

Obtención de biodiesel a partir de aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.). Aplicación del método de ruta ascendente

Biodiesel production from crude palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq.). Ascending path method application

María del Consuelo Ortiz Tapia*^o, Pedro García Alamilla*, Laura Mercedes Lagunes Gálvez*,
María Isabel Arregoitia Quezada**, Ricardo García Alamilla**, María Alejandra León Chávez***

RESUMEN

La transesterificación de aceites vegetales para biodiesel es una alternativa para la sustitución de combustibles fósiles. Por ello, la producción a partir de aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.) es una opción, sin embargo, requiere explorar las condiciones del proceso. Así, nuestro objetivo fue evaluar las variables que influyen en el rendimiento del biodiesel partiendo de aceite crudo de palma e implementar la metodología de ruta ascendente. La transesterificación del aceite crudo de palma con metanol se llevó a cabo por 2 h, en un reactor por lotes utilizando como catalizador hidróxido de sodio (NaOH). Los factores fueron la relación molar metanol-aceite (RMA) (5-8:1), concentración del catalizador (0.8% - 2%) y temperatura (50 °C - 70 °C), empleando un diseño factorial 2³ con puntos centrales. El factor significativo fue la concentración de catalizador ($p < 0.01$). El método de ruta ascendente permitió maximizar el rendimiento a 98.45% con RMA de 6.7:1, concentración de NaOH de 0.75% y 58 °C.

ABSTRACT

Transesterification from vegetable oils to biodiesel is an alternative to substitute fossil fuels. Production of biodiesel from crude palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq.) is an option, nevertheless, it needs to explore process conditions. Our objective was to evaluate variables that influence in output of biodiesel from crude palm oil and to implement the method of ascending path. Transesterification of crude palm oil with methanol was performed for 2 h in a batch reactor with sodium hydroxide as catalyst (NaOH) and stirring speed of 2000 rpm. Factors studied were methanol-oil molar ratio (RMA) (5-8:1), catalyst concentration (0.8% - 2%) and reaction temperature (50 °C - 70°C), using a factorial design 2³ with central points. Catalyst concentration was the significant factor ($p < 0.01$). Ascending route method allowed maximize performance of 98.45% biodiesel crude with RMA of 6.7:1, NaOH concentration of 0.75% and temperature 58 °C.

Recibido: 29 de julio de 2015
Aceptado: 25 de julio de 2016

Palabras clave:

Diseño factorial; transesterificación;
concentración de NaOH; optimización.

Keywords:

Factorial design; transesterification; NaOH
concentration; optimization.

Cómo citar:

Ortiz Tapia, M. del C., García Alamilla, P., Lagunes Gálvez, L. M., Arregoitia Quezada, M. I., García Alamilla, R., & León Chávez, M. A. (2016). Obtención de biodiesel a partir de aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.). Aplicación del método de ruta ascendente. *Acta Universitaria*, 26(5), 3-10. doi: 10.15174/au.2016.910

INTRODUCCIÓN

El uso de la energía se ha convertido en requisito básico para la subsistencia humana, y los combustibles a base de petróleo siguen siendo la fuente principal de energía empleada a nivel global (Muhammad, Muhammad, Asif & Muhammad, 2012). Sin embargo, el mundo se enfrenta al agotamiento de los combustibles fósiles y a la destrucción del medio ambiente (Haitang, Junhua, Qin, Jilu & Jianan, 2013; Hui, Lingyan, Yong & Lubin, 2012; Indra, Prabowo, Ayucitra, Edi & Ismadji, 2013). Esto ha originado la búsqueda de fuentes alternas de energía, resultando el biodiesel una de las opciones exploradas debido a sus beneficios ambientales: capacidad de renovación, degradación y no toxicidad (Hui *et al.*, 2012; Olutoye & Hameed, 2013).

* División Académica de Ciencias Agropecuarias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Teapa km. 25 Ra, La Huasteca, Villahermosa, Tabasco, México, C.P. 86280. Tel: +52 (993) 3581500 ext 6630. E-mail: pedro.garciaa@ujat.mx; shish_kko@yahoo.com.mx

** Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz, Col. Los Mangos, Ciudad Madero, Tamaulipas, México, C.P. 89440. Tel.: (993) 3581500, ext. 6630.

*** Instituto Tecnológico Superior de la Región Sierra. Carretera Teapa-Tacotalpa km. 4.5, Eje Fco. Javier Mina, Teapa, Tabasco, México, C.P. 86801.

^o Autor de correspondencia.

El *biodiesel* es definido como un combustible conformado por monoalquilésteres de ácidos grasos de cadena larga, derivados de aceites vegetales o grasas animales. El método más extendido para producirlo es la transesterificación, que consiste en hacer reaccionar los triglicéridos de las grasas y aceites naturales con un alcohol para producir ésteres (Ching, Chien, Dang & Jo, 2012; Haitang *et al.*, 2013; Olutoye & Hameed, 2013). La estequiometría de la reacción requiere de un mol de triglicérido por tres moles de alcohol; no obstante, se utiliza exceso de alcohol con el objetivo de aumentar el rendimiento del biodiesel y permitir la separación de fases (Refaat, Attia, Sibak, Shelrawy & Eldiwani, 2008). A nivel industrial, el alcohol más utilizado es el metanol, pero también pueden emplearse otros alcoholes de cadena corta como el etanol (Haitang *et al.*, 2013). Además, esta reacción puede ser catalizada por ácidos, bases o enzimas. Los catalizadores homogéneos, como hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio (NaOH) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), son utilizados industrialmente en la producción de biodiesel debido a su alta actividad en reacción, bajo costo, disponibilidad y moderadas condiciones de operación (Melero, Bautista, Iglesias, Morales & Sánchez, 2012; Quintella *et al.*, 2012).

Las variables con mayor consideración en la reacción de transesterificación son: la relación molar alcohol/aceite, porcentaje de catalizador y la temperatura, siendo su efecto evaluado mediante estudios cinéticos y pocos utilizando diseños estadísticos. La relación molar alcohol/aceite varía desde 0.1:1 – 24:1. La concentración del catalizador varía desde 0.25% – 6% en peso con respecto al aceite. Las temperaturas encontradas en su mayoría se fijan en 60 °C, pero los intervalos están entre 37 °C – 75 °C. Los estudios en su totalidad se enfocan en reacciones controladas en laboratorio en reactores por lotes con pequeños volúmenes de reacción (500 mL – 3 L) (Alamu, Waheed & Jekayinfa, 2008; Benjumea, Agudelo & Cano, 2004; Chongkhong, Tongurai, Chetpattananondh & Bunyakan, 2007; Meher, Dharmagadda & Naik, 2006; Muhammad *et al.*, 2012; Puhan, Vedaraman, Ram, Sankarnarayanan & Jeychandran, 2005).

Se han empleado diversos aceites vegetales como materia prima para la producción de biodiesel, entre los cuales destacan el ricino, la jatropha, el aguacate, la palma, la soya, el girasol, entre otros (Olutoye & Hameed, 2013). Sin embargo, el aceite de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.) presenta un rendimiento de 5000 kg aceite/ha año, por lo que es el cultivo oleaginoso con mayor eficiencia, y su demanda aumenta con mercados potenciales como China e Indonesia (Aceves *et al.*, 2008).

El aceite de palma es uno de los principales aceites que se comercializan en el mundo, y es más barato que el aceite de canola, de soya o de colza. Esta ventaja permitiría reducir el costo de la producción de biodiesel y, por tanto, ser una opción viable para la sustitución de diesel (Gao, Teng, Xiao & Wei, 2010). Los estudios sobre producción de biodiesel a partir de aceite crudo o refinado de palma se han incrementado en los últimos años, utilizando diferentes tecnologías o métodos. Las propuestas en la literatura permiten identificar procesos en dos etapas para convertir los ácidos grasos libres a ésteres en la primera etapa, catálisis heterogénea, líquidos iónicos como pretratamiento, energía ultrasónica, pirolisis, tecnología enzimática, condiciones supercríticas (Avhad & Marchetti, 2015; Cukalovic *et al.*, 2013; Ong, Mahlia, Masjuki & Norhasyima, 2011; Tat-Tan, Teong-Lee & Rahman-Mohamed, 2009). Sin embargo, todos estos procesos son difíciles de implementar bajo condiciones tecnológicas inmediatas (Cukalovic *et al.*, 2013). Los métodos descritos son esenciales para explorar otras alternativas, como el uso de las reacciones de transesterificación de metanol supercrítico no catalítico, pero a elevadas temperaturas, presiones y relaciones molares alcohol/aceite siguen siendo sus principales desventajas (Biktashev *et al.*, 2011; Tat-Tan *et al.*, 2009).

Lo antes descrito permite establecer que el actual estatus de conocimiento sugiere que la reacción de transesterificación es difícil de generalizar y debe ser analizada caso por caso. Por ello, la finalidad de este trabajo fue evaluar las variables que influyen en el rendimiento del biodiesel a partir de aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.), como son la concentración de catalizador (NaOH), la relación molar metanol-aceite (RMA) y la temperatura del medio de reacción. Para lograr el objetivo se propuso un diseño factorial 2^3 con seis puntos centrales, que permitió estudiar el efecto de cada factor sobre la variable de respuesta (rendimiento de biodiesel crudo), así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable, además de implementar la metodología de ruta ascendente para encontrar los valores óptimos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material experimental

La reacción de transesterificación se llevó a cabo utilizando aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.), adquirido en la empresa Agroindustrias de Palenque,

S. A. de C. V. (Agroipsa), en Jalapa, Tabasco, México. El alcohol seleccionado como reactivo fue metanol anhidro (99.98%) marca Baker y como catalizador hidróxido de sodio (MACRON FINE CHEMICALSTM).

Equipo experimental

La reacción se efectuó en un matraz de vidrio esférico de tres bocas con capacidad de 2 L colocado sobre una manta de calentamiento (Thermo SCIENTIFIC®), controlando la temperatura mediante un regulador de frecuencia (STACO ENERGY PRODUCTS CO.®). En la primera boca se instaló un condensador tipo rosario, en la segunda se montó una varilla de teflón con aletas abatibles agitada por un motor de laboratorio (TALBOYS LABORATORY STIRRER) y en la tercera se adaptó un termopar con una unidad de registro Hanna Instrument (HI 91610C).

El aceite se calentó previamente para mezclar las fases (oleína y estearina) que se encuentran separadas a temperatura ambiente. En el reactor de vidrio fueron adicionados el aceite crudo de palma, el metanol y el catalizador. Las relaciones molares metanol-aceite estuvieron en un intervalo de 5 – 8:1, la concentración del catalizador fue de 0.8% – 2% y la temperatura de la mezcla de reacción de 50 °C – 70 °C. El tiempo de reacción se mantuvo constante (2 h), al igual que la velocidad de agitación (2000 rpm). La mezcla obtenida se colocó en un embudo para facilitar la separación de las fases de biodiesel crudo (metil ésteres) y glicerol, las cuales se cuantificaron a las 24 h.

Determinación de ácidos grasos libres

La determinación de ácidos grasos libres en el aceite se realizó acorde con el método oficial A.O.C.S 2000 (5ª – 40) (*American Oil Chemists' Society* [AOCS], 2000). Este método determina los ácidos grasos libres existentes en la muestra.

Caracterización del aceite crudo de palma por análisis termogravimétrico (TG)

La muestra se analizó en una balanza termogravimétrica TA-Instruments STD 2960 *Simultaneous* DSC-TGA, en el intervalo de temperatura ambiente hasta 700 °C con una velocidad de calentamiento de 5 °C min⁻¹ y usando un flujo de nitrógeno de 30 ml min⁻¹.

Caracterización por espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

En la caracterización por FT-IR se utilizó un equipo *Perkin Elmer* modelo *Spectrum One*, empleando un ATR de diamante controlado por *software* para *Windows*®. Las muestras de aceite crudo de palma y biodiesel crudo fueron analizadas en la región de 4000 cm⁻¹ – 400 cm⁻¹ con 16 scans por espectro y resolución de 4 cm⁻¹. Los datos de los espectros fueron exportados en formato ASCII y analizados utilizando *Originpro7*.

Diseño experimental

En función de los tres factores (variables independientes) y sus niveles, se aplicó un diseño experimental que consistió en un diseño factorial 2³ con seis puntos centrales. Este tipo de diseño fue la base para evaluar, analizar e interpretar los datos experimentales y determinar los efectos significativos de las variables independientes durante la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma. Así, también permite encontrar la presencia de curvatura en la respuesta de estudio (porcentaje de rendimiento). La tabla 1 muestra las variables codificadas y los niveles empleados.

La matriz de resultados obtenida a partir del diseño experimental se analizó en *StatGraphics* Centurion Versión XVI, y el ajuste se llevó a cabo con una ecuación polinomial de primer orden con términos de interacción:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon_i \quad (1)$$

Donde Y es la respuesta, X_i, X_{ij} las variables independientes y su interacción, β₀ es el coeficiente constante, β_i, y β_{ij} son los coeficientes lineales y de interacción, respectivamente, que evalúan los efectos. El modelo empleado se utilizó para evaluar el rendimiento, aplicando análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 1.
Variables independientes en el diseño.

Variables independientes	Símbolo	Código		
		-1	0	1
Relación molar metanol/aceite de palma	X ₁	5	6.5	8
Concentración de catalizador NaOH	X ₂	0.8	1.4	2
Temperatura (°C)	X ₃	50	60	70

Fuente: Elaboración propia.

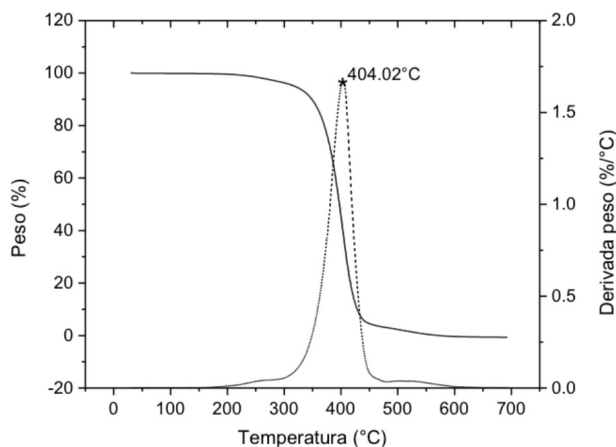


Figura 1. TG-DTA de aceite crudo de palma.
Fuente: Elaboración propia.

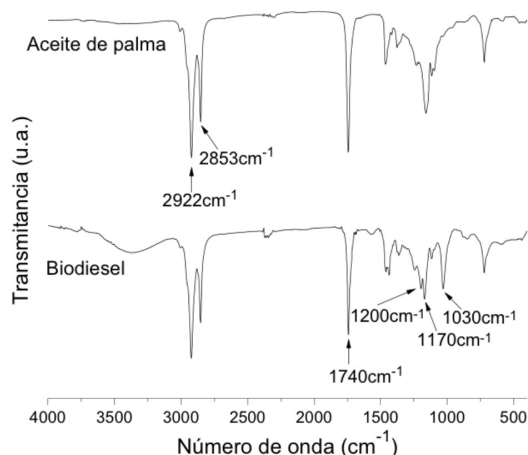


Figura 2. FT-IR de aceite crudo de palma y biodiesel.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del aceite crudo de palma

El valor ácido del aceite crudo de palma producido en Tabasco fue de 3.17%, el cual se ubica dentro de los intervalos permitidos para realizar las reacciones de transesterificación enfocadas en obtener el biodiesel (Benjumea *et al.*, 2004; Zuleta, Bonet, Díaz & Bastidas 2007).

La degradación térmica del aceite bajo condiciones no isotérmicas (figura 1) mostró un solo peldaño en la pérdida de masa en el rango de temperatura ambiente

a 700 °C, rango en el cual se registra una pérdida en peso de aproximadamente de 95.43% a una temperatura promedio de 404.73 °C, atribuida a una única sustancia o una mezcla con pequeñas diferencias de masas moleculares, tal como sugiere De Oliveira *et al.* (2007).

En el espectro FT-IR del aceite crudo de palma producido en Tabasco (figura 2) y el biodiesel se pueden apreciar en bandas indicando la presencia de los enlaces simétricos y asimétricos de C-H alrededor de 2800 cm^{-1} y 3000 cm^{-1} . De forma particular, el pico a 2922 cm^{-1} es una característica de los aceites vegetales, así como del biodiesel que corresponde a grupos metilo, y también se observa una banda en 1743 cm^{-1} característica de ésteres ácidos y ésteres de grasa. Las diferencias entre ambos espectros es la intensidad en los picos antes mencionados.

Adicionalmente, en el espectro infrarrojo del biodiesel crudo obtenido a partir del aceite crudo de palma se muestran señales de absorción alrededor de 1200 cm^{-1} asignadas a la deformación axial de $\text{CC}(=\text{O})-\text{O}$, atribuida a enlaces de éster, mientras que la señal alrededor de 1170 cm^{-1} corresponde a la deformación asimétrica de enlaces $\text{O}-\text{C}-\text{C}$. En la región de los grupos funcionales de 1750 cm^{-1} – 1740 cm^{-1} se tiene un pico intenso correspondiente al grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$). Esta señal se ha reportado por Bezerra *et al.* (2010) en biodiesel obtenido a partir de aceite de higuera y el cual identifica ésteres (Lafont, Páez & Torres, 2011; Pimentel *et al.*, 2006). De acuerdo con la reacción de transesterificación, por cada metil-éster formado hay una transformación de un grupo $-\text{CH}_2$ a un grupo $-\text{CH}_3$ (Medina, Carrillo & Ramírez, 2011), lo cual en la figura 2 se identifica por la diferencia entre las intensidades de 2922 cm^{-1} y 1170 cm^{-1} en ambos espectros. Mientras que para el aceite de palma la diferencia entre ambas señales no es tan notorio, en el biodiesel se aprecia de forma más significativa, así como también en la señal a 1170 cm^{-1} .

Efecto de las variables operacionales sobre la conversión de biodiesel crudo

Con el fin de determinar los cambios en el rendimiento de biodiesel crudo y explorar las mejores condiciones de operación para la transesterificación de aceite crudo de palma, se utilizó un diseño factorial 2^3 con seis puntos centrales. Este camino de exploración es el más adecuado, con la finalidad de explorar si la variable de respuesta puede presentar curvatura y, por tanto, aumentar tratamientos experimentales y pasar hacia diseños centrales compuestos. Además, la suposición de

un modelo de primer orden como una aproximación adecuada de una superficie de respuesta permite pasar con rapidez la vecindad general del óptimo.

En la tabla 2 se reporta el rendimiento de biodiesel crudo obtenido mediante los tratamientos con base en la aplicación del diseño factorial 2^3 y puntos centrales que conllevó a realizar 14 reacciones de transesterificación completamente aleatorizadas. Los resultados en las reacciones bajo las condiciones propuestas mostraron rendimientos en el intervalo del 10% al 90%.

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la matriz de resultados (tabla 3) mostró que el factor concentración del catalizador (NaOH) indicó un efecto significativo sobre el rendimiento ($p < 0.01$), a diferencia de los factores de temperatura y relación molar. De igual forma, no se presentó un efecto de interacción entre estos factores y no se tomaron en cuenta en el modelo polinomial de ajuste, con la finalidad de mejorar el coeficiente de correlación. Por tanto, el rendimiento de biodiesel crudo está representado por la ecuación 2, donde X_1 es relación molar, X_2 es concentración del catalizador NaOH y X_3 es la temperatura.

$$Y = 148.88 + 2.7962X_1 - 50.3184X_2 - 0.4858X_3. \quad (2)$$

El propósito del modelo fue reproducir al rendimiento como función de las variables independientes antes mencionadas. El ANOVA indicó que el modelo describió la variabilidad de la respuesta en un 84.43%, y de acuerdo con Gutiérrez & De la Vara (2008), un coeficiente de correlación de al menos 70% es suficiente con fines de predicción. Así también, como no se presentaron efectos de interacción entre los factores, no se demuestra evidencia de curvatura, y en función de ello no existe la necesidad de incrementar los tratamientos experimentales en busca de un modelo de segundo orden.

Por lo tanto, el modelo fue seleccionado para predecir el rendimiento, y dado que los resultados de dos tratamientos mostraron valores aproximados al 91%, se procedió a incrementar este valor. Otros estudios han evaluado las variables de respuesta de producción de biodiesel con diseños factoriales y aplicando metodología de superficie de respuesta (Betiku & Folorunsho-Adepoju, 2013; Mazo, Restrepo, Ríos & Marín, 2008), modelando polinomios de segundo orden con curvatura en las respuestas. Por ejemplo, los estudios de Betiku & Folorunsho-Adepoju (2013) implican significancia ($p < 0.05$) en orden de importancia de la relación molar, concentración de catalizador, tiempo y temperatura de reacción, presentándose efectos de interacción.

Tabla 2.
Rendimiento de biodiesel.

Tratamiento	Relación molar	Concentración (NaOH)	Temperatura (°C)	Rendimiento (%)
1	5	2	70	13.95
2	5	0.8	50	87.70
3	8	0.8	70	91.69
4	5	0.8	70	88.70
5	8	2	50	47.84
6	5	2	50	31.22
7	8	0.8	50	91.02
8	8	2	70	24.58
9	6.5	1.4	60	79.06
10	6.5	1.4	60	77.07
11	6.5	1.4	60	77.74
12	6.5	1.4	60	77.40
13	6.5	1.4	60	76.74
14	6.5	1.4	60	77.74

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.
Variables independientes en el diseño.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Ratio	p-Valor
A. Relación molar	140.74	1	140.74	1.00	0.34
B. Concentración (NaOH)	7291.99	1	7291.99	51.90	0.00
C. Temperatura	188.86	1	188.86	1.34	0.27
Error	1404.93	10	140.49		
Total	9026.52	13			
$R^2 = 84.43\%$					
$R^2_{aj} = 79.76\%$					

Fuente: Elaboración propia.

En el modelo polinomial obtenido en este estudio, la curvatura del modelo solo es explicada por este efecto de interacción. Esto último explica que la mayor contribución al modelo sea por los efectos lineales y la posibilidad que modelos más complejos contribuyan a incrementar ligeramente el valor del coeficiente de correlación. Por lo anterior, es mejor aplicar un método en ruta ascendente como un procedimiento eficiente para moverse de forma secuencial en la dirección del incremento máximo de la respuesta (Gutiérrez & De la Vara, 2008; Montgomery, 2004). En este caso, se tienen tres variables independientes, y puesto que X_2 tiene el coeficiente de regresión más grande (ecuación 2),

es el factor adecuado como variable de paso. Los resultados para el pronóstico de rendimiento (tabla 4) mostraron incrementos graduales a un paso de 0.5, seleccionándose el más consistente con la realidad para llevar a cabo el experimento (Origen + Δ 14). Los experimentos realizados con base en el método de la ruta ascendente (tabla 5) arrojaron resultados de la variable de respuesta cercanos al 100%, por ello las condiciones de RMA 6.7:1, concentración de NaOH de 0.75% y 58 °C de temperatura de reacción, resultan óptimas para obtener altos valores en rendimiento de biodiesel crudo.

Comparación del biodiesel a partir de aceite crudo de palma

El biodiesel es un combustible limpio que se ha obtenido a partir de aceite crudo de palma a condiciones de operación muy diferentes, las cuales dependen del sistema catalítico empleado. La relación molar metanol/aceite, en principio, es uno de los parámetros de mayor importancia; en un estudio con una mezcla de óxidos de cerio-calcio, empleando una relación molar 12:1, con cuatro horas de reacción y 65 °C, se reportó 95% de rendimiento del combustible (Wong, Tan, Taufiq-Yap, Ramli & Tee, 2015); por otro lado, empleando 1% en peso de dolomita modificada como catalizador con relación molar metanol/aceite de 15:1, en igual tiempo de reacción, se obtuvo 100% de rendimiento (Shajaratun-Nur, Taufiq-Yap, Rabiah, Hwa, Syazwani & Islam, 2014.). En otro estudio, Hameed, Lai & Chin (2009), empleando 5.5% en peso de KF/ZnO y la relación molar de 11.4:1, obtuvieron únicamente 89% de rendimiento en biodiesel en nueve horas de reacción. Estos resultados muestran la factibilidad del uso de sistemas heterogéneos de reacción, sin embargo, el rendimiento está supeditado al tipo y relación alcohol/aceite y, obviamente, a las propiedades fisicoquímicas del sistema catalítico.

En la tabla 6 se resumen condiciones de operación para diversos estudios usando aceite de palma crudo y refinado, aplicando diversos procesos tecnológicos con la intención de obtener rendimientos de biodiesel adecuados. También se ha explorado la obtención del combustible a través de procesos en condiciones supercríticas, observándose que aunque en cada uno se reportan rendimientos aceptables no existe una optimización de condiciones de operación de este proceso. En cuanto al uso de catalizadores enzimáticos, la relación molar es menor, pero es inadecuado comparar

el porcentaje de catalizador y tiempos de reacción, los cuales tienen valores elevados con respecto a todos los demás estudios (Raita, Arnthong, Champreda & Laosiripojana, 2015).

El uso de la metodología de ruta ascendente para la optimización del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite de palma se utilizó en el presente trabajo usando NaOH como catalizador y un reactor por lotes agitado mecánicamente a una velocidad de 2000 rpm. El rendimiento alcanzado fue de 98.4%, y es comparable con diversos estudios, excepto bajo condiciones supercríticas (tabla 6). No obstante, la relación molar empleada es menor que la mayoría de los trabajos reportados en la literatura. Silitonga *et al.* (2016) prepararon biodiesel a partir de aceite crudo de palma, y obtuvieron un 99.7% en rendimiento con NaOH como catalizador y con condiciones de reacción similares al presente estudio. La velocidad de agitación del reactor fue de 1000 rpm, mientras que en el presente trabajo se utilizaron 2000 rpm. Por lo anterior, los resultados encontrados en cuanto rendimiento se validan mutuamente, así como las condiciones de operación, donde la principal diferencia es el efecto de la velocidad de agitación (rpm). Por otro lado, el estudio de Silitonga *et al.* (2016) se lleva a cabo a escala piloto, por tanto se establece el potencial del uso de aceite crudo de palma para la producción de biodiesel.

Tabla 4.
Ruta ascendente para rendimiento.

Tratamiento	Relación molar	Concentración (NaOH)	Temperatura (°C)	Rendimiento (%)
Origen	6.5	1.4	60	67.32
Δ	6.51	1.35	59.86	69.95
Origen + Δ

Origen + Δ 14	6.72	0.75	58.25	101.50

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.
Experimentos con base en la ruta ascendente.

Cond. ruta ascendente	Relación molar	Concentración (NaOH)	Temperatura (°C)	Rendimiento (%)
R ¹	6.7	0.75	58	98.01
R ²	6.7	0.75	58	99.00
R ³	6.7	0.75	58	98.34

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.

Comparación de rendimiento de biodiesel bajo diferentes métodos de obtención en estudios previos con aceite de palma crudo o refinado.

Catalizador	T (°C)	RM	Cat.	Tiempo	Rend.	Referencia
Óxido mixto 50Ca–Ce.	65	12:01	5	4 h	95	Wong <i>et al.</i> , 2015
Dolomita modificada de Malasia.	65	15:01	1	4 h	100	Shajaratun-Nur <i>et al.</i> , 2014
TiO ₂ -ZnO	60	06:01	1	5 h	92.2	Madhuvilakku & Piraman, 2013
K F/Ca-Al Hidrotalcita	60	12:01	5	5 h	95.6	Gao <i>et al.</i> , 2010
KF/ZnO	65	11.43:1	5.52	9.7 h	89.2	Hameed <i>et al.</i> , 2009
Lipasa <i>Thermomyces lanuginosus</i> /Fe ₃ O ₄	50	4.7.1	23.2	24 h	97.2	Raita <i>et al.</i> , 2015
-	292-414	6:1-18:1	-	10-16 min	98	Biktashev <i>et al.</i> , 2011
-	360	30:01:00	-	20 min	72	Tat-Tan <i>et al.</i> , 2009
NaOH*	65	06:01	1	2 h	99.7	Silitonga <i>et al.</i> , 2016
NaOH*	58	6.7:1	0.75	2 h	98.4	Presente estudio

* Aceite crudo de palma; RM: Relación molar Metanol/aceite; Cat: Catalizador (% p/p); Rend: Rendimiento (%)

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se produjo biodiesel crudo empleando la reacción de transesterificación a partir de aceite crudo de palma con un rendimiento de 98.45%. Las condiciones óptimas de los factores fueron obtenidas utilizando un análisis factorial con puntos centrales y la aplicación del método de ruta ascendente. El trabajo estableció la forma de aplicar los resultados del diseño y la ruta más adecuada para obtener el máximo en una variable, empleando un algoritmo de optimización.

REFERENCIAS

- Aceves, L., Juárez, J., Palma, D., López, R., Rivera, B., Rincón, J., & Morales, R. (2008). *Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq) en el Estado de Tabasco*. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).
- Alamu, O. J., Waheed, M. A., & Jekayinfa, S. O. (2008). Effect of ethanol-palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield. *Fuel*, 87(8-9), 1529-1533.
- American Oil Chemists' Society (AOCS). (2000). *Official Methods* (3d ed.). USA: AOCS.
- Avhad, M. R., & Marchetti, J. M. (2015). A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Reviews*, 50, 696-718.
- Benjumea, P., Agudelo, J., & Cano, G. (2004). Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel. *Scientia et Technica*, 1(24), 169-174.
- Betiku, E., & Folorunsho-Adepoju, T. (2013). Methanolysis optimization of sesame (*Sesamum indicum*) oil to biodiesel and fuel quality characterization. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 49, 1-8.
- Bezerra, L., Vera, F., Fernandes, C., Silveira, A., Stragevitch, L., & Pimentel, M. (2010). Prediction of properties of diesel/biodiesel blends by infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Fuel*, 89(2), 405-409.
- Biktashev, Sh. A., Usmanov, R. A., Gabitov, R. R., Gazizov, R. A., Gumerov, F. M., Gabitov, F. R., Abdulagatov, I. M., Yarullin, R. S., & Yakushev, I. A. (2011). Transesterification of rapeseed and palm oils in supercritical methanol and ethanol. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2999-3011.
- Ching, L. C., Chien, C. H., Dang, T. T. & Jo, S. C. (2012). Biodiesel synthesis via heterogeneous catalysis using modified strontium oxides as the catalysts. *Bioresource Technology*, 113, 8-13.
- Chongkhong, S., Tongurai, C., Chetpattananondh, P., & Bunyakan, C. (2007). Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. *Biomass and Bioenergy*, 31, 563-568.
- Cukalovic, A., Monbaliu, J. C. M., Eeckhout, Y., Echim, C., Verhé, R., Heynderickx, G., & Stevens, C. V. (2013). Development, optimization and scale-up of biodiesel production from crude palm oil and effective use in developing countries. *Biomass and Bioenergy*, 56, 62-69.
- De Oliveira, J., Brandao, R., Cícera, C., Soares, L., Ribeiro, J., Miranda, E., & Rodarte, C. (2007). Biodiesel de babacu (*Orbignya sp.*) obtenido por vía etanólica. *Química Nova*, 30(3), 600-603.
- Gao, L., Teng, G., Xiao, G., & Wei, R. (2010). Biodiesel from palm oil via loading KF/Ca-Al. Hydrotalcite catalyst. *Biomass and Bioenergy*, 34, 1283-1288.
- Gutiérrez, P. H., & De la Vara, S. R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (2da. ed.) México: McGraw-Hill.
- Haitang, W., Junhua, Z., Qin, W., Jilu, Z., & Jianan, Z. (2013). Transesterification of soybean oil biodiesel using zeolite supported CaO as strong base catalysts. *Fuel Processing Technology*, 109, 13-18.
- Hameed, B. H., Lai, L. F., & Chin, L. H. (2009). Production of biodiesel from palm oil (*Elaeis guineensis*) using heterogeneous catalyst: An optimized process. *Fuel Processing Technology*, 90(4), 606-610.

- Hui, L., Lingyan, S., Yong, S., & Lubin, Z. (2012). Biodiesel production catalyzed by cinder supported CaO/KF particle catalyst. *Fuel*, 97, 651-657.
- Indra, R., Prabowo, J., Ayucitra, A., Edi, F., & Ismadji, S. (2013). Natural zeolite from Pacitan Indonesia, as catalyst support for transesterification of palm oil. *Applied Clay Science*, 74, 121-126.
- Lafont, J., Páez, M., & Torres, Y. (2011). Chemical analysis of mixtures of biodiesel from used cooking oil and diesel by infrared spectroscopy. *Information Technological*, 22(4), 35-42.
- Madhuvilakku, R., & Piraman, S. (2013). Biodiesel synthesis by TiO₂-ZnO mixed oxide nanocatalyst catalyzed palm oil transesterification process. *Bioresource Technology*, 150, 55-59.
- Mazo, P. C., Restrepo, G. L., Ríos, L., & Marín J. (2008). Optimización de la producción de alquil ésteres a partir de aceite de palma, empleando la metodología de superficie de respuesta. *Información Tecnológica*, 19(5), 37-48.
- Medina, V. J., Carrillo, M. G., & Ramírez, O. J. (2011). Método para monitorear el rendimiento y contenido de metil-ésteres en el biodiesel usando la espectroscopia vibracional IR. *Acta Universitaria*, 21(4), 27-32.
- Meher, L. C., Dharmagadda, V., & Naik, S. N. (2006). Optimization of alkali-catalyzed transesterification of *Pongamia pinnata* oil for production of biodiesel. *Bioresource Technology*, 97(12), 1392-1397.
- Melero, J., Bautista, L., Iglesias, J., Morales, G., & Sánchez, R. (2012). Zr-SBA-15 acid catalyst: Optimization of the synthesis and reaction conditions for biodiesel production from low-grade oils and fats. *Catalysis Today*, 195(1), 44-53.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (2da. Ed.). México: Limusa Wiley.
- Muhammad, S., Muhammad, W., Asif, M., & Muhammad, I. (2012). Optimized biodiesel production and environmental assessment of produced biodiesel. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 17, 617-623.
- Olutoye, M., & Hameed, B. (2013). Production of biodiesel fuel by transesterification of different vegetable oils with methanol using Al₂O₃ modified MgZnO catalyst. *Bioresource Technology*, 132, 103-108.
- Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Norhasyima, R. S. (2011). Comparison of palm oil, *Jatropha curcas* and *Calophyllum inophyllum* for biodiesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3501-3515.
- Pimentel, M., Ribeiro, G., Cruz, R., Stragevich, L., Pacheco, J., & Teixeira, L. (2006). Determination of biodiesel content when blended with mineral diesel fuel using infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Microchemical Journal*, 82, 201-206.
- Puhan, S., Vedaraman, N., Ram, B., Sankarnarayanan, G., & Jeychandran, K. (2005). Mahua oil (*Madhuca indica* seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics. *Biomass and Bioenergy*, 28, 87-93.
- Quintella, S., Saboya, R., Salmin, D., Novaes, D., Araújo, A., Albuquerque, M., & Cavalcante, C. (2012). Transesterification of soybean oil using ethanol and mesoporous silica catalyst. *Renewable Energy*, 38, 136-140.
- Raita, M., Arnthong, J., Champreda, V., & Laosiripojana, N. (2015). Modification of magnetic nanoparticle lipase designs for biodiesel production from palm oil. *Fuel Processing Technology*, 134, 189-197.
- Refaat, A., Attia, N., Sibak, H., Sheltawy, S., & Eldiwani, G. (2008). Production optimization and quality assessment of biodiesel from waste vegetable oil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5, 75-82.
- Shajaratun-Nur, Z. A., Taufiq-Yap, Y. H., Rabiah Nizah, M. F. Hwa Teo, S., Syazwani, O. N., & Islam, A. (2014). Production of biodiesel from palm oil using modified Malaysian natural dolomites. *Energy Conversion and Management*, 78, 738-744.
- Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Chyuan Ong, H., Kusumo, F., Mahlia, T. M. I., & Baha, A. H. (2016). Pilot-scale production and the physicochemical properties of palm and *Calphyllum inophyllum* biodiesels and their blends. *Journal of Cleaner Production*, 126, 654-666.
- Tat-Tan, K., Teong-Lee, K. & Rahman-Mohamed, A. (2009). Production of FAME by palm oil transesterification via supercritical metanol technology. *Biomass and Bioenergy*, 33(8), 1096-1099.
- Wong, Y. C., Tan, Y. P., Taufiq-Yap, Y. H., Ramli, I., & Tee, H. S. (2015). Biodiesel production via transesterification of palm oil by using Cao-CeO₂ mixed oxide catalysts. *Fuel*, 162, 288-293.
- Zuleta, E., Bonet, J., Díaz, L., & Bastidas, M. (2007). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite crudo de palma africana con etanol. *Energética*, 38, 47-53.