
ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICACIÓN A PARTIR DE ACEITES CRUDOS DE PULPAS DE AGUACATE (*Persea americana* MILL VAR. HASS, FUERTE Y CRIOLLO) DE CLASE III

Luis Alberto Juárez-Morán, José Alberto Ariza-Ortega, María Elena Ramos-Cassellis,
Silvia Luna-Suárez y Joel Díaz-Reyes

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar espectroscópicamente el aceite crudo de aguacate de las variedades Hass, Fuerte y Criollo de clase III, y el biodiesel producido mediante transesterificación a partir de aquellos. Los aceites crudos fueron extraídos por centrifugación y con disolvente. Los productos se analizaron por parámetros fisicoquímicos de calidad. Para la obtención del biodiesel las muestras fueron sometidas a las diferentes condiciones

de transesterificación B1: aceite-alcohol etílico 96% + NaOH, B2: aceite-alcohol etílico 96% + KOH, B3: aceite-metanol + NaOH, y B4: aceite-metanol + KOH, y fueron analizadas por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier. Los mejores resultados fueron obtenidos con las reacciones B3 y B4 en aceite crudo extraído por centrifugación de la variedad Hass. El biodiesel obtenido presentó una calidad aceptable.

Introducción

México es uno de los países productores y exportadores de aguacate a nivel mundial con una cantidad de 1.520.694,50ton cosechadas (SIAP, 2014), siendo la variedad Hass la principal que se cultiva, estudia, comercializa e industrializa, mientras otras variedades como la Fuerte y Criollo son poco conocidas y comercialmente no explotadas. En las últimas décadas se ha comenzado a diversificar el fruto en productos como guacamole, pulpa y aceite para exportación. Sin embargo, esta producción es mínima y el grado de deterioro del fruto es del 54% (Aguilar, 2013); este tipo de aguacate deteriorado se clasifica en clase III,

debido a que presenta características sensoriales, nutritivas y de calidad no aptas para consumo en fresco.

El contenido de lípidos en el mesocarpio del aguacate es del 15-30% (Bizimana *et al.*, 1993) y el aceite contiene ácidos grasos saturados (16-22%) e insaturados (74-83%), siendo los principales ácidos grasos el palmítico (C16:0), oleico (C18:1 ó ω-9) y linoleico (C18:2 ó ω-6) en cantidades de 15,71; 60,28 y 13,66%, respectivamente (Ortiz-Moreno *et al.*, 2003). Moreira (2012) indicó que el mejor aceite para obtener biodiesel es el que contiene principalmente una alta concentración de C18:1, debido a su estabilidad oxidativa y su punto de fusión, similar a la cantidad que

se encuentra en el aceite de aguacate. El biodiesel está compuesto de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales y grasas animales. Para la producción de biodiesel, es menester transesterificar el aceite con metanol o etanol para obtener metil o etilésteres de ácidos grasos (Schuchardt *et al.*, 1998; Zagonel *et al.*, 2004).

Una vez obtenido el biodiesel es necesario analizarlo, para lo cual generalmente se usan métodos químicos y técnicas instrumentales. Entre las técnicas instrumentales, se encuentra la espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (EITF) debido a que detecta la conversión de los ácidos grasos en aceites crudos cuando la muestra se

somete a la reacción de transesterificación para obtener biodiesel, y se observan bandas absorbentes en la región infrarroja del espectro electromagnético que son características de los grupos funcionales de los ácidos grasos (O'Donnell *et al.*, 2013).

El objetivo de este trabajo fue la obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite crudo extraído de la pulpa de aguacate de clase III de las variedades Hass, Fuerte y Criollo.

Desarrollo Experimental

Muestras

Se utilizó 1kg de fruto de aguacate (*Persea americana* Mill.) en la fase de madura-

PALABRAS CLAVE / Aceite Crudo / Biodiesel / Pulpa de Aguacate Clase III / Transesterificación

Recibido: 12/11/2015. Modificado: 05/10/2015. Aceptado: 10/10/2016.

Luis Alberto Juárez-Morán. Licenciado en Electrónica, M.C. y cursante de doctorado en Física Aplicada, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), México.

José Alberto Ariza-Ortega. Químico Farmacobiólogo Especialista en Tecnología de Alimentos, BUAP, México. M.C. y Doctor en Tecnología Aplicada, Instituto Politécnico Na-

cional (IPN), México. Profesor, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.

María Elena Ramos-Cassellis. Ingeniera Bioquímica en Alimentos, Instituto Tecnológico de Texmelucan, México. Maestría en Tecnología Avanzada y Ciencia Aplicada, IPN, México. Doctora en Ciencias en Biotecnología, ENCB-IPN, México. Profesora, BUAP, México.

Silvia Luna Suárez. Ingeniera Bioquímica, Instituto Tecnológico de Jiquilpan, México. M.C. y Doctora en Biotecnología de Plantas, CINVESTAV-IPN, México. Investigadora, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA-IPN), México.

Joel Díaz-Reyes. Licenciado en Física y M.C. en Física del Estado Sólido, BUAP, México. Doc-

tor en Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, México. Investigador, Instituto Politécnico Nacional, México. Dirección: Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, IPN. ExHacienda de San Juan Molino, Km. 1,5. Tepetitla, Tlaxcala, 90700. México. e-mail: joel_diaz_reyes@hotmail.com

ANALYSIS OF BIODIESEL PRODUCTION BY TRANSESTERIFICATION OF CRUDE OIL FROM THE PULP OF CLASS III AVOCADO (*Persea americana* MILL VAR. HASS, FUERTE AND CREOLE)

Luis Alberto Juárez-Morán, José Alberto Ariza-Ortega, María Elena Ramos-Cassellis, Silvia Luna-Suárez and Joel Díaz-Reyes

SUMMARY

The aim of this study was to analyze spectroscopically the crude oil of Class III avocado from the Hass, Fuerte and Creole varieties, as well as the biodiesel produced by their transesterification. The crude oils were extracted by centrifugation and solvent. The products were analysed by physicochemical quality parameters. For obtaining biodiesel, samples were subjected to different conditions transesterifica-

tion B1, oil-ethyl alcohol 96% + NaOH, B2: oil-ethyl alcohol 96% + KOH, B3: oil-methanol + NaOH, and B4: oil-methanol + KOH, and they were analyzed by infrared spectroscopy with Fourier transform. The best results were obtained with the B3 and B4 reactions in crude oil of the Hass variety extracted by centrifugation. The obtained biodiesel had an acceptable quality.

ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICAÇÃO A PARTIR DE ÓLEOS CRUDE DE POLPA DE ABACATE (*Persea americana* MILL VAR. HASS, FORTE E CRIULO) CLASSE III

Luis Alberto Juárez-Morán, José Alberto Ariza-Ortega, María Elena Ramos-Cassellis, Silvia Luna-Suárez e Joel Díaz-Reyes

RESUMO

O objetivo deste estudo foi analisar espectroscopicamente óleo cru de abacatedas variedades Hass, Forte e Crioulo da classe III e o biodiesel produzido pela transesterificação a partir deles. Os óleos crus foram extraídos por centrifugação e solvente. Os produtos foram analisados por meio de parâmetros de qualidade físico-químicas. Para a obtenção de biodiesel as amostras foram submetidas as diferentes con-

dições de transesterificação B1: óleo-álcool etílico a 96% + NaOH, B2: óleo-álcool etílico a 96% de KOH +, B3: óleo-metanol + NaOH, e B4: óleo-metanol + KOH, e analisadas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier. Os melhores resultados foram obtidos com reações B3 e B4 em óleo cru extraído por centrifugação a variedade Hass. Biodiesel obtido tinha uma qualidade aceitável.

ción comercial, proveniente del estado de Puebla, México. Se utilizaron tres variedades: Hass, Fuerte y Criollo, de cada una de las cuales se seleccionaron tres frutas en buen estado y tres con defectos (aguacate de clase III). Posteriormente, los frutos se lavaron y el epicarpio y la semilla se eliminaron manualmente. Se determinó el rendimiento de la pulpa en cada variedad y se midieron el índice de madurez y los sólidos solubles por el método reportado por Pinzón *et al.* (2007). Para la caracterización bromatológica de la pulpa de aguacate de las diferentes variedades obtenidas se realizaron análisis de humedad, proteína, lípidos, cenizas y carbohidratos mediante normativas de la AOAC (2006). Cada análisis se realizó por triplicado.

Extracción de los aceites crudos

Para la extracción del aceite crudo de la pulpa de aguacate clase III se emplearon 15g de cada una de las muestras. Las diferentes pulpas fueron ho-

mogenizadas en una licuadora (Braun Multipractic) durante 20s. Las muestras homogenizadas se vertieron hasta obtener una película delgada en placas de Petri de vidrio que se depositaron en una estufa Memmert (modelo ICP-400) a 70°C durante 7h, hasta obtener el 10% de la masa original. Las pulpas deshidratadas se depositaron dentro de tubos Eppendorf para la extracción de los aceites por centrifugación. Las condiciones de centrifugación fueron a 15557g (11000rpm) a una temperatura de 40°C durante 10min (centrífuga Eppendorf, modelo 5804 R, Eppendorf AG, Hamburgo, Alemania). Posteriormente se separó el aceite extraído de la pulpa precipitada. La extracción con disolvente (éter de petróleo), se llevó a cabo con un equipo Soxhlet empleando el método 963.15 (AOAC, 2006) a 70°C durante 4h. Una vez terminada la extracción, el disolvente fue separado del aceite por destilación en vacío usando un rotaevaporador (Heidolph WB 2001) durante

5min. Los aceites crudos obtenidos fueron almacenados en frascos ámbar cerrados y depositados en una caja a 25°C hasta su análisis.

Caracterización de los aceites crudos

Análisis fisicoquímicos. Los aceites crudos fueron caracterizados por el método reportado por la Norma Mexicana para la densidad específica (NM, 2012), el índice de refracción fue obtenido por el método reportado por AOAC (1965), y empleando las técnicas de Matissek *et al.* (1998) se caracterizó a los principales índices de calidad de aceites: índice de acidez, índice de peróxido e índice de saponificación. Cada tratamiento fue realizado por triplicado.

Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (EITF). Se utilizaron 20µl de cada una de las muestras y se analizaron en un espectrómetro Bruker (modelo Vertex 70 Bruker Optics-Bruker Corporation, Billerica, MA, EEUU)

con transformada de Fourier en el modo de medición llamada reflectancia total atenuada (ATR, por sus siglas en inglés). La absorbancia se midió en el mediano infrarrojo (400-4000cm⁻¹) con una resolución de 4cm⁻¹ y un tiempo de integración de 60s (1s por ciclo). La adquisición y el procesamiento de los datos se realizaron utilizando el software OPUS, versión 6.0 (Bruker Optics, EEUU).

Reacción de transesterificación, medición de la densidad y viscosidad del biodiesel. Los alquilesteres de ácidos grasos se produjeron mediante una reacción de transesterificación como sigue: se utilizaron 20g de aceite crudo de aguacate de las diferentes variedades. Los aceites crudos fueron saponificados y derivatizados a alquilesteres agregando dos diferentes soluciones a cada una de las muestras, metanol 96% y etanol 96%, con una relación molar aceite-alcohol de 1:6. A continuación las soluciones se mezclaron con catalizadores convencionales: NaOH (Meyer

97,0%) y KOH (Meyer 85,0%), a 60°C durante 1h, de acuerdo a Rachimoallah *et al.* (2009). De esta manera se prepararon cuatro tratamientos: aceite-alcohol etílico 96% + NaOH (B1), aceite-alcohol etílico 96% + KOH (B2), aceite-metanol + NaOH (B3) y aceite-metanol + KOH (B4). Los alquilésteres de ácidos grasos se extrajeron mediante la adición de 10ml de cada uno de los alcoholes y 10ml de agua destilada, en donde se formaron dos fases: orgánica y acuosa, y se separó la fase orgánica; este residuo se disolvió en 10 ml de cada alcohol correspondiente a la muestra. Al biodiesel obtenido se le determinó la densidad específica y la viscosidad, respectivamente, siguiendo los procedimientos reportados en las Normas Mexicanas (NM, 2012 y NM, 2015). Cada tratamiento fue realizado por triplicado.

Análisis Estadístico

Los resultados se expresaron como el valor medio \pm DE. Las diferencias significativas se evaluaron mediante análisis de la varianza (ANAVAR). Un valor de $p < 0,05$ fue considerado como significativo. Los datos se analizaron con el programa MINITAB 17.

Resultados Experimentales y Discusión

Materia prima e índice de madurez

El mayor rendimiento de pulpa se obtuvo para la variedad Criollo (57,3%), seguido de la variedad Hass (50,8%) y finalmente en la variedad Fuerte (44,4%). En la Tabla I se muestran los resultados del porcentaje del índice de madurez determinado en las pulpas de aguacate Clase I y III de las tres variedades estudiadas. Estudios de Gallo (1993) y Buevas *et al.* (2012) en maracuyá y aguacate (variedad Hass), respectivamente, indicaron que durante las diferentes etapas fisiológicas de maduración los valores de madurez incrementan y cuando sobrepasan este parámetro, sus

TABLA I
PORCENTAJE DE ÍNDICE DE MADUREZ DETERMINADO EN LAS PULPAS DE AGUACATE

Variedades de aguacate	Índice de madurez de la pulpa de clase I (%)	Índice de madurez de la pulpa de clase III (%)
Hass	20,20 \pm 0,36 a	24,30 \pm 0,25 b
Fuerte	21,20 \pm 0,40 a	24,10 \pm 0,36 b
Criollo	20,60 \pm 0,26 a	24,20 \pm 0,40 b

Los valores son promedios de tres repeticiones \pm DE. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

propiedades sensoriales y de calidad son afectadas (Kader, 1983; Osterloh *et al.*, 1996; Hernández, 2001). Por ello la pulpa de aguacate de clase III, puede ser ideal para procesarla y utilizarla para la producción de biodiesel.

En la Tabla II se muestran los resultados de la caracterización bromatológica de la pulpa de aguacate de las tres variedades. El mayor contenido de lípidos lo presentó la variedad Fuerte, y el menor la variedad Criollo. Los lípidos, luego de la humedad fueron los componentes mayoritarios, con valores similares a los informados por Bora *et al.* (2001) para la variedad Fuerte cultivado en Brasil y Ortiz-Moreno *et al.* (2003) para la variedad Hass

cultivado en México. Ortiz-Moreno *et al.* (2003) han señalado que, durante la fase de maduración del aguacate, se considera maduro cuando presentan un contenido mínimo de lípidos en la pulpa de 15%, por lo que los frutos seleccionados y utilizados en este estudio pueden ser considerados maduros. Con respecto a las proteínas, no hubo diferencia significativa entre las variedades, mientras que, en cenizas y carbohidratos, sí se presentó diferencia significativa, lo que es dependiente de la zona de cultivo, condiciones de crecimiento, tiempo de recolección y almacenamiento; factores que proporcionan características únicas para cada variedad (Gaydou *et al.*, 1987).

TABLA II
CARACTERIZACIÓN BROMATOLÓGICA DE LA PULPA DE AGUACATE DE LAS VARIEDADES HASS, FUERTE Y CRIOLLO

Determinaciones (%)	Variedades		
	Hass	Fuerte	Criollo
Humedad	68,10 \pm 3,10 a	68,30 \pm 2,13 a	77,19 \pm 2,84 b
Proteína	1,85 \pm 0,02 a	1,36 \pm 0,11 a	1,84 \pm 0,23 a
Lípidos	19,30 \pm 2,20 a	24,00 \pm 3,10 b	14,95 \pm 1,25 c
Cenizas	1,50 \pm 0,02 a	2,30 \pm 0,40 b	4,03 \pm 0,33 c
Carbohidratos	9,20 \pm 1,20 a	4,00 \pm 1,00 b	1,35 \pm 0,24 c

Los valores son promedios de tres repeticiones \pm DE. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

TABLA III
CANTIDADES DE LOS ACEITES CRUDOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PULPA DE AGUACATE

Métodos de extracción					
Solvente			Centrifugación		
Hass (ml)	Fuerte (ml)	Criollo (ml)	Hass (ml)	Fuerte (ml)	Criollo (ml)
207 \pm 2,2 a	206 \pm 2,1 a	209 \pm 1,8 a	212 \pm 1,4 a	219 \pm 1,3 a	213 \pm 1,3 a

Los valores son promedios de tres repeticiones \pm DE. Letras iguales indican que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

En la Tabla III se muestra las cantidades de aceite crudo obtenido de cada variedad de aguacate con los dos métodos de extracción empleados; se observa que por el análisis de varianza no hay diferencia significativa y por lo tanto se puede tomar cualquier variedad de aguacate para la extracción del aceite crudo. Se puede apreciar también que por el método de centrifugación se obtiene un rendimiento de aceite un poco más alto. Para conocer el mejor aceite es necesario conocer sus propiedades físicas y químicas.

Caracterización de los aceites crudos

Análisis fisicoquímicos. En la Tabla IV se muestran los resultados de las propiedades fisicoquímicas de los aceites crudos obtenidos a partir de pulpa de aguacate clase III, extraídos por los métodos de centrifugación y por Soxhlet (con disolvente).

La densidad específica determinada en los aceites crudos obtenidos de la pulpa de aguacate clase III, extraídos por los dos métodos de extracción propuestos no presentó diferencia significativa ($p > 0,05$), excepto el aceite de la variedad Fuerte extraído por centrifugación. Hart y Fisher (1991) indicaron que un aceite puro debe presentar un valor $< 1 \text{ g} \cdot \text{ml}^{-1}$, por lo que todas las muestras de aceites analizadas en este trabajo se encuentran dentro de este parámetro. Además, su densidad específica es similar a la reportada para tres aceites vegetales tales como los de maíz (0,917-0,925 $\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$), cártamo (0,922-0,927 $\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$), girasol (0,918-0,923 $\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$) y aceite de oliva virgen (0,9090-0,9130 $\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$) (Hart y Fisher, 1991; Kumate *et al.*, 1994; CODEX, 1999). Por lo anterior se pudiera decir que los aceites crudos de aguacate contienen cantidades mínimas de ácidos grasos libres, fosfolípidos, esteroides, agua y otras impurezas, por lo que estos constituyentes no afectarían la reacción de transesterificación y la separación de los ésteres de ácidos

TABLA IV
PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS ACEITES CRUDOS EXTRAÍDOS DE LAS PULPAS DE AGUACATE CLASE III DE LAS VARIEDADES HASS, FUERTE Y CRIOLLO

Análisis	Aceite extraído por centrifugación		
	Variedades		
	Hass	Fuerte	Criollo
Densidad específica (g·ml ⁻¹)	0,92 ±0,00 a	0,88 ±0,00 b	0,91 ±0,00 a
Índice de refracción	1,458 ±0,00 a	1,469 ±0,00 a	1,466 ±0,00 a
Índice de acidez (% ácido oleico)	0,67±0,14 a	1,13 ±0,15 b	1,16 ±0,04 b
Índice de peróxidos (mEqO ₂ /kg)	2,50 ±0,24 a	5,70 ±0,25 b	6,70 ±0,23 c
Índice de saponificación (g KOH)	152,90 ±0,85 a	163,60 ±1,58 b	174,50 ±0,65 c

Análisis	Aceite extraído con disolvente (éter de petróleo)		
	Variedades		
	Hass	Fuerte	Criollo
Densidad específica (g·ml ⁻¹)	0,92 ±0,00 a	0,92 ±0,00 a	0,90 ±0,00 a
Índice de refracción	1,459 ±0,00 a	1,462 ±0,00 a	1,463 ±0,00 a
Índice de acidez (% ácido oleico)	2,69 ±0,14 a	3,01 ±0,20 b	9,42 ±0,40 c
Índice de peróxidos (mEqO ₂ /kg)	9,50 ±0,65 a	15,30 ±0,62 b	17,40 ±0,13 c
Índice de saponificación (g KOH)	181,90 ±1,25 a	184,10 ±1,20 b	191,40 ±0,70 c

Los valores son promedios de tres repeticiones ±DE. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre los tratamientos (p<0,05).

grasos del triacilglicerol se llevaría a cabo eficazmente.

El resultado de los índices de refracción para los aceites crudos extraídos de la pulpa de aguacate clase III de la variedad Hass obtenido por centrifugación y por el método de Soxhlet fueron de 1,458 y 1,459, respectivamente. Mientras que los aceites crudos de las variedades Fuerte y Criollo tuvieron valores más altos, debido posiblemente al mayor contenido de ácidos grasos insaturados como: palmitoleico (C16:1) 7,26%; palmitelaídico (C16:1t) 0,16%; oleico (C18:1) 60,28%; elaidico (C18:1t) 0,3%; linoleico (C18:2) 13,66%; linoleídate (C18:2t) 0,04%; linolenico (C18:3) 1,44%; gadoleico (C20:1) 0,21% y araquidonico (C20:4) 0,11%; que son los ácidos grasos insaturados que se encuentran principalmente en el aceite de aguacate (Ortiz-Moreno *et al.*, 2003). Sin embargo, el índice de refracción es menor que el indicado para los aceites de maíz (1,473-1,475); soya (1,472-1,476) y girasol (1,474-1,477) (Hart y Fisher, 1991; Kumate *et al.*, 1994) y similar al del aceite de oliva (1,4665-1,470) (Andrikopoulos, 2002). Una mayor concentración de ácidos grasos monoinsaturados mejora las características químicas del biodiesel debido a que mantiene valores bajos en los

parámetros de nube, fluidez y estabilidad oxidativa (Knothe, 2000; Knothe *et al.*, 2005; Imahara *et al.*, 2006; Ramos *et al.*, 2009).

El valor del índice de acidez en las muestras de aceite crudo extraído de la pulpa de aguacate clase III de las diferentes variedades fue <3,01% ácido oleico, excepto el aceite crudo de la variedad Criollo extraído por el método de Soxhlet, que presentó 9,42% de ácido oleico. En otros estudios se han reportado cantidades de ácidos grasos libres de 23,5; 1,5-3,3 y 0,6-1,5% de ácido oleico en aceite de amaranto de la variedad *hypochondriacus*, aceite de oliva y de cártamo, respectivamente (García *et al.*, 1987; Sax y Lewis, 1992; Salinas, 1993). Para la producción de biodiesel, una cantidad >3% de ácido oleico en aceites afectaría la reacción de neutralización por el catalizador e incrementaría la formación de jabón, entre otros efectos (Dorado *et al.*, 2002; Van Gerpen, 2005; Martínez *et al.*, 2011). Ma *et al.* (1998) analizaron la concentración de ácidos grasos libres (<3%) y agua en muestras de sebo de vaca, y determinaron que cuando se somete a reacciones de transesterificación catalizada con NaOH el rendimiento es mayor; sin embargo, al adicionar 0,6% de ácidos grasos libres el rendi-

miento de los metilésteres de ácidos grasos (FAMES por sus siglas en inglés) disminuyó, y el volumen de agua agregado a la solución no afectó la concentración de los FAMES.

El índice de peróxido cuantificado en las muestras de aceites crudos fue alto, lo cual indica que los ácidos grasos insaturados incrementaron su oxidación. La oxidación de los ácidos grasos insaturados incrementa

la viscosidad del biodiesel y afecta la combustión debido a su polimerización (Pryde, 1983). Sin embargo, solo el aceite crudo extraído por centrifugación de la variedad Hass (2,5mEqO₂/kg) se encuentra dentro del parámetro de 0-3 mEqO₂/kg para aceites refinados, de acuerdo a Matissek *et al.* (1998).

Se observó diferencia significativa en el índice de saponificación entre las variedades, siendo más bajo en el aceite extraído mediante centrifugación en la variedad Hass, lo que coincide con el menor índice de acidez. Esto podría ser beneficioso porque no habría un exceso de jabón, que afectaría la reacción de transesterificación.

Por los resultados obtenidos, el aceite crudo de la variedad Hass extraído por el método de centrifugación fue la mejor muestra para la obtención de biodiesel. Para corroborar lo anterior, este aceite se analizó en el equipo de espectroscopia infrarroja y se comparó con otros aceites crudos.

Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (EITF). En la Figura 1 se muestran los espectrogramas

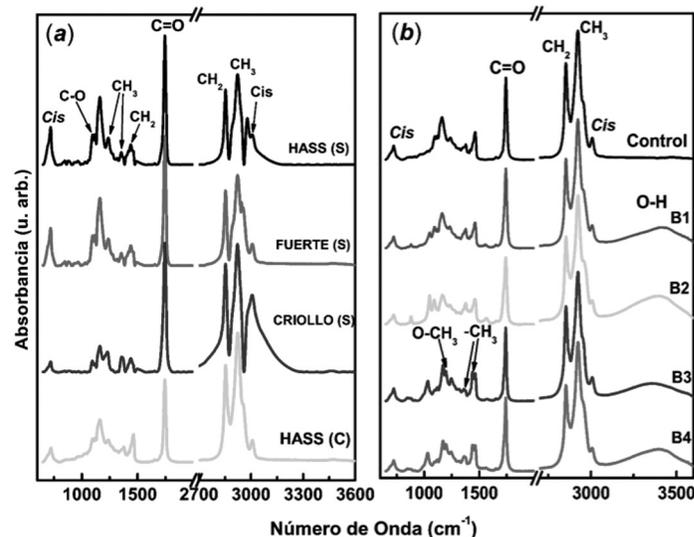


Figura 1. a: Espectrogramas de EITF de los aceites crudos extraídos de la pulpa de aguacate clase III de diferentes variedades, en donde C: aceite crudo extraído por centrifugación y S: aceites crudos extraídos con disolvente. b: Espectrogramas de los aceites crudos metilados con metanol y etanol, utilizando los catalizadores NaOH y KOH, en donde B1: aceite-etanol con NaOH, B2: aceite-etanol con KOH, B3: aceite-metanol con NaOH y B4: aceite-metanol con KOH; Control: aceite crudo sin transesterificar.

obtenidos de los aceites crudos de las variedades Hass, Fuerte y Criollo extraídos por disolvente, comparándolos con el aceite crudo de la variedad Hass extraído por centrifugación, y su comparación con las muestras transesterificadas, respectivamente. En la Figura 1a se observa que los espectrogramas de las muestras de los aceites crudos extraídos de la pulpa de aguacate de clase III son similares a los reportados por Guillén y Cabo (1998) en aceites y grasas, respecto a las bandas en los números de onda presentados. Se puede observar que en los espectrogramas de los aceites crudos de aguacate se presentan los picos correspondientes a ácidos grasos y lípidos con dobles enlaces (723 y 3008cm^{-1} , respectivamente) que corresponden al doble enlace *cis* con un modo de vibración de flexión y de estiramiento, respectivamente (Guillén y Cabo, 1998). Como se puede observar, los aceites crudos extraídos por los dos métodos no presentan una banda ancha en el intervalo de 3000 a 3500cm^{-1} atribuida a vibraciones de estiramiento de grupos O-H (Hong Yang y Joseph Irudayaraj, 2000), significando que la humedad en estos aceites es mínima. Los aceites crudos extraídos con disolvente obtenidos de la pulpa de aguacate clase III (variedades Hass, Fuerte y Criollo), presentan una susceptibilidad mayor al deterioro de sus ácidos grasos insaturados, comparado con el aceite crudo extraído por centrifugación (variedad Hass). Ortiz-Moreno *et al.* (2003) reportaron una concentración de ácidos grasos monoinsaturados de $68,21\%$ y una cantidad similar de ácidos grasos saturados: palmítico (C16:0) $15,71\%$ y esteárico (C18:0) $0,72\%$; y poliinsaturados de $15,14\%$. Se puede decir que la concentración de ácidos grasos (extraído por el método de Soxhlet) y analizada en este trabajo es similar a la reportada por Ortiz-Moreno *et al.* (2003).

Debido a las características físico-químicas y al análisis por EITF, el aceite crudo de aguacate extraído por cen-

trifugación es el mejor para la obtención de biodiesel. A este aceite se le sometió a reacciones de transesterificación para obtener la mezcla de alquilésteres de los ácidos grasos. Los resultados se muestran en la Figura 1b, en la cual se pueden observar las intensidades que son similares y picos definidos a un número de onda de $3008\text{-}3012\text{cm}^{-1}$ comparando con el estándar o control (aceite crudo sin la reacción de transesterificación) que corresponde a los dobles enlaces que constituyen a los compuestos químicos de olefinas (Coates 2000; Ghesti *et al.*, 2006; Pimentel *et al.*, 2006).

En las muestras transesterificadas (B1, B2, B3 y B4) se observa una banda ancha en la región $3100\text{-}3400\text{cm}^{-1}$ que corresponde a la tensión del enlace O-H que indica la presencia de grupos hidróxidos e hidroperóxidos (Hualí *et al.*, 2010), lo cual sugiere un exceso de alcohol en las muestras, debido a la reacción de transesterificación.

En los números de onda a 2853 , 2924 y 2953cm^{-1} que corresponden a los grupos funcionales $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$, respectivamente (Guillén y Cabo, 1998), se observa un incremento en estos picos a medida que los triacilglicéridos presentes en el aceite crudo se transesterifican. El control y las muestras transesterificadas presentan diferentes intensidades en estos números de onda. Por lo tanto, el tratamiento de transesterificación se realizó adecuadamente. Qiu *et al.* (2011) indicaron que el número de onda a $400\text{-}1500\text{cm}^{-1}$ que corresponde a los grupos funcionales que integran la región de la huella digital de los aceites, se corrobora la conversión por la reacción de transesterificación del aceite crudo a alquilésteres de ácidos grasos (biodiesel). Por ello, para un mejor análisis de los alquilésteres se amplificó y se dividió la escala espectral en tres regiones, I: $1180\text{-}1220\text{cm}^{-1}$, II: $1350\text{-}1400\text{cm}^{-1}$ y III: $1390\text{-}1500\text{cm}^{-1}$, las cuales se muestran en la Figura 2. En la Figura 2a se observa que el

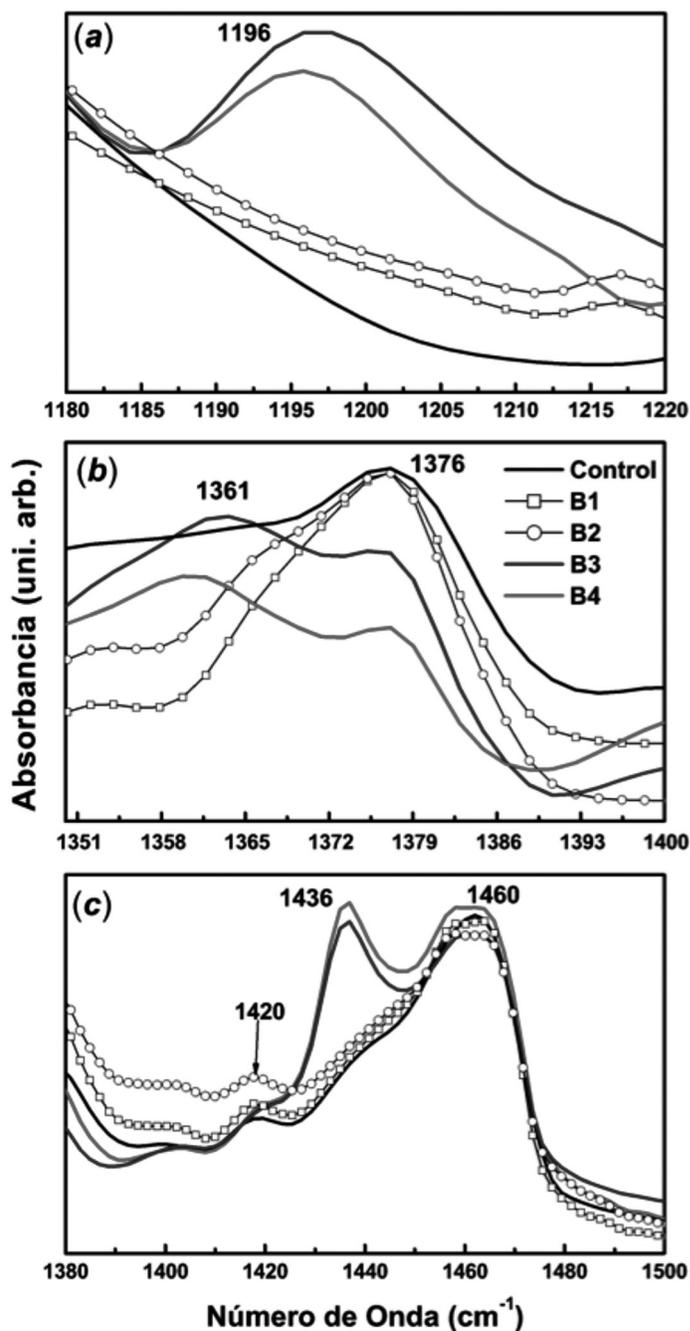


Figura 2. Amplificación de los espectrogramas de EITF de las muestras transesterificadas. a: para observar con detalle la banda alrededor de 1196cm^{-1} (región I), b: para observar el cambio en la banda a 1376cm^{-1} (región II) y c: para observar la banda a 1436cm^{-1} (región III).

control y las muestras transesterificadas con alcohol etílico más NaOH (B1) y alcohol etílico más KOH (B2) presentaron una menor intensidad en el número de onda a 1215cm^{-1} en comparación con las muestras donde se agregó metanol como disolvente (B3 y B4). Además, las muestras B3 y B4

presentaron un incremento de intensidad a 1196cm^{-1} que corresponde al grupo funcional metilo. Por lo tanto, el mejor disolvente para realizar la transesterificación es el metanol. En la Figura 2b se muestra que las muestras presentan metilésteres de ácidos grasos, debido a la intensidad en los

números de onda a 1361 y 1376 cm^{-1} , ambos asociados al grupo metilo (Wei-Bo, 2012). En las muestras B3 y B4 se observa una disminución en la intensidad en 1376 cm^{-1} , por lo que la reacción de transesterificación separó los ácidos grasos de los triacilgliceridos (Dubé *et al.*, 2004) en comparación con las muestras B1 y B2, en donde la reacción de transesterificación fue mínima. En la Figura 2c se puede ver los números de onda a 1420, 1436 y 1460 cm^{-1} que corresponden a los dobles enlaces *cis* y al grupo funcional metilo, respectivamente. Los tratamientos B1 y B2 tienen una menor intensidad en estos números de onda, comparándolos con el control y con las muestras B3 y B4 (1420 cm^{-1}). Por lo tanto, los ácidos grasos saturados e insaturados fueron transesterificados en B3 y B4 (1436 cm^{-1}) formando metilésteres de ácidos grasos (Ghazavi *et al.*, 2013).

Reacción de transesterificación, densidad y viscosidad del biodiesel

En la Tabla V se muestran los resultados del análisis de la densidad y de la viscosidad en las muestras transesterificadas de ácidos grasos del aceite de aguacate de la variedad Hass. Se observa que la viscosidad en las muestras B3 y B4 se encuentra dentro del parámetro reportado por la norma de los Estados Unidos (ASTM D6751-15, 2015) de 1,9-6,0 $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ y por aquella de la Unión Europea EN 14214 (Knothe *et al.*, 2005) de 3,5-5,0 $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Un valor en el límite máximo permitido por las normas estadounidenses en la viscosidad cinemática en el

biodiesel y mayor a la indicada por la norma europea, causa problemas de inyección (Knothe, 1999; Conceição *et al.*, 2007; Tesfa *et al.*, 2010). Por otra parte, las muestras B3 y B4 presentaron valores de densidad dentro del parámetro reportado por las normas ASTM D4052-11 (2015) e ISO 3675 (1998) de 0,860-0,900 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a 15°C, por lo que el biodiesel será eficaz en los sistemas de inyección de los motores y a baja temperatura no se solidificará, debido a que tiene una concentración adecuada de metilésteres insaturados. Benjumea *et al.* (2006) reportaron que a 16°C el biodiesel de aceite de palma formó cristales por su alta cantidad de metilésteres saturados (51,51%) y una baja concentración de insaturados (48,48%), e indicaron que esta concentración de metilésteres impide el flujo del combustible cuando la temperatura descende.

El biodiesel obtenido de la pulpa de aguacate de clase III de la variedad Hass (extraído por centrifugación) puede ser una opción para aprovecharse y obtener este biocombustible debido a que posee características fisicoquímicas similares a un biodiesel de marca comercial.

Conclusiones

El mejor resultado para la producción de biodiesel fue utilizando aceite crudo obtenido de la pulpa de aguacate de clase III de la variedad Hass extraído por centrifugación, con las reacciones de transesterificación B3 y B4, obteniendo metilésteres de ácidos similares a los que se encuentran en un producto de marca comercial. Por lo tanto, se sugiere la posibilidad de aprovechar el aceite de aguacate y utilizarlo como una alternativa bioenergética con un menor impacto en el medio ambiente.

TABLA V
DENSIDAD Y VISCOSIDAD
DE LOS FAMES (BODIESEL)

Muestra	ad ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	Densidad 15°C ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
B3	4,69 ±0,00 a	0,8756 ±0,00 a
B4	4,24 ±0,00 b	0,8860 ±0,00 b

Los valores son promedios de tres repeticiones ±DE. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

REFERENCIAS

- Aguilar G (2013) México desperdicia más de 10 mil toneladas de alimentos al año: <http://www.informador.com.mx/mexico/2013/497074/6/mexico-desperdicia-mas-de-10-mil-toneladas-de-alimentos-al-ano.htm>.
- Andrikopoulos NK, Kalogeropoulos N, Falirea A, Barbagianni MN (2002) Performance of virgin olive oil and vegetable shortening during domestic deep-frying and pan-frying of potatoes. *Int. J. Food Sci. Tech.* 37: 177-190.
- AOAC (1965) Refractive Indices of Sucrose Solutions at 20 Degrees C. In *Methods of Analysis*. 10^a ed. Association of Official Analytical Chemists, EEUU.
- AOAC (2006). *Official Methods of Analysis*. 25^a ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, EEUU.
- ASTM D4052-11 (2015) *Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter*. ASTM International. West Conshohocken, PA, EEUU. www.astm.org
- ASTM D6751-15 (2015) *Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*. ASTM International. West Conshohocken, PA, EEUU. www.astm.org
- Benjumea H, Pedro N, Chaves NG, Vargas R, Claudia M (2006) Efecto de la temperatura sobre la densidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diésel convencional *Energética* 36: 41-49.
- Bergougnou MA, Chinmoy B, Ernest KY (2009) Biodiesel production from jatropha curcas oil using potassium carbonate as an unsupported catalyst. *Int. J. Chem. Reactor Eng.* 7: A72.
- Bizimana V, Breene WM, Csallany AS (1993) Avocado oil extraction with appropriate technology for developing countries. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 70: 229-333.
- Bora PS, Narain N, Rocha RVM, Queiroz-Paulo M (2001) Characterization of the oils from the pulp and seeds of avocado (cultivar: Fuerte) fruits. *Grasas Aceites*. 52: 171-174.
- Buelvas SGA, Patiño GJH, Cano-Salazar JA (2012) Evaluación del proceso de extracción de aceite de aguacate Hass (*Persea americana* Mill) utilizando tratamiento enzimático. *Rev. Lasallista Inv.* 9: 138-150.
- Coates J (2000) Interpretation of infrared spectra, a practical approach. In Meyer RA (Ed.) *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Wiley. Chichester, RU. pp. 10815-10837.
- CODEX (1999) *Norma para los Aceites de Oliva Virgenes y Refinados y los Aceites Refinados de Orujo de Aceituna No Regulados por Normas Individuales*. FAO. Roma, Italia.
- Conceição MM, Candeia RA, Silva FC, Bezerra AF, Fernandes VJ, Souza AG (2007) Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 11: 964-975.
- Dorado MP, Ballesteros E, Almeida JA, Schellet C, Lohrlein HP, Krause R (2002). An alkalically catalyzed transesterification process for high free fatty acid oils. *Trans. ASAE*. 45: 525-529.
- Dubé MA, Zheng S, Mc Lean D, Kates M (2004) A comparison of attenuated total reflectance-FTIR spectroscopy and GPC for monitoring biodiesel production. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 81: 599-603.
- Gallo F (1993) Índice de madurez para piña cayena lisa, guanábana, pitaya amarilla y maracuyá. *Agro-Desarrollo* 4: 194-200.
- García AL, Alfaro MA, Bressani R (1987) Digestibility and nutritional value of crude oil from three amaranth species. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 64: 371-375.
- Ghazavi MA, Fallahpanah M, Jeshvaghani HS (2013) A feasibility study on beef tallow conversion to some esters for biodiesel production. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 4 pp.
- Gaydou EM, Lozano Y, Ratovohery J (1987) Triglyceride and fatty acid compositions in the mesocarp of *Persea americana* during fruit development. *Phytochemistry* 26: 1595-1597.
- Ghesti GF, Macedo JL, Braga V, de Souza TCP, de Souza ACI, Parente V, Figueredo ES, Resck IS, Dias JA, Dias SCL (2006) Application of Raman spectroscopy to monitor and quantify ethyl ester in soybean oil transesterification. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 83: 597-601.
- Guillén MD, Cabo N (1998) Infrared spectroscopy in the study of edible oils and fats. *J. Sci. Food Agric.* 75: 1-11.
- Hart FL, Fisher HJ (1991) *Análisis Moderno de los Alimentos*. Acribia. Zaragoza, España. 611 pp.
- Hernández MS (2001) *Conservación del Fruto de Arazá (Eugenia stipitata) durante la Poscosecha mediante la Aplicación de Diferentes Técnicas*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. pp. 103-144.

- Hong Y, Irudayaraj J (2000) Characterization of semisolid fats and edible oils by Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy. *JAOCS* 77: 291-295.
- Huali W, Haiying T, Steven S (2010) Analysis of sterol glycosides in biodiesel and biodiesel precipitates. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 87: 215-221.
- Imahara H, Minami E, Saka S (2006) Thermodynamic study on cloud point of biodiesel with its fatty acid composition. *Fuel* 85: 1666-1670.
- ISO 3675 (1998) *Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products. Laboratory Determination of Density*. International Organization for Standardization. Ginebra, Suiza.
- Ivanoiu A, Schmidt A, Peter F, Rusnac LM, Ungurean M (2011) Comparative study on biodiesel synthesis from different vegetable oils. *Chem. Bull.* 56: 94-98.
- Kader AA (1983) Postharvest Quality Maintenance of Fruits and Vegetables in Developing Countries. In Lieberman M (Ed.) *Postharvest Physiology and Crop Preservation*. Plenum. Nueva York, EEUU. pp. 520-436.
- Knothe G (1999) Rapid monitoring of transesterification and accessing biodiesel fuel quality by near-infrared spectroscopy using a fibre optic probe. *J Am. Oil Chem. Soc.* 76: 795-800.
- Knothe G (2007) Some aspects of biodiesel oxidative stability. *Fuel Proc. Technol.* 88: 669-677.
- Knothe G (2000) Monitoring a processing transesterification reaction by fibre-optic color near infrared spectroscopy with correlation to ¹H nuclear magnetic resonance. *J Am. Oil Chem. Soc.* 77: 489-493.
- Knothe G, Krahl J, Van Gerpen J (2005) *The Biodiesel Handbook*. AOCS Press. Champaign, IL, EEUU. pp. 130-133.
- Kumate RJ, Mercedes JL, Wolpert BE, Sepúlveda AJ, Fonseca AG, Bondani GA (1994) *Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos*. Secretaría de Salud. México. p. 492.
- Lin-Vien D, Colthup NB, Fateley WG, Grasselli JG (1991) *Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules*. Academic Press. Nueva York, EEUU. pp. 117-154.
- Londoño P, Mieres-Pitre A, Hernández EC (2012) Extracción y caracterización del aceite crudo de la almendra de durazno *Prunus pérsica*. *Av. Cs. Ing.* 3(4): 37-46.
- Ma F, Clements LD, Hanna MA (1998). The effect of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. *Trans. ASAE* 41: 1261-1264.
- Martínez VB, Solís JL, Zamarripa BA (2011). *Calidad Agroindustrial del Aceite de Higuierilla (Ricinus communis L.) para la Producción de Bioenergéticos*. Nota de investigación. Proyecto Desarrollo de Tecnologías Sustentables de Producción de Insumos Competitivos para la Obtención de Biocombustibles en México. INIFAP, México. www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/prensa/noticia-actual/99-calidad-agroindustrial-del-aceite-de-higuierilla-ricinus-communis-l-para-la-produccion-de-bioenergeticos.html (Cons. 10/01/2013).
- Matissek R, Schnepel FM, Steiner G (1998) *Análisis de los Alimentos: Fundamentos, Métodos, Aplicaciones*. Acribia. Zaragoza, España. pp. 297-302.
- Moreira SE (2012) Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. *Ingenium* 13(25): 53-61.
- NM (2012) *Alimentos -Aceites y Grasas Vegetales o Animales. Determinación de la Densidad Relativa -Método de Prueba. NMX-F-075-SCFI-2012*. Diario Oficial de la Federación, 10/05/2012. México.
- O'Donnell S, Demshemino I, Yahaya M, Nwadike I, Okoro L (2013) A review on the spectroscopic analyses of biodiesel. *Eur. Int. J. Sci. Technol.* 2: 137-146.
- Ortiz-Moreno A, Dorantes L, Galín-dez J, Guzmán RI (2003) Effect of different extraction methods on fatty acids, volatile compounds, and physical and chemical properties of avocado (Persea Americana Mill.) oil. *J. Agric. Food Chem.* 51: 2216-2221.
- Osterloh AG, Ebert WH, Held HS, Urban E (1996) *Lagerung von Obst und Südfrüchten*. Ulmer. Stuttgart, Alemania. 253 pp.
- Pimentel MF, Ribeiro GMG, da Cruz RS, Stra-gevitch L, Pacheco JGA, Teixeira LSG (2006) Determination of biodiesel content when blended with mineral diesel fuel using infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Microchem. J.* 82: 201-206.
- Pinzón IM-del-P, Fischer G, Corredor G (2007) Determinación de los estados de madurez del fruto de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims.). *Agron. Colomb.* 25: 83-95.
- Pryde EH (1983) Vegetable oil as diesel fuel: Overview. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 60: 1557-1558.
- Psomiadou E, Tsimidou M (2002) Stability of virgen olive. 2. Photo-oxidation studies. *J. Agric. Food Chem.* 50: 722-727.
- Qiu F, Li Y, Yang D, Xiaohua L, Ping S (2011) Biodiesel production from mixed soybean oil and rapeseed oil. *Appl. Energ.* 88: 2050-2055.
- Rachimoallah HM, Dyah AR, Ali Z, Dan IWS (2009) Production of biodiesel through transesterification of avocado (*Persea gratissima*) seed oil using base catalyst. *J. Tek. Mesin* 11: 85-90.
- Ramos MJ, Fernández CM, Casas A, Rodríguez L, Pérez Á (2009) Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresour. Technol.* 100: 261-268.
- Salinas FH (1993) *Análisis de Alimentos*. EDHASA. Barcelona, España. pp. 32-34.
- Sax IN, Lewis JR (1992) *Diccionario de Química y Productos Químicos*. Omega. Barcelona, España. pp. 3-8, 194, 283, 406, 470, 698, 921, 932, 959.
- Schuchardt U, Sercheli R, Vargas RM (1998) Transesterification of vegetable oils: a review. *J. Braz. Chem. Soc.* 9: 199-210.
- SIAP (2015). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/identidad/index.jsp
- Tesfä B, Mishra R, Gua F, Powles N (2010) Prediction models for density and viscosity of biodiesel and their effects on fuel supply system in CI engines. *Renew. Energ.* 35: 2752-2760.
- Van Gerpen J (2005) Biodiesel processing and production. *Fuel Proc. Technol.* 25: 1097-1107.
- Wei-Bo Z (2012) Review on analysis of biodiesel with infrared spectroscopy. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 16: 6048-6058.
- Zagonel GF, Peralta-Zamora P, Ramos LP (2004) Multivariate monitoring of soybean oil ethanolysis by FTIR. *Talanta* 63: 1021-1025.