



Desempeño de motores fuera de borda a dos tiempos utilizando biolubricantes de *Jatropha curcas* L.

Cesar A. Argueta-Hernández¹, Sonia Ruiz-González², Lourdes Adriano-Anaya², Miguel Salvador-Figuera², Isidro Ovando-Medina^{2*}

¹ Licenciatura en Sistemas Costeros, Universidad Autónoma de Chiapas. Puerto Madero, Chiapas, México.

² Instituto de Biociencias. Universidad Autónoma de Chiapas. Tapachula, Chiapas, México.

Resumen

Los motores fuera de borda de dos tiempos para embarcaciones menores son los más usados en los países pobres para la pesca de baja escala. El funcionamiento de dichos motores implica la lubricación a pérdida, es decir, que el lubricante se mezcla con el combustible y los residuos se expulsan al agua a través del escape. Para contribuir a la disminución de la contaminación de los cuerpos de agua se ha visualizado el desarrollo y uso de lubricantes de origen natural. En el presente trabajo se desarrollaron biolubricantes a partir del aceite de la semilla de *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae), mediante reacciones de transesterificación con alcoholes de cadena corta y posterior polimerización con etilenglicol. Los productos, formados por la mezcla de alquil ésteres y polietilenglicol ésteres de ácidos grasos, se caracterizaron fisicoquímicamente y se determinó su efecto sobre el desempeño de un motor de doble cilindro de 8 HP. Las características físicas y químicas de los biolubricantes son similares a las de otros lubricantes a base de aceites vegetales reportados previamente, aunque en viscosidad estuvieron por debajo de las normas oficiales mexicanas. El biolubricante fabricado con alcohol propílico permitió que el motor tuviera un desempeño similar a cuando se utilizó aceite mineral, manteniendo la presión en la cámara de combustión en niveles estadísticamente similares al aceite mineral y superiores a lo obtenido con el biolubricante fabricado con butanol. El rendimiento del motor funcionando con lubricante mineral fue superior ($t = 3.164$, $P=0.034$) a cuando se utilizó el biolubricante metílico, mientras que no hubo diferencias al utilizar los demás biolubricantes.

Palabras clave:

Lubricación
Motores fuera de borda
Jatropha curcas L.
Transesterificación

Keywords:

Lubrication
Outboard motors
Jatropha curcas L.
Transesterification

* Autor para correspondencia:

Instituto de Biociencias,
Universidad Autónoma de
Chiapas.
Boulevard Príncipe Akishino
s/n. Col. Solidaridad 2000.
C.P. 30798
Tapachula Chiapas, México.
Teléfono:
+52 962 6427972.
Correo-electrónico:
isidro.ovando@unach.mx

Performance of a two-stroke outboard engine using *Jatropha curcas* L. biolubricants

Abstract

Two-stroke outboard engines for smaller boats are the most used in poor countries for low-scale fishing. The operation of these motors involves loss lubrication, that is, the lubricant is mixed with the fuel and the debris is expelled into the water through the exhaust. In order to contribute to the reduction of the contamination of the water bodies, the development and use of lubricants of natural origin has been visualized. In the present work, biolubricants were developed from the oil of the seed of *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae), by transesterification reactions with short chain alcohols and subsequent polymerization with ethylene glycol, the products, consisting of a mixture of alkyl esters and polyethylene glycol esters of fatty acids, were characterized physicochemically and their effect on the performance of a double cylinder engine of 8 H.P. was determined. The physical and chemical characteristics of the biolubricants are similar to other lubricants based on previously reported vegetable oils, although in viscosity they were below the corresponding standards. The biolubricant made with propyl alcohol allowed the engine to perform similarly to mineral oil, maintaining the pressure in the combustion chamber at levels statistically similar to mineral oil and higher than that obtained with the biolubricant made with butanol. The performance of the engine running on mineral lubricant was higher ($t = 3.164$, $P=0.034$) than when using the methyl biolubricant, while there were no differences when using the other biolubricants.

1. Introducción

En la mayoría de los países en vías de desarrollo la pesca de baja escala se realiza con ayuda de embarcaciones menores que utilizan motores fuera de borda de dos tiempos (CONAPESCA, 2013). El funcionamiento de dichos motores implica la lubricación a pérdida, es decir, que el lubricante se mezcla con el combustible y los residuos se expulsan al agua a través del escape (Jilin et al., 2018). Para contribuir a la disminución de la contaminación de los cuerpos de agua, se ha visualizado el desarrollo y uso de lubricantes alternativos más eficientes, por lo que actualmente existe una gran variedad de aceites sintéticos que cubren los requisitos de desempeño, aunque persiste el problema de su baja degradabilidad (Syaima et al., 2015). Por lo anterior, una línea de investigación y desarrollo en crecimiento es la de los lubricantes biodegradables de origen natural (Singh et al., 2016).

Los biolubricantes a base de aceites vegetales tienen ventajas como mayor lubricidad y altos puntos de inflamación, en comparación con los aceites minerales (Khasbage et al., 2016), y se han evaluado extensamente en una variedad de motores a cuatro tiempos (Arroyo-Fabars et al., 2015), aunque los datos de su desempeño son escasos en motores con lubricación a pérdida como las cadenas de transmisión para manufactura de madera y los motores de combustión interna a dos tiempos para la silvicultura (motosierras), la jardinería (podadoras) y los fuera de borda para la pesca de baja escala. Entre las desventajas de los aceites vegetales para uso directo como lubricantes se encuentran la acumulación de gomas y residuos en el motor, y su baja viscosidad a altas temperaturas (Syaima et al., 2014). Una alternativa es la modificación química de los aceites mediante transesterificación con alcoholes de cadena corta para disminuir la producción de residuos (Karmakar et al., 2017), y a través de su polimerización, incrementar su viscosidad (Miao et al., 2014).

Por otra parte, *Jatropha curcas* L. es una planta rústica de la familia de las Euphorbiaceae (Salvador-Figueroa et al., 2015) a la cual también pertenecen la higuera (*Ricinus communis* L.) y el árbol de hule (*Hevea brasiliensis*). Su importancia radica en que acumula hasta 50% de aceite en su semilla (Salvador-Figueroa et al., 2015), con hasta 80% de ácidos grasos insaturados, lo que lo vuelve idóneo para la producción de biocombustibles (Adriano-Anaya et al., 2014), grasas lubricantes (Arroyo-Fabars et al., 2015) y biolubricantes (Bilal et al., 2013; De-Assunção-Nascimento et al., 2013; Navarro-Pineda et al., 2016).

Por lo anterior, en el presente trabajo se desarrollaron biolubricantes a partir del aceite de la semilla de *J. curcas* mediante reacciones de transesterificación con alcoholes de cadena corta y posterior polimerización con etilenglicol, se caracterizaron y se evaluaron en un motor fuera de borda a dos tiempos.

2. Materiales y métodos

2.1. Materia prima

Se cosecharon frutos de *J. curcas* de la accesión MAP-08 en estado de madurez fisiológica (frutos color amarillo y semillas color negro) en el Banco de Germoplasma del Instituto de Biociencias de la Universidad Autónoma de Chiapas, México (14.4976 N, 92.4774 O). Los frutos se despulparon, se extrajeron las semillas y se secaron al sol, posteriormente se descascararon manualmente y las almendras se molieron para obtener harina. Posteriormente se hicieron extracciones secuenciales sólido-líquido con hexano en proporción 1:4 (masa/volumen), descartando el precipitado por decantación para destilar el hexano y obtener el aceite crudo. La caracterización de las propiedades físicoquímicas del aceite se muestra a continuación: humedad (2.79%), índice de acidez (10.49%), índice de saponificación (175.74 mg g⁻¹), fósforo (51.79 mg kg⁻¹), índice de yodo (59.88 mg g⁻¹) y punto de fusión de 3.33 °C.

2.2. Preparación del biolubricante

Se prepararon cuatro tipos de biolubricantes mediante reacciones de doble transesterificación. El primer paso consistió en la obtención de alquil ésteres de ácidos grasos haciendo reaccionar el aceite con alguno de los siguientes alcoholes de cadena corta: metanol, etanol, propanol o butanol. Para esto se siguió el método reportado por Atabani et al. (2013), utilizando NaOH al 0.35% con respecto a la masa del aceite como catalizador. La reacción se llevó a cabo a 60 °C durante ocho horas, como lo describen Tapanes et al. (2008). En el Cuadro 1 se muestran las proporciones de aceite, alcohol y catalizador utilizados en cada reacción.

El segundo paso consistió en la transesterificación y polimerización de los cuatro alquil ésteres de ácidos grasos producidos previamente con etilén glicol a una relación molar de 3.5 a 1 y usando como catalizador KOH al 0.5% con relación a la masa de los alquil ésteres.

La reacción de polimerización se realizó durante 2.5 h a 70 °C (Bilal et al., 2013). En el Cuadro 2 se muestran las proporciones de reactantes para la fabricación del biolubricante. Las reacciones que se llevaron a cabo en dos pasos, los cuales se esquematizan en la Figura 1 A y B.

2.3. Caracterización del biolubricante de *J. curcas*

2.3.1. Densidad y viscosidad

La densidad se midió con un densímetro a 15 °C en unidades de kg m⁻³, mientras que la viscosidad de los biolubricantes se determinó en centiPoises (cP) por el método de la esfera (Sears y Zemansky, 1981), a temperatura ambiente (28 °C), colocando 500 mL del líquido en una probeta con altura de trabajo de 18 cm, se midió el tiempo de caída de una esfera de cristal y se calculó la viscosidad con la siguiente ecuación: $v = 2 * g (pe - pb) * r^2 / 9 vel.$

Dónde: v es la viscosidad en cP, g es la gravedad, pe es la densidad de la esfera, pb es la densidad del biolubricante, r es el radio de la esfera y vel es la velocidad de caída de la

esfera. Los resultados se convirtieron a centiStokes (cSt) con fines de comparación con otros trabajos. En ambos casos se siguieron los procedimientos de la Norma ASTM D 1298.

2.3.2. Punto de fusión

Las muestras de los biolubricantes (2.5 mL) fueron colocadas en tubos de ensayos y se congelaron a -70 °C, posteriormente se tomó aproximadamente 0.5 g del biolubricante sólido y se depositó en un vaso de precipitados conteniendo etanol absoluto frío. Se midió la temperatura a la que la muestra se fundió, según el procedimiento de la Norma ASTM D 97.

2.3.3. Punto de escurrimiento

Se colocaron 50 mL de los biolubricantes en recipientes de plástico de 100 mL y se pusieron en un congelador de -20 °C. Se observó hasta el momento que se solidificó y se tomó la temperatura. El punto de escurrimiento se consideró como la temperatura de solidificación más 3 °C, de acuerdo a lo sugerido por la Norma NOM-L-26-CT con algunas modificaciones descritas por Kamalakar et al. (2015).

2.3.4. Punto de inflamación

Las muestras de los biolubricantes (5 mL) fueron colocadas en un recipiente de metal y se calentaron mientras se registraba la temperatura a la cual la muestra ardía al acercar una chispa y la flama duraba al menos siete segundos. La determinación del punto de inflamación, se realizó basada en el procedimiento de la Norma NOM-L25 con algunas modificaciones descritas por Kamalakar et al. (2015).

2.3.5. Nitrógeno

Para esta determinación se agregó 0.5 g de muestra a un tubo de ensayos y añadieron 2 g de catalizador y 8 mL de H₂SO₄ para digestión a 420 °C durante 60 min. Posteriormente, la mezcla se transfirió a un vaso de precipitados y se añadió 80 mL de agua destilada y 50 mL de NaOH al 40 %. A continuación, se destiló la muestra recibiendo el destilado en 25 mL de H₃BO₃ al 4 % hasta que alcanzó un volumen de 100 ml y viró a color verde. Finalmente, se titularon las

muestras con una solución de HCl valorada hasta viraje a color rosa claro. Se calculó el porcentaje de nitrógeno utilizando la ecuación: $N (\%) = \frac{(HCl\ muestra - HCl\ blanco) \cdot Conc \cdot meq \cdot 100}{Peso\ de\ la\ muestra}$.

Dónde: *N* es el contenido de nitrógeno (%), *HCl muestra* es el volumen (mL) de titulante gastado con la muestra, *HCl blanco* es el volumen de titulante (mL) gastado con un blanco sin muestra, *Conc* es la normalidad del titulante (0.1 N) y *meq* son los miliequivalentes de nitrógeno (0.014). La composición de nitrógeno se determinó siguiendo el procedimiento de la Norma ASTM-D-3228 con el método de Kjeldahl (Herchi et al., 2015).

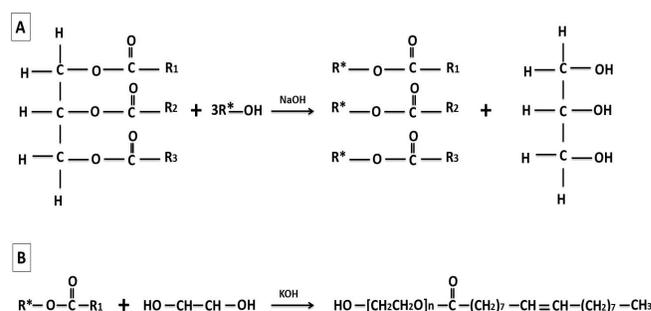


Figura 1. Reacciones de doble transesterificación para la producción de un biolubricante poli-etilenglicol-éster de ácidos grasos a partir de aceite de *J. curcas* L. A) Reacción de transesterificación entre una molécula de triglicérido conteniendo distintos ácidos grasos (R1, R2, R3) y tres moléculas del alcohol de cadena corta (R* = -CH₃ o -CH₂CH₃ o -CH₂CH₂CH₃ o -CH₂CH₂CH₂CH₃) para producir el alquil éster de los ácidos grasos más glicerol. B) Reacción de transesterificación entre un alquil éster de ácido graso (en el ejemplo se asume que es metil éster de ácido oleico) y el etilén glicol para producir poli (etilén glicol) éster oleato.

Cuadro 1. Proporciones de aceite de <i>Jatropha curcas</i> L. y alcoholes de cadena corta utilizados en reacciones de transesterificación.					
		Metanol	Etanol	Propanol	Butanol
Peso molecular (g mol ⁻¹)	Aceite	874	874	874	874
	Alcohol	32.04	46.07	60.09	74.121
Densidad (g cm ⁻³)	Aceite	0.91	0.91	0.91	0.91
	Alcohol	0.792	0.789	0.79	0.8098
Volumen (mL)	Aceite	1000	1000	1000	1000
	Alcohol	252.7	364.8	475.2	571.8
Volumen total (L)	Solución	1.25273	1.3648	1.4752	1.5718
Masa (g)	Aceite	910	910	910	910
	Alcohol	200.16216	287.8272	375.408	463.04364
Molaridad (mol L ⁻¹)	Aceite	0.83113674	0.76288828	0.70579578	0.66241884
	Alcohol	4.98691532	4.57767132	4.23497075	3.97450794
Relación molar Alcohol:Aceite		6.0001	6.0004	6.0003	6
T. ebullición Alcohol (°C)		64.7	78	97	118

Cuadro 2. Proporciones de reactantes etilenglicol y alquil-ésteres de ácidos grasos de *Jatropha curcas* L. para la fabricación de un biolubricante.

		Metanol	Etanol	Propanol	Butanol
Peso molecular (g mol ⁻¹)	Alquiléster	591	605	619	633
	Etilenglicol	62.07	62.07	62.07	62.07
Densidad (g cm ⁻³)	Alquiléster	0.884	0.887	0.91	0.908
	Etilenglicol	1.100	1.100	1.100	1.100
Volumen (mL)	Alquiléster	400	400	400	400
	Etilenglicol	120.0	118.0	118.0	114.0
Volumen total (L)	Solución	0.52	0.518	0.518	0.514
Masa (g)	Alquiléster	353.6	354.8	364	363.2
	Etilenglicol	132	129.8	129.8	125.4
Molaridad (mol L ⁻¹)	Alquiléster	1.15059222	1.13213568	1.13522246	1.11629508
	Etilenglicol	4.08967543	4.03704125	4.03704125	3.93054409
Relación molar Etilenglicol:Alquilester		3.5544	3.5659	3.5562	3.5211

2.3.6. Índice de yodo

Se aplicó el método reportado en la norma NMX-F-152-S-1981, para lo cual se pesó la muestra contenida en un matraz a peso constante y al que previamente se añadió 20 mL de tetracloruro de carbono. Se agregaron 25 mL de solución de Wijs y con movimiento circular se aseguró la homogeneización. Se guardó el matraz en oscuridad por 30 min a 25 °C, después de lo cual se adicionaron 20 mL de KI al 15%, se mezcló y se añadieron 100 mL de agua destilada. Se tituló con tiosulfato de sodio 0.1 N hasta que el color amarillo casi desapareció, se adicionó 1 mL de solución indicadora de almidón y se prosiguió la titulación hasta la desaparición del color azul. Se aplicó la siguiente ecuación para conocer el índice de yodo: $IY=(Vt-Vm)N*Eq/P$.

Dónde: *Vt* es el volumen de titulante para el blanco (mL), *Vm* es el volumen de titulante para la muestra (mL), *N* es la normalidad de la solución de tiosulfato de sodio, *Eq* son los equivalentes de yodo (12.69), y *P* es la masa de la muestra (g).

2.3.7. Índice de saponificación

Siguiendo la norma NMX-F-174-S-1981, se determinó la cantidad (mg) de KOH necesarios para saponificar 1 g de biolubricante. Para ello se colocó la muestra en un matraz Erlenmeyer, al que se agregaron 50 mL de KOH en solución alcohólica y se colocó en baño de agua durante 30 min, con agitación. Se permitió la saponificación por 60 min adicionales, después de lo cual se agregó 1 mL de fenoltaleína al 1.0 % y se tituló en frío con HCl 0.5 N. Se manejó un testigo sin muestra. Se calculó el índice de saponificación con la siguiente ecuación: $IS=V1-V2*Eq/P$.

Dónde: *IS* es el índice de saponificación, *V1* es el volumen de titulante para el testigo (mL), *V* es el volumen de titulante para la muestra (mL), *P* es la masa de la muestra (g), y *Eq* es la masa de KOH equivalente a 1 mL de HCl 0.5 N (28.05 mg).

2.3.8. Materia volátil

Para la determinación de materia volátil (MV) se colocaron 5 g de biolubricante en un matraz Erlenmeyer a peso

constante y se colocó en un horno a 100 °C durante 10 min. Posteriormente se enfrió la muestra en desecador por 60 min y se pesó en balanza analítica. Se aplicó la siguiente ecuación: $MV(%)=Pi-Pf/Pi*100$.

Dónde: *Pi* es el peso inicial de la muestra (g), y *Pf* es el peso final de la muestra (g), según lo descrito en la Norma ASTM D 5800.

2.4. Pruebas en motores

Se utilizó un motor Yamaha® fuera de borda de 8 HP, dos cilindros, a dos tiempos enfriado por agua, con bujías Yamaha® de platino, con el fin de evaluar su desempeño funcionando con cada uno de los cuatro biolubricantes. La mezcla combustible:lubricante para cada prueba fue 50:1 (1 L de gasolina Magna® PEMEX® de 87 octanos más 20 mL del biolubricante). Cada prueba consistió en la puesta en marcha del motor bajo condiciones de estanque de 100 L de agua, a 800 rpm, hasta agotar 600 mL de combustible/biolubricante. Para evitar el efecto de arrastre se diseñó un experimento de medidas repetidas, el cual consiste en evaluar todos los factores (incluyendo al control) en un mismo sujeto (Bendayan et al., 2014), con cuatro tratamientos y tres repeticiones, en el cual siempre hubo una limpieza de bujías y pre-evaluación del motor y la puesta en marcha del motor utilizando 600 mL de una mezcla del combustible con lubricante mineral (Mobil® para motores fuera de borda Yamaha®).

Se determinó la compresión (psi) de los dos cilindros antes y al final de cada prueba y se calculó el delta de presión (%) con respecto a la pre-prueba (la puesta en marcha del motor previa a la evaluación) y con respecto al lubricante mineral. Adicionalmente se calculó el rendimiento del motor con base en el tiempo de funcionamiento por cada litro de la mezcla combustible/biolubricante.

2.5. Análisis estadístico

Los datos de características físicas, de composición de los biolubricantes y de contenido de materia oleosa se

procesaron por análisis de varianza convencional (ANOVA) y comparación de medias (Tukey $\alpha=0.05$). Los datos de delta de presión de los cilindros se analizaron por ANOVA de medidas repetidas y donde se encontraron diferencias estadísticamente significativas se compararon las medias por el método de Tukey ($\alpha=0.05$). Los datos de rendimiento del motor se analizaron por *t* de Student, probando la hipótesis de igualdad de medias entre tratamientos apareados (biolubricante individual vs. lubricante mineral). Para todos los análisis se utilizó el programa XLStat© versión 2015.

3. Resultados

3.1. Características de los biolubricantes

Los cuatro biolubricantes preparados presentaron diferencias significativas en las características físicas evaluadas, excepto en el punto de fusión (Cuadro 3). Respecto a la densidad, ningún biolubricante fue similar a otro, siendo el preparado con alcohol metílico el más denso ($F=807.6, P<0.0001$). Se encontraron diferencias entre el biolubricante preparado con alcohol butílico y el resto de tratamientos en las características punto de escurrimiento ($F=91.7, P<0.0001$), punto de inflamación ($F=61.4, P<0.0001$) y viscosidad ($F=22.4; P<0.0001$).

Los cuatro biolubricantes preparados presentaron diferencias significativas en las características químicas, índice de saponificación ($F=169.08; P<0.0001$) y materia volátil ($F=169.089; P<0.0001$), mientras que en nitrógeno e índice de yodo fueron estadísticamente similares (Cuadro 4).

3.2. Desempeño del motor

El análisis de varianza de medidas repetidas mostró que la presión de la cámara de combustión varió según el tipo de biolubricante utilizado (Cuadro 5).

En la Figura 2 se observa el delta de presión entre el estado previo del motor y el estado posterior a la prueba con los biolubricantes; se encontró que el desempeño del motor mejora cuando se usan los biolubricantes, excepto en el caso del butílico, el cual ocasiona una mayor pérdida de presión comparado con el resto de biolubricantes.

Cuando se comparó el desempeño del motor funcionando con biolubricantes y con aceite mineral se encontró que con el biolubricante propílico la presión en los cilindros fue similar a la alcanzada en las pruebas con aceite mineral. Por su parte, el biolubricante butílico mostró una caída de presión de casi 10% con respecto a la del aceite mineral (Figura 3).

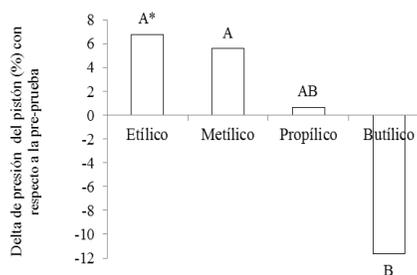


Figura 2. Delta de presión del pistón (%) con respecto a la pre-prueba. * Letras distintas sobre cada una de las determinaciones indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha=0.05$).

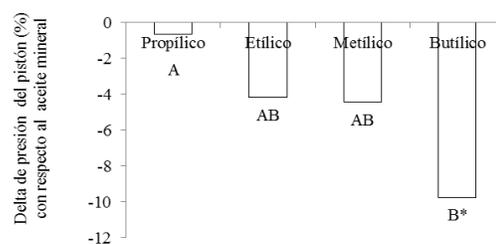


Figura 3. Delta de presión del pistón (%) con respecto al aceite mineral. * Letras distintas indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha=0.05$).

La comparación pareada del rendimiento del motor con biolubricante y con aceite mineral se muestra en la Figura 4. Se encontró que la media de rendimiento con aceite mineral fue superior a la encontrada con biolubricante metílico ($t=3.164, P=0.034$), mientras que no hubo diferencias en las comparaciones etílico-mineral ($t=0.198, P=0.853$), propílico-mineral ($t=-1.060, P=0.349$) y butílico-mineral ($t=1.958, P=0.122$).

4. Discusión

Considerando que las reacciones químicas tienen rendimientos variables y por el hecho de que no fueron purificados, se postula que los biolubricantes preparados están formados principalmente por poli-etilenglicol-éster de ácidos grasos mezclados con alquil ésteres de ácidos grasos, alcoholes de cadena corta y aceite de *J. curcas* residual, por lo cual sus características son producto de dicha mezcla.

Cuadro 3. Características físicas de biolubricantes a base de aceite de *Jatropha curcas* L.

Biolubricante	Densidad (kg m ⁻³)	Punto de fusión (°C)	Punto de escurrimiento (°C)	Punto de inflamación (°C)	Viscosidad cinemática (cSt)
Metílico	910.00 ^a	12.667 ^a	-1.333 ^b	168.333 ^a	14.06 ^a
Etílico	907.66 ^b	12.667 ^a	-2.000 ^b	168.000 ^a	17.97 ^a
Propílico	887.66 ^c	16.000 ^a	-2.000 ^b	166.333 ^a	15.21 ^a
Butílico	884.00 ^d	13.667 ^a	6.667 ^a	156.000 ^b	7.12 ^b

^{a-d} Letras distintas sobre cada una de las determinaciones indican diferencia estadísticamente significativa entre las medias (Tukey, $\alpha=0.05$).

Cuadro 4. Características químicas de biolubricantes a base de aceite de *Jatropha curcas* L.

Tratamientos	Nitrógeno (%)	Índice de yodo (mg I g ⁻¹)	Índice de saponificación (mg KOH g ⁻¹)	Materia volátil (%)
Metílico	0.363 ^a	63.021 ^a	178.661 ^a	3.415 ^c
Etílico	0.430 ^a	61.566 ^a	178.190 ^{ab}	6.643 ^b
Propílico	0.364 ^a	63.526 ^a	175.559 ^b	17.147 ^a
Butílico	0.430 ^a	57.492 ^a	160.552 ^c	4.064 ^c

^{a-c} Letras distintas sobre cada una de las determinaciones indican diferencia estadísticamente significativa entre las medias (Tukey, $\alpha=0.05$).

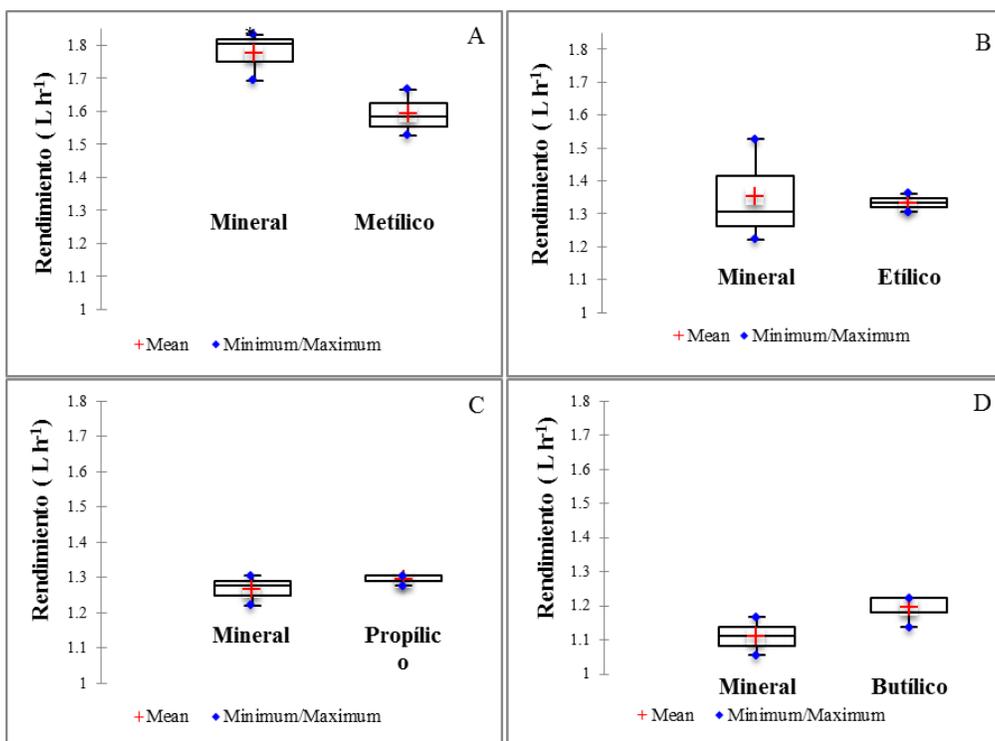


Figura 4. Diagrama de caja y bigote de la comparación del rendimiento de un motor fuera de borda funcionando con aceite mineral y con biolubricantes a base de aceite de *J. curcas* L. A: Metílico-mineral, B: Etílico-mineral, C: Propílico-mineral, D: Butílico-mineral. * Indica diferencia estadísticamente significativa entre las medias (*t* de Student).

Cuadro 5. Análisis de varianza de medidas repetidas de la variable delta de presión (%) en la cámara de combustión de un motor fuera de borda a dos tiempos funcionando con cuatro biolubricantes a base de aceite de *Jatropha curcas* L.

Fuente de Variación	gl	SC	CM	F	P
Tratamiento	3	1274.869	6.741	6.741	0.003
Error	20	1260.856	63.043		
Total	23	2535.724			

gl: grados de libertad, SC: suma de cuadrados, CM: cuadrado medio

No obstante, tuvieron características similares a los de otros lubricantes de origen vegetal como el de ricino (Sánchez Martínez, 2011), palma (Lim, 2012) y soya (Sharma et al., 2006), y reúnen las características para sustituir a los lubricantes minerales. Una de las variables en las que difirieron los cuatro tipos de lubricantes fue la densidad (Cuadro 3), sin embargo, todos están en el rango que ha sido

reportado para productos de transesterificación simple de aceite de *J. curcas*. Por ejemplo, en un estudio realizado por Talib y Rahim (2014), se reporta que la densidad de un biolubricante de *J. curcas* fue de 908.8 kg m⁻³, y Gulzar et al. (2016) reportaron una densidad de 834 kg m⁻³ para una mezcla de combustible diesel con aceite de *J. curcas* que se utilizó como lubricante para un motor diesel. Asimismo, Bilal et al. (2013) reportaron una densidad de 889.7 kg m⁻³ para un biolubricante de *J. curcas* obtenido mediante doble transesterificación. Entre las características más importantes de un lubricante para motor se encuentran el punto de fusión y el punto de escurrimiento, ya que son indicadoras del rango de temperatura al cual el lubricante se mantiene líquido. Considerando los resultados, los biolubricantes fabricados en este trabajo son adecuados para la región tropical, ya que tienen punto de escurrimiento relativamente altos (de -1.3 a 6.0 °C). Otros lubricantes hechos a base de *J. curcas* han presentado puntos de escurrimiento más altos, como en el

estudio de Bilal et al. (2013) que encontró un valor de $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ o en el trabajo de Gunam-Resul et al. (2012), donde se reportó un valor de $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. No obstante, Arbain y Salimon (2010) reportaron un punto de escurrimiento tan alto como $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Respecto al punto de fusión, también se encontraron valores relativamente altos (rango de 12.6 a $16.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) con respecto a los aceites minerales comerciales, pero similar a lo reportado para metil ésteres de ácidos grasos de palma africana ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$; Benavides et al., 2008). Respecto a la característica punto de inflamación, los tratamientos fueron estadísticamente similares y con valores por debajo de $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, los cuales son menores a los reportados por Kalhapure et al. (2016), quienes evaluaron biolubricantes de aceite de soya y de algodón, encontrando que su punto de inflamación fue de $254\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $234\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. El bajo punto de inflamación puede deberse a los alcoholes residuales en los biolubricantes. El índice de yodo fue similar en los cuatro biolubricantes, lo cual es congruente con el hecho de que es una propiedad de la materia prima (cantidad de dobles enlaces) que no cambia con las reacciones llevadas a cabo. Los valores encontrados para dicha variable (57.5 a 63.5 mg I g^{-1}) fueron similares a lo reportado para el aceite crudo de *J. curcas* (59.88 mg I g^{-1} ; Castillo-Fong, 2016). Otra propiedad que no cambió entre tratamientos fue el contenido de nitrógeno (rango de 0.36 a 0.43%), ya que su valor depende del proceso de extracción del aceite y del contenido de proteína de la materia prima. Respecto al índice de saponificación, los valores fueron similares a lo reportado por Sun et al. (2008) ($194.35\text{ mg KOH g}^{-1}$) para aceite de semillas de algodón, lo cual indica que la cantidad de ácidos grasos libres no fue elevada. Por su parte, la elevada cantidad de materia volátil en los biolubricantes (de 3.4 a 17%) pudo deberse a los alcoholes sin reaccionar y residual de las reacciones de doble transesterificación. Un biolubricante a base de metil ésteres de ácidos grasos de *J. curcas* presentó un nivel marginal de materia volátil (0.047%), según el estudio de Choudhury et al., (2014).

La característica más relevante en un biolubricante es la viscosidad, ya que de eso depende su habilidad para reducir la fricción entre las partes de metal. En general, los valores de viscosidad de los biolubricantes fue baja (7.1 - 17 cSt) si se compara con los aceites minerales, aunque similar a lo reportado para otros biolubricantes a base de *J. curcas*, como lo encontrado con aceite de piñón epoxidado, que tuvo una viscosidad de 11.22 cSt (Shashidhara y Jayaram, 2012). En el caso del biolubricante fabricado con alcohol butílico fue insuficiente para actuar como sellador del paso de combustible entre el anillo del pistón y el cilindro, lo cual pudo ser la causa de la caída de presión observada en la cámara de combustión del motor con este tratamiento.

5. Conclusión

El motor fuera de borda funcionando con los biolubricantes de *J. curcas* fabricados con alcohol metílico, etílico o propílico presentó un desempeño similar a cuando se hizo funcionar con aceite mineral. Las características de los

biolubricantes obtenidos por doble transesterificación y polimerización del aceite de *J. curcas* presentan características que los sitúan por debajo de los estándares para lubricantes de motores, pero son similares a otros biolubricantes de origen vegetal.

Agradecimientos

Los autores agradecen al taller de motores fuera de borda "SERVICIO GUÍZAR" y a su propietario, el Sr. Enrique Guízar Cigarroa por la ayuda brindada para la realización de pruebas en los motores.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Adriano-Anaya ML, Gómez-Pérez JA, Ruiz-González S, Vázquez-Ovando JA, Salvador-Figueroa M, Ovando-Medina I. 2014. Oleosomas de semillas de *Jatropha curcas* L. como estimadores de diversidad en poblaciones del Sur de México. *Grasas y Aceites* 65(3): e031.
- Arbain NH, Salimon J. 2010. Synthesis and characterization of ester trimethylolpropane based *Jatropha curcas* oil as biolubricant base stocks. *Journal of Science and Technology* 2(2): 47-58.
- Arroyo-Fabars JM, Velázquez, MD, Lafargue-Pérez F. 2015. Formulación de grasas lubricantes utilizando como medio dispersante aceite de *Jatropha curcas* L. *Tecnología Química* 35(1): 73-80.
- Atabani AE, Silitonga AS, Ong HC, Mahlia TMI, Masjuki HH, Badruddin IA, Fayaz H. 2013. Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18: 211-245.
- Benavides AY, Benjumea PN, Agudelo JR. 2008. El fraccionamiento por cristalización del biodiesel de aceite de palma como alternativa para mejorar sus propiedades de flujo a baja temperatura. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 43: 7-17.
- Bendayan R, Arnau J, Blanca MJ, y Bono R. 2014. Comparison of the procedures of Fleishman and Ramberg et al. for generating non-normal data in simulation studies. *Anales de Psicología* 30(1): 364-371.
- Bilal S, Nuhu M, Kasim SA. 2013. Production of biolubricant from *Jatropha curcas* seed oil. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science* 4(6): 72-79.
- Castillo-Fong C. 2016. Capacidad de los extractos enzimáticos de *Bromelia pinguin* para eficientizar la extracción de aceite de las semillas de *Jatropha curcas* L. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapas. México.
- Choudhury HA, Goswami PP, Malani RS, Moholkar VS. 2014. Ultrasonic biodiesel synthesis from crude *Jatropha curcas* oil with heterogeneous base catalyst: Mechanistic insight and statistical optimization. *Ultrasonics Sonochemistry* 21(3): 1050-1064.

- CONAPESCA. 2013. Anuario estadístico de acuicultura y pesca. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. México.
- De-Assunção-Nascimento JC, Lafargue-Pérez F, Barrera-Vaillant N, Díaz-Velázquez M, Rodríguez-Martínez C. 2013. Caracterización de una biograsa de aceite vegetal de *Jatropha curcas* L y jabón de litio. *Ingeniería Mecánica* 16(2): 171-177.
- Gulzar M, Masjuki HH, Varman M, Kalam MA, Zulkifli NWM, Mufti RA, Arslan A. 2016. Effects of biodiesel blends on lubricating oil degradation and piston assembly energy losses. *Energy* 111: 713-721.
- Gunam-Resul MFM, Ghazi MTI, Idris A. 2012. Kinetic study of *Jatropha* biolubricant from transesterification of *Jatropha curcas* oil with trimethylolpropane: effects of temperature. *Industrial Crops and Products* 38: 87-92.
- Herchi W, Bahashwan S, Sebei K, Saleh HB, Kallel H, Boukhchina S. 2015. Effects of germination on chemical composition and antioxidant activity of flaxseed (*Linum usitatissimum* L) oil. *Grasas y Aceites* 66(1): 57.
- Jilin L, Dashuai Z, Xiwen D, Yuhua, Feng Z, Yongzhong Y. 2018. Influence of piston ring component structural parameters on diesel engine blow-by and oil consumption. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 34(5): 54-62.
- Kalhapure MA, Mhaske VM, Bajaj DS. 2016. Tribological evaluation of vegetable oils as a multi-cylinder engine lubricant. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 3(1): 68-72.
- Kamalakar K, Manoj GS, Prasad RBN, Karuna MSL. 2015. Thumba (*Citrullus colocynthis* L.) seed oil: a potential biolubricant base-stock. *Grasas y Aceites* 66(1): e055.
- Karmakar G, Ghosh P, Sharma BK. 2017. Chemically modifying vegetable oils to prepare green lubricants. *Lubricants* 5(4): 44.
- Khasbage S, Patil V, Dhande D. 2016. Performance of *Jatropha* biolubricant for hydrodynamic journal bearing lubrication. *International Research Journal of Engineering and Technology* 3(7): 627-632.
- Lim TK. 2012. *Elaeis guineensis*. En: Lim TK (ed). *Edible Medical and Non-Medical Plants*. Springer, Dordrecht. Pp. 335-392.
- Miao S, Wang P, Su Z, Zhang S. 2014. Vegetable-oil-based polymers as future polymeric biomaterials. *Acta Biomaterialia* 10(4): 1692-1704.
- Navarro-Pineda FS, Baz-Rodríguez SA, Handler R, Sacramento-Rivero JC. 2016. Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 247-269.
- NMX-F-152-S-1981. Alimentos para humanos. Aceites y grasas vegetales o animales. Determinación del índice de Yodo por el método de Wijs. Normas mexicanas. Dirección general de normas. México.
- NMX-F-174-S-1981. Alimentos para humanos. Determinación del índice de saponificación en aceites y grasas vegetales o animales. Normas mexicanas. Dirección general de normas. México.
- Sánchez Martínez R. 2011. Formulación y procesado de oleogeles para el desarrollo de nuevas grasas lubricantes biodegradables. Tesis de Doctorado. Universidad de Huelva, España.
- Salvador-Figueroa M, Magaña-Ramos J, Vázquez-Ovando JA, Adriano-Anaya ML, Ovando-Medina I. 2015. Genetic diversity and structure of *Jatropha curcas* L. in its centre of origin. *Plant Genetic Resources* 13(1): 9-17.
- Sears F, Zemansky M. 1981. *Física General*. Editorial Aguilar. Madrid, España.
- Sharma BK, Adhvaryu A, Perez JM, Erhan SZ. 2006. Biobased grease with improved oxidation performance for industrial application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(20): 7594-7599.
- Shashidhara YM, Jayaram SR. 2012. Tribological studies on AISI 1040 with raw and modified versions of pongam and *Jatropha* vegetable oils as lubricants. *Advances in Tribology*. 2012: Article ID 560175.
- Singh Y, Singla A, Kumar A, Kumar D. 2016. Friction and wear characteristics of *Jatropha* oil-based biodiesel blended lubricant at different loads. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 38(18): 2749-2755.
- Sun J, Ju J, Ji L, Zhang L, Xu N. 2008. Synthesis of biodiesel in capillary microreactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 47(5): 1398-1403.
- Syaima MT, Ong KH, Noor IM, Zamratul MIM, Brahim SA, Hafizul MM. 2015. The synthesis of bio-lubricant based oil by hydrolysis and non-catalytic of palm oil mill effluent (POME) using lipase. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44: 669-675.
- Syaima MTS, Zamratul MIM, Noor Ishenny Mohd, Rifdi WMWT. 2014. Development of bio-lubricant from *Jatropha curcas* oil. *International Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engineering* 1(1): 10-2.
- Talib N, Rahim EA. 2014. The performance of modified jatropha-oil based trimethylolpropane (TMP) ester on tribology characteristics for sustainable metalworking fluids (MWFs). *Applied Mechanics and Materials* 660: 357-361.
- Tapanes NCO, Aranda DAG, de Mesquita Carneiro JW, Antunes OAC. 2008. Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: theoretical and experimental studies of biodiesel reaction. *Fuel* 87(10): 2286-2295.