación (%)	Condiciones de reacción
1	15:1	MGP20	82,7	91,5	KOH 1,5 % p Etanol 99,75 % T 76 °C Tiempo = 2 h
2		AGB	71,9	81,9	
3		AGST	75,5	84,7	
4	9:1	MGP20	81,3	90,4	
5		AGB	71,7	80,5	
6		AGST	66,5	83,8	
7	15:1	MGP20	86,7	96,9	CH <sub>3</sub> ONa 0,5 % p Etanol 99,75 % T = 60 °C Tiempo = 2 h
8		AGB	***	***	
9		AGST	***	***	
10	9:1	MGP20	78,6	96,3	
11		AGB	***	***	
12		AGST	***	***	

Fuente: Elaboración propia, 2014.

Al observar los resultados por titulación, los leves incrementos en el rendimiento muestran que no es justificable el empleo de relaciones molares etanol:aceite tan altas como 15:1, pues se aumenta tiempo de proceso y los costos al tener que separar una mayor cantidad de etanol por destilación para favorecer la separación de productos una vez terminada la reacción. Por tanto, es mejor controlar otros aspectos como la calidad de las materias primas o el proceso de separación.

### Efecto de la calidad del aceite

El blanqueamiento del aceite no tiene efecto positivo sobre el rendimiento de la reacción, al contrario, representa una disminución con respecto al AGST. Es posible que esto ocurra debido a que el blanqueo de aceites gastados a alta temperatura, con arcillas activadas y en presencia de oxígeno favorezca la producción de una mayor cantidad

de AGL, hidroperóxidos, monómeros y dímeros que interfieren en el desarrollo de la reacción (Van den Bosch, 1973).

La comparación entre los resultados obtenidos para KOH y CH<sub>3</sub>ONa con los diferentes tipos de aceites, muestra la marcada influencia que tiene la calidad del aceite con respecto a la acidez libre y la humedad, en el rendimiento de la reacción. Los mayores rendimientos obtenidos para MPG20 frente a AGST y AGB (muy similares estos dos), puede deberse principalmente al menor contenido de AGL en el primero, lo cual disminuye la formación de agua producto de su esterificación, teniendo en cuenta que pequeñas concentraciones de agua inactivan la acción catalítica del KOH y el CH<sub>3</sub>ONa.

Se ha reportado que el empleo de aceites con alto contenido de AGL (mayores a 0,5 %), puede ocasionar incrementos en la viscosidad de la mezcla reactante, formación de geles, dificultad en la separación de productos o el fallo de la reacción

Tabla 4. Caracterización de los ésteres etílicos obtenidos.

Propiedad	Ensayo							
	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 10
Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	863,8	864,1	868,6	866,5	868,36	870,18	870,7	865,3
Viscosidad (mm <sup>2</sup> /s) <sup>b</sup>	5,13	5,10	5,17	4,99	5,14	5,40	5,11	5,13
Carbón Conradson (% p) <sup>c</sup>	0,057	0,058	0,069	0,059	0,06	0,070	0,055	0,055
Agua (% p/p) <sup>d</sup>	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Cenizas (% p/p) <sup>e</sup>	0,0338	0,0353	0,0378	0,0379	0,04	0,0336	0,0339	0,0339
Valor ácido (mg KOH/g) <sup>f</sup>	0,279	0,323	0,366	0,287	0,29	0,383	0,251	0,254
Calor combustión (kJ/kg) <sup>g</sup>	41035	41631	38943	41268	40658	40048	40719	40217
Flash Point (°C) <sup>h</sup>	166	166	169	166	168,50	165	168	164
Fire Point (°C) <sup>i</sup>	184	186	188	186	186,00	186	188	186
Cloud Point (°C) <sup>j</sup>	9,36	7,0	6,75	9,76	8,47	7,18	9,94	10,3
Corrosión al cobre <sup>k</sup>	1 a	1 a	1 a	1 a	0,04	1 a	1 a	1 a
Glicerina libre (% p) <sup>l</sup>	0,05	0,03	0,03	0,04	0,08	0,04	0,13	0,13
Glicerina total (% p) <sup>m</sup>	0,70	0,75	0,64	0,60	0,60	0,60	0,66	0,63
M-Gliceridos (% p) <sup>n</sup>	1,93	2,00	2,56	2,00	2,51	2,61	2,46	2,51

a. AOCs Cc10a-25 @ 20, b. ASTM D445, c. ASTM D189, d. ASTM D1774, e. ASTM D482, f. NE 55.011, g. ASTM D240, h. ASTM D 92, i. ASTM D92, j. ASTM D2500, k. ASTM D130, l. y m. AOCs Ca14-56, m., n. AOCs Cd14-57.

(8). El empleo de AGST, AGB y MPG20 supone por tanto un descenso en el rendimiento y separación de EE frente a aceites puros (rendimiento de 97-99 %), sin embargo, se observa que es posible emplear aceites con alta acidez, siempre y cuando la temperatura, relación molar de etanol, el tipo y cantidad de catalizador sean los apropiados.

### Efecto del catalizador

El desempeño del CH<sub>3</sub>ONa depende en gran parte de la calidad de las materias primas. La comparación de su desempeño con aceites

de baja calidad como los usados en los ensayos 8,9,11,12 (AGST y AGB), frente al aceite empleado en los ensayos 7 y 10 (MGP20), revela una alta sensibilidad en el comportamiento catalítico del CH<sub>3</sub>ONa ante contenidos elevados de AGL, agua, peróxidos, polímeros y otros materiales de degradación en los AVG.

Comparando los resultados obtenidos con ambos catalizadores empleando aceite MPG20, puede observarse que, el CH<sub>3</sub>ONa es mucho más efectivo como catalizador frente al KOH, debido probablemente a que los interferentes se encuentran en menor proporción en este tipo de

aceite, permitiendo una mayor actividad catalítica y menores tasas de inactivación del  $\text{CH}_3\text{ONa}$ .

El KOH es mucho más estable que el  $\text{CH}_3\text{O-Na}$  y puede emplearse con AVG de inferior calidad, no obstante, esto también implica un descenso en la obtención de EE, ya que también se ve afectado por las condiciones descritas en los párrafos anteriores.

### Caracterización

La caracterización de muestras, de acuerdo con los ensayos establecidos en el arreglo experimental se encuentra en la tabla 4.

Frente a la norma ASTM D6751 y DIN EN 14214 para biodiesel y la normatividad nacional para diesel se puede realizar el siguiente análisis:

La densidad se encuentra dentro de los límites establecidos por las normas DIN y ASTM para biodiesel, pero es ligeramente superior a la del diesel. La viscosidad es superior a la establecida por las normas DIN, pero, se encuentra dentro de los límites determinados por las normas ASTM; la diferencia se debe básicamente al tipo de aceite empleado en la obtención de los ésteres.

El producto del ensayo 6 tiene una viscosidad mucho mayor que el resto de experimentos, esto se puede atribuir a su mayor contenido de MG y AGL, la presencia de gomas o polímeros que intervienen en la reacción al emplear AGST y una menor relación molar etanol: aceite.

Los residuos de carbón se encuentran fuera de los límites establecidos por las normas DIN y ASTM, esto probablemente se debe a la presencia de materiales poliméricos y otros residuos presentes en el AVG empleado como materia prima y al mayor contenido de G y MG en el producto final.

Características tales como contenido de agua, acidez libre, *flash* y *Fire Point*, se encuentran dentro de los estándares internacionales. Frente al diesel colombiano, el *flash* y *Fire Point* son superiores, lo que ofrece ventajas para su manipulación y transporte.

La prueba de corrosión en lámina de cobre muestra que el nivel de corrosión es muy inferior, si se compara con lo fijado por la norma ASTM para el diesel colombiano, pero se encuentra dentro de los límites según lo estipulado por la norma DIN.

El contenido de G y MG es superior al establecido por las normas internacionales, esto puede obedecer a una reacción incompleta y/o a deficiencias en la purificación de los EE.

### Conclusiones

El blanqueamiento parcial de aceites gastados no tiene un efecto significativo sobre el rendimiento de la reacción; este procedimiento conlleva a pérdidas de aceite del orden de 10 % y un uso adicional de materias primas, por tanto, no se justifica su implementación. Es mucho más relevante el control de la acidez como parámetro de calidad para los AVG.

El  $\text{CH}_3\text{ONa}$  es más sensible respecto a la calidad del aceite a emplear, no obstante, cuando esta es adecuada, ofrece mejores rendimientos que el KOH.

El KOH comprueba ser un catalizador versátil y de comportamiento más estable frente a variaciones en la calidad de los reactivos y condiciones de reacción.

La caracterización de productos muestra que los ésteres obtenidos a partir de aceites vegetales gastados y su mezcla con aceite de palma RDB, en general, cumplen con las normas establecidas, pero deben evaluarse nuevos métodos para aumentar los rendimientos de reacción y su posterior purificación.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIA-GRARIA, la Universidad Nacional de Colombia, SENA y la Corporación para el Desarrollo Industrial para la Biotecnología – CORPODIB.



## Referencias bibliográficas

- Darnoko, D., & Cheryan, M. (2000). Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 77(12), 1263-1268.
- Fillieres, R. (1995). Ethanolysis of rapeseed oil: Quantitation of ethyl esters, mono, di and triglycerides and glycerol by high performance size exclusion chromatography. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 75(4), 427-431.
- Freedman, B. (1984). Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 61(10), 1538-1543.
- Knothe, G., Krahl, J., & Van Gerpen, J. (eds.) (2005). *The biodiesel handbook*. Champaign: AOCS.
- Khan, A. (2002). *Research into biodiesel kinetics and catalyst development*. Queensland: Universidad de Queensland, Departamento de Ingeniería Química.
- May, C.Y., Ngan, M., & Basiron, Y. (1995). Production and evaluation of palm oil methyl esters as diesel substitute. *Elaeis Special Issue Malaysia*, 15-25.
- Schuchardt, U., Sercheli, R., & Matheus, R. (1998). Transesterification of vegetable oils; a review. *Journal of Brazilian oil Chemists Society*, 9(1), 199-209.
- Suárez, O. (2003). *Factibilidad técnico económica para el montaje de una planta de biodiesel a partir de aceite de palma*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- Ullman, F. (1969). *Enciclopedia de química industrial* (2º ed.). Barcelona: Gustavo Gili, 222-225.
- Van den Bosch, G. (1973). Bleaching of vegetable oils: I y II conversions in soybean oil, triolein and trilinolein. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 50(11), 421-423, 487-493.