

PROPIEDADES AGROPRODUCTIVAS DE *Ricinus communis* L. Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL ACEITE

AGROPRODUCTIVE PROPERTIES OF *Ricinus communis* L. AND PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERIZATION OF ITS OIL

Cuellar-Sánchez A.¹; Carrillo-González R.¹; Delgado-Alvarado A.², González-Chávez M. del C.A.^{1*}

¹ Posgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 56230. Tel. 01(595) 952-0200 Ext. 1264. ² Postgrado en Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional, Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla No. 25. Santiago Momoxpan, Municipio San Pedro Cholula, Estado de Puebla. CP 72760 Puebla, Puebla, México. Tel. 01(222) 285-1442 Ext. 2026.

*Autor de correspondencia: carmeng@colpos.mx

RESUMEN

Se determinaron propiedades agroproductivas de siete accesiones de *Ricinus communis* L. y características fisicoquímicas de su aceite como materia prima de biodiesel. La accesión SF6 tuvo mayor número de racimos (34), número de cápsulas (1453), peso de cápsula por planta (1324 g), cáscara (69%) y aceite (48%) pero menor tamaño de semilla (6.8 mm de diámetro medio geométrico). Las semillas de la accesión C fueron de tamaño mayor (74 g y 95 mL por 100 semillas), sin embargo, tuvo menor rendimiento de semilla (326 g por planta). Las accesiones Mir y SF7 obtuvieron el mayor peso de cápsulas por planta (1518 y 1595 g), semilla (49%), rendimiento de semilla (742 y 796 g) y rendimiento estimado de semilla (808 y 867 kg ha⁻¹). En cuanto a características fisicoquímicas del aceite de ricino las accesiones de C, SF7 y M2 estuvieron dentro de los estándares de calidad, sin embargo, la SF7 (proveniente de sitios contaminados con residuos de minería) destacó por su elevada producción estimada de aceite (362 kg ha⁻¹); registrando propiedades fisicoquímicas adecuadas para producción de biodiesel: densidad relativa (0.96 g mL⁻¹), viscosidad (410.7 cSt), índices de refracción (1.47), de yodo (83.5 g I₂ 100 g⁻¹) y de saponificación (184.1 mg g⁻¹), que hacen recomendable su producción para biodiesel.

Palabras clave: aceite de ricino, biodiesel, higuera, morfología, rendimiento.

ABSTRACT

Agroproductive properties from seven accessions of *R. communis* L., and physical-chemical characteristics of their oil as raw matter for biodiesel, were determined. The accession SF6 had a greater number of racemes (34), number of capsules (1453), weight of the capsule per plant (1324 g), skin (69 %) and oil (48 %), but smaller size of the seed (6.8 mm of mean geometric diameter). The seeds from accession C were larger (74 g and 95 mL for 100 seeds); however, it had lower seed yield (326 g per plant). Accessions Mir and SF7 obtained the highest capsule weight per plant (1518 and 1595 g), seed (49 %), seed yield (742 and 796 g) and estimated seed yield (808 and 867 kg ha⁻¹). In terms of physical-chemical characteristics of the castor oil, the accessions C, SF7 and M2 were within the quality standards; however, SF7 (from sites contaminated with mining residues) stood out because of its high estimated oil production (362 kg ha⁻¹), showing adequate physical-chemical properties for biodiesel production: relative density (0.96 g mL⁻¹), viscosity (410.7 cSt); refraction (1.47), iodine (83.5 g I₂ 100 g⁻¹) and saponification (184.1 mg g⁻¹) indexes; which make it advisable for biodiesel production.

Keywords: Castor oil, biodiesel, morphology, yield.

Agroproductividad: Vol. 9, Núm. 3, marzo, 2016, pp. 73-78.

Recibido: enero, 2016. **Aceptado:** marzo, 2016.

Agroproductividad de las plantas y características de las semillas

A los nueve meses posteriores al sembrado, se consideraron los siguientes descriptores: precocidad, altura, área de goteo (tomando en cuenta cuatro radios de la sombra de cada arbusto), número de nudos, número de racimos por planta, longitud del primer racimo (cm), peso de cápsulas por racimo (g), porcentaje de cáscara (%), porcentaje de semilla (%), peso de cápsulas por planta (g), rendimiento de las semillas (g) y rendimiento estimado de semilla por unidad de área (kg ha^{-1}). Para el cálculo de este último se asumió una densidad de 1089 plantas ha^{-1} . La forma y el tamaño de las semillas se determinaron con: el volumen y peso de 100 semillas, número de semillas por kg, diámetro medio aritmético (Da), diámetro medio geométrico (Dg), esfericidad (Mohsenin, 1986) y volumen de cada semilla (cm^3 ; Jain y Bal, 1997). El contenido de aceite de ricino se llevó a cabo con un extractor de grasas y aceites Soxhlet con hexano (100 mL) (Ruiz-Olivares *et al.*, 2013) para calcular la producción estimada de aceite por unidad de área (kg ha^{-1}).

Propiedades fisicoquímicas del aceite de ricino

Se consideraron: índice de refracción con refractómetro marca ATAGO RX-5000 (NMX-F-074-SCFI-2011), densidad (NMX-F-075-SCFI-2012) con picnómetros de 10 mL a 20 °C, viscosidad (ASTM D445-2006) determinada con viscosímetro marca Cannon-Freske No. 300 a 40 °C. El índice de acidez (NMX-F-101-SCFI-2006) y saponificación (NMX-F-174-S-2006) se evaluaron por titulación y el índice de yodo (NMX-F-152-SCFI-2011) por el método ciclohexano. Se realizaron

INTRODUCCIÓN

El biodiesel es completamente biodegradable, no tóxico para las plantas, animales o seres humanos (Scholz y Nogueira, 2008). Actualmente más de 95% del biodiesel se produce a partir de aceite vegetal (Gui *et al.*, 2008). Por lo que es importante tener especies que produzcan aceite para este fin, sin competir con recursos comestibles. En este sentido, el ricino (*Ricinus communis* L.) es una oleaginosa que se cultiva para la producción de aceite industrial en varios países, especialmente en India, China y Brasil (Ogunniyi, 2006), pero su calidad depende de factores tales como, materia prima, factores ambientales, método de extracción, entre otros (Udeozo *et al.*, 2013). Una característica de *R. communis*, es su capacidad de crecer en sitios contaminados con residuos de minas (González-Chávez *et al.*, 2015), por lo que constituye una opción para producir aceite en suelos degradados. Algunos autores han evaluado la productividad de diferentes tipos biológicos de *R. communis* (Machado *et al.*, 2012), y han reportado las características del aceite de accesiones procedentes de sitios no contaminados (Udeozo *et al.*, 2013) y contaminados con residuos de minas (González-Chávez *et al.*, 2015). Sin embargo, estos trabajos involucran solamente las características agroproductivas de la planta o características fisicoquímicas del aceite. Por ello, el presente estudio determinó las propiedades agroproductivas de siete accesiones de *R. communis* y características fisicoquímicas del aceite para uso como materia prima de biodiesel.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en el campo experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, ubicado en el estado de México, a 2250 m de altitud y latitud (19° 29' LN y 98° 54' O). Las siete accesiones de ricino incluidas en este estudio fueron: Ceprobi, Morelos (C); Mirante, variedad comercial en Colombia (Mir); Montecillo uno (M1) y Montecillo dos (M2), procedentes de Montecillo, estado de México. Además de tres accesiones naturalmente establecidas en sitios contaminados con residuos de mina, Zimapán, Hidalgo: San Francisco seis (SF6), San Francisco siete (SF7) y Santa María uno (SM1). Las semillas de *R. communis* de cada accesión se germinaron en arena de sílice. Después de un mes, las plántulas se trasplantaron, en el campo experimental sin la aplicación de un sistema de riego.

Caracterización fisicoquímica del suelo

Las muestras de suelo (donde el ricino creció) se recolectaron a una profundidad de 20 cm y estuvieron compuestas por cinco submuestras tomadas a lo largo del terreno, las cuales se secaron al aire y cribaron. Posteriormente, el pH del suelo se analizó como describe Rowell (1994) y la conductividad eléctrica con el método de Rhoades (1996). La materia orgánica se determinó por método de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1982). La textura se cuantificó mediante el procedimiento de Day (1965). La capacidad de intercambio catiónico se analizó mediante solución extractora de acetato de amonio 1 M (Rowell, 1994). El fósforo disponible se cuantificó por Olsen y Khasawneh (1980) y el nitrógeno total por el método Kjeldahl. Todas las propiedades se analizaron por triplicado.

espectros infrarrojos de la muestra extraída de aceite de ricino en la región de 4000 a 400 cm^{-1} , en un espectrofotómetro Perkin Elmer-IR (modelo 1600 FTIR). Se realizó un análisis de los picos de transmitancia en los espectros obtenidos a través del análisis de los grupos funcionales presentes en éstos. En este estudio se utilizó un diseño en bloques al azar con diez repeticiones para las accesiones de *R. communis*. Para interpretar las variables cuantitativas se aplicó un análisis de varianza y en aquellos casos donde se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos, se utilizó la prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$). Además se realizaron correlaciones de Pearson ($\alpha = 0.05$) para relacionar variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica del suelo

El suelo tuvo pH ligeramente alcalino (7.4 ± 0.1), la conductividad eléctrica fue de $508.8 \pm 73 \mu\text{mhos cm}^{-2}$. La materia orgánica presentó valores relativamente bajos ($2.2\% \pm 0.7$). Por otra parte, la capacidad de intercambio catiónico fue alta ($25.6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). El suelo fue de textura arenosa (64% de arena, 20% de limo y 16% de arcilla). La concentración de nitrógeno fue elevada (12.7 mg kg^{-1} de amonio, 38.8 mg kg^{-1} de nitratos y 29.8 mg kg^{-1} de nitritos), el de fósforo disponible en el suelo fue alto (25.7 mg kg^{-1}) (CSTPA, 1980).

Agroproductividad de las plantas

La accesión Mir fue más precoz (214-230 días) en la formación de cápsulas maduras, seguida de SF6 (223-275 días). En contraste, SF7 y C presentaron maduración tardía de cápsulas (291-302 días), sin embargo, estadísticamente ninguna accesión tuvo diferencia significativa entre días de cosecha. Las variables agroproductivas se muestran en el Cuadro 1, reflejando que la altura de los

arbustos fue estadísticamente igual en todas las accesiones (1.8 y 2.2 m). Esta variable es importante, ya que la cosecha se dificulta cuando la planta es de porte alto (Scholz y Nogueira, 2008). Sin embargo, esta variable depende de la temperatura y disponibilidad de agua (Kumar *et al.*, 1997). La accesión M2 tuvo el mayor número de nudos (21.9 nudos) y las accesiones Mir, SF6 y SF7 tuvieron los valores más bajos (9.6, 11.1 y 12.6 respectivamente). Esta diferencia podría deberse a condiciones ambientales y tipo biológico (Kumar *et al.*, 1997). En cuanto al área de goteo, las accesiones C, SF7 y M2 y fueron estadísticamente superiores a las demás plantas. Es necesario mencionar que el autosombreado sobre las hojas puede disminuir la actividad fotosintética (Falasca *et al.*, 2012) y tener efecto en el tiempo de maduración de las semillas. Las accesiones con el mayor número de racimos fueron SF6 y Mir que superaron estadísticamente a C, SF7, M1, M2 y SM1 en esta variable. La mayor longitud de racimo se mostró en C y SF7 (Figura 1). Aunque las accesiones SF6 y Mir fueron las que tuvieron el mayor número de cápsulas (1357 y 978); lo cual reflejó el rendimiento de semilla (Machado *et al.*, 2012).

El mayor peso de cápsulas por planta se presentó en Mir, SF6 y SF7, pero el mayor peso de cápsulas por racimo fue para C y SF7. Las accesiones Mir, SF7 y M2 tuvieron el mayor porcentaje de semilla y menor porcentaje de cáscara. Sin embargo, las accesiones con mayor rendimiento de semilla por planta y rendimiento estimado de ésta fueron Mir y SF7, el cual fue mayor que lo reportado por Machado *et al.* (2012), estos autores indicaron el mayor rendimiento estimado de $4\ 398 \text{ kg ha}^{-1}$ en 14 cosechas ($314 \text{ kg ha cosecha}^{-1}$). La condición en la que se desarrollaron las accesiones de *R. communis* fue en temporal, lo cual también pudo haber limitado la producción de cápsulas (Kumar *et al.*, 1997). Así mismo,

Cuadro 1. Variables agroproductivas para siete accesiones de *Ricinus communis* L.

Clave	Altura (m)	No. de nudos	Área de goteo (m^2)	No. de racimos	Long. racimo (cm)	No. de cápsulas	Cápsulas por planta (g)	Cápsulas por racimo (g)	% de cáscara	% de semilla	Rendimiento semillas (g)	Rendimiento estimado semilla* (kg ha^{-1})
C	2.1 a	14.8 bc	4.4 ab	8 b	51 a	239 b	921 bcd	130 a	69 a	30 b	326 c	258 c
Mir	1.9 a	9.6 d	3.6 b	33 a	35 b	978 a	1518 ab	47 bc	51 b	49 a	742 ab	808 ab
SF6	1.9 a	11.1 cd	3.7 b	34 a	42 ab	1357 a	1324 abc	39 c	69 a	31 b	415 bc	452 bc
SF7	2.2 a	12.6 cd	4.1 ab	13 b	49 a	415 b	1595 a	130 a	51 b	49 a	796 a	867 a
M1	1.9 a	17.2 b	3.1 b	8 b	27 c	303 b	605 c	76 b	68 a	32 b	237 c	355 c
M2	2.0 a	21.9 a	5.8 a	11 b	38 bc	353 b	729 cd	75 bc	54 ab	46 ab	392 bc	427 bc
SM1	1.8 a	17.2 b	3.2 b	13 bc	22 c	540 b	866 cd	79 b	66 a	34 b	346 c	377 c

No: Número, Long.: longitud (racimo principal), *Se asumió una densidad de 1089 plantas ha^{-1} . Se presentaron valores promedio, $n=10$. Letras diferentes en cada variable por columna muestran diferencia significativa según Tukey ($p < 0.05$).



Figura 1. Racimos producidos por la accesión SF7 de *Ricinus communis* L.

se encontraron diferentes correlaciones entre variables, pero en este análisis destacaron: el peso de cápsulas por planta vs. el rendimiento de semillas (0.9126 Pr=0.0001) y el número de frutos contra número de racimos (0.8562 Pr=0.0001).

Características de las semillas

Las características de las semillas (Cuadro 2), indican que la accesión con mayor peso y volumen por semilla fue C, mientras que SF6 y SM1 tuvieron 17 g 100 semillas⁻¹. Así mismo, C fue la accesión con las semillas más grandes (12.5 mm de Da y 11.7 mm de Dg). Contradictoriamente, esta accesión presentó menor rendimiento de semilla (326 g planta⁻¹), debido al bajo número de racimos, cápsulas y peso de cápsulas por planta (Cuadro 1). Las semillas con menor tamaño fueron de la accesión SF6, que tuvieron los valores más bajos de Da, Dg y volumen por semilla. Las semillas más esféricas fueron de las accesiones Mir, M1 y SM1 (0.68). El peso de las semillas de las accesiones SF7 y SF6 tuvo valores similares a los reportados por Ruíz-Olivares *et al.* (2013), para estos

mismos materiales crecidos naturalmente en suelos contaminados con residuos de mina. Aunque los porcentajes de aceite (61% para SF7 y 41% para SF6) fueron más altos que los obtenidos en este trabajo. Esta diferencia puede deberse a la baja temperatura en este experimento (Kumar *et al.*, 1997). Las accesiones con mayor contenido de aceite fueron SF6 y SM1 (48% y 46%), en contraste con M2 y C (31% y 35%). Mientras que las demás accesiones presentaron contenidos de 37% a 39%. Sin embargo, Mir y SF7 tuvieron la mayor producción estimada de aceite por área (362 y 287 kg ha⁻¹).

Características fisicoquímicas del aceite de ricino

Las características fisicoquímicas del aceite de ricino (Cuadro 3), muestran el índice de refracción de 1.47 para todas las accesiones, lo cual concuerda con lo reportado por American Standards for Testing and Materials (ASTM, 2008). Los aceites con mayor densidad relativa (Dr) fueron los obtenidos de C, SF7, M1 y M2 (0.96 g mL⁻¹). Estos valores están dentro de los estándares de calidad (ASTM, 2008) para aceite de ricino, en contraste Mir y SF6 no cumplieron con este requisito. El aceite con mayor viscosidad (V) fue el de la accesión SF6 (425 cSt) y el de menor C (392 cSt). Las demás accesiones presentaron V similar con promedio de 407 cSt. Sin embargo, estos valores son superiores al intervalo reportado por Scholz y Nogueira (2008; 240-300 cSt) y ASTM (2008; 297 cSt a 40 °C) para el aceite

Cuadro 2. Características de las semillas de siete accesiones de *Ricinus communis* L.

Clave	Peso seco de 100 semillas (g)	Volumen de 100 semillas (mL)	No. de semillas por kg	Diámetro medio aritmético (mm)	Diámetro medio geométrico (mm)	Esféricidad	Volumen por semilla (cm ³)	Contenido de aceite (%)	Producción estimada de aceite* (kg ha ⁻¹)
C	74 a	95 a	1359 c	12.5 a	11.7 a	0.64 d	0.89 a	35 cb	110 c
Mir	36 c	40 c	2750 c	9.3 c	8.7 c	0.68 a	0.38 c	37 b	287 ab
SF6	17 e	18 e	5749 ab	7.2 f	6.8 f	0.65 c	0.17 e	48 a	203 bc
SF7	55 b	62 b	1803 c	10.9 b	10.3 b	0.65 c	0.60 b	39 b	362 a
M1	27 d	29 d	3535 bc	8.6 e	8.2 e	0.68 a	0.30 d	39 b	87 c
M2	28 d	29 d	3591 bc	8.8 d	8.4 d	0.67 b	0.32 d	32 c	139 c
SM1	17 e	19 e	6203 a	8.1 e	7.7 e	0.68 ab	0.25 e	46 a	151 c

*Se asumió una densidad de 1089 plantas ha⁻¹. Se presentaron valores promedio, n=10. Letras diferentes en cada variable por columna muestran diferencia significativa según Tukey (p<0.05).

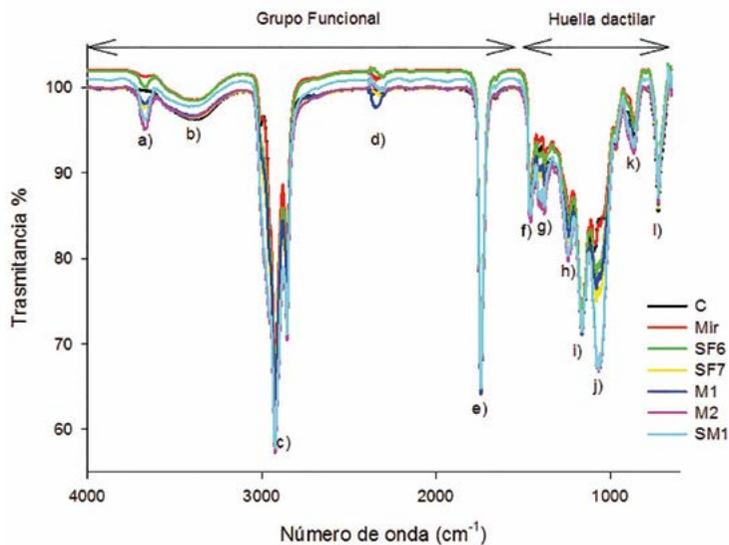


Figura 2. Espectro de infrarrojo de aceite de siete accesiones de *Ricinus communis* L. Las bandas se dividen en grupos funcionales y huella dactilar y corresponden a los siguientes grupos funcionales: a) OH-, b) OH-, c) $-CH_2-$, d) CO_2 , e) $C=O$, f) $C=O$, g) $O-CH_3$, h) $C=CH$, i) $O-CH_3$, j) $-O-CH_2-$, k) $-CH_2-CH_2-CH_2-$ y l) $(CH_2)_x$.

de ricino de todas accesiones. Sin embargo, a mayor V, mayor será la lubricación del biodiesel. Además, la comparación de V en otros trabajos es difícil porque los análisis no se realizaron a 40 °C. El índice de acidez (Ia) se mantuvo en intervalo amplio entre 0.3 a 2.5 $mg\ g^{-1}$. En cuanto al índice de yodo (Iy), los valores tuvieron poca variación (82-84 $g\ I_2\ 100\ g^{-1}$). Todas las muestras analizadas tuvieron el Ia y el Iy dentro del intervalo recomendado por ASTM (2008) en contraste con los altos valores de Iy de Moringa (*Moringa oleífera* Lam.) y de Nim (*Azadirachta indica* A. Juss) (Zaku *et al.*, 2012), cuantificados bajo otras condiciones. En el índice de saponificación (Is) se detectaron valores desde 184 hasta 191 $mg\ g^{-1}$, pero no hubo diferencia

significativa entre accesiones, de tal forma que las que cumplen con los estándares de calidad propuestos (ASTM) para el aceite de ricino fueron C, SF7 y M1. Por otra parte, se determinó el espectro IR (400-4000 cm^{-1}) de las muestras de aceite de ricino (Figura 2) donde se observan las flexiones de C-H equivalentes a las fluctuaciones del grupo funcional CH_2 (2840 y 2915 cm^{-1}), el cual es parte de la estructura hidrocarbonada de los ácidos grasos. La vibración en 1742 cm^{-1} corresponde al grupo $C=O$. El de metil éster ($O-CH_3$) correspondió a la deformación en 1438 cm^{-1} . Las bandas en 1150 cm^{-1} y 1725 cm^{-1} conciernen a las fluctuaciones de valencia del carboxilo ($C=O$) y ($C-CO-CO$). Además de la banda característica del triglicérido ($-O-CH_2-$) en 1031 cm^{-1} . Se localizaron las fluctuaciones de la deformación (δ) del grupo $(CH_2)_x$ a 710 cm^{-1} . Lo cual confirmó el patrón característico y pureza de aceite de ricino, además, estos resultados fueron similares a lo reportado por Imankulov (2012).

La accesión SF7 es de mayor interés, por sus estándares de calidad, también porque puede producirse en sitios contaminados con varios metales pesados (Cu, Cd, Zn y Pb) (González-Chávez *et al.*, 2015), por lo cual, la accesión SF7 representa una alternativa para la fitoremediación de sitios contaminados y la producción de materia prima para aceite crudo o biocombustibles. Lo anterior puede representar mayor valor económico, ecológico y estético de sitios contaminados, por lo que esta accesión se recomienda para la plantación masiva y evaluar su comportamiento agronómico bajo estas condiciones.

Cuadro 3. Características fisicoquímicas del aceite de siete accesiones de *Ricinus communis* L.

Clave	Densidad relativa ($g\ mL^{-1}$)	Viscosidad (cSt a 40 °C)	Índice de acidez ($mg\ g^{-1}$)	Índice de yodo ($g\ I_2\ 100\ g^{-1}$)	Índice de saponificación ($mg\ g^{-1}$)
C	0.96 a	392 c	0.5 c	83 a	184 a
Mir	0.94 c	407 b	1.2 b	82 a	186 a
SF6	0.92 d	425 a	1.2 b	84 a	191 a
SF7	0.96 a	411 b	2.5 a	83 a	184 a
M1	0.96 a	402 bc	0.7 bc	84 a	185 a
M2	0.96 a	404 bc	0.8 bc	83 a	189 a
SM1	0.95 b	408 b	0.7 bc	83 a	191 a
ASTM [†]	0.95-0.96	297	0.4-4.0	82-88	175-187
Ricino ^{††}	0.92	81.95 [¶]	12.48	287	164
Jatropha ^{††}	0.92	88.15 [¶]	8.43	394	192
Nim ^{††}	0.93	88.40 [¶]	17.40	369	186
Moringa ^{††}	0.90	49.96 [¶]	4.96	420	188

Letras diferentes por columna muestran diferencias significativas según Tukey ($p=0.05$). Se presentaron valores promedio, $n=10$. [†] ASTM, 2008.

^{††} Citado por Zaku *et al.* (2012). [¶] Unidades en mPa.

CONCLUSIONES

Las siete accesiones de *R. communis* estudiadas poseen características agroproductivas que las diferencian entre sí. Sin embargo, la accesión SF7 (proveniente de sitios contaminados con residuos de mina) tuvo el racimo principal de mayor longitud. A pesar, de no presentar muchos racimos, obtuvo el mayor rendimiento estimado de semillas, las cuales fueron grandes y con alta producción estimada de aceite. Además de las características adecuadas de pureza, densidad relativa, viscosidad, índices de refracción, acidez, yodo y saponificación. Por lo tanto, SF7 tiene las características de calidad recomendadas y el potencial para la producción del biodiesel. Futuros trabajos deberían realizarse en sitios contaminados con metales pesados para evaluar su desempeño agroproductivo y capacidad de fitorremediación, así como, posibles servicios ambientales con su manejo en estos sistemas. También debe buscarse reducir el periodo de maduración de semillas y mejorar el porte de la planta para facilitar la mecanización de la cosecha y optimizar el tiempo de producción.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra Silvia Evangelista Lozano por proporcionar semillas de las accesiones CEPROBI y Mirante, además al M.C. Jaime Cruz Díaz, por su apoyo técnico en el análisis físicoquímico del suelo. Este estudio surgió de la iniciativa "A unified approach (chemical, plant, microbial) for optimized reclamation of metal", Propuesta 2009-021, Texas A&M University-CONACyT.

LITERATURA CITADA

- ASTM. American Society for Testing Materials. 2008. <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D6751-08.htm>. 01/01/ 2016.
- ASTM D445. 2006. American Society for Testing Materials. 2011. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids.
- CSTPA. Council on Soil Testing and Plant Analysis. 1980. Handbook on reference methods for soil testing. Council soil testing and plant analysis. Athens Georgia, USA.459 p.
- Day P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis *In: Methods of Soil Analysis*. Black C. A. (ed). Agronomy. pp: 545-567.
- Falasca S.L., Ulberich A.C., Ulberich E. 2012. Developing an agroclimatic zoning model to determine potential production areas for castor bean (*Ricinus communis* L.). *Ind. Crops. Prod.* 40: 185-191.
- González-Chávez M.C.A., Ruíz-Olivares A., Carrillo-González R., Ríos-Leal E. 2015. Crude oil and bioproducts of castor bean (*Ricinus communis* L.) plants established naturally on metal mine tailings. *Int. J. Environ. Sci. Te.* 12: 2263-2272.
- Gui M.M., Lee K.T., Bhalia S. 2008. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil. *Waste edible oil as biosiesel. Energy.* 33: 1646-1653.
- Imankulov N. 2012. Preparation and research on properties of castor oil as a diesel fuel additive. *Appl. Technol. Innov.* 1: 30-37.
- Jain R.K., Bal S. 1997. Properties of pearl millet. *J. Agr. Eng. Res.* 66: 85-91.
- Kumar P.V., Ramakrishna Y.S., Ramana V.R.B., Víctor U.S., Srivastava N.N., Subba R. A.V.M. 1997. Influence of moisture, thermal and photoperiodic regimes on the productivity of castor beans (*Ricinus communis* L.). *Agric. For. Meteorol.* 88: 279-289.
- Machado R., Suárez J., Marlen A. 2012. Caracterización morfológica y agroproductiva de procedencias de *Ricinus communis* L. para la producción de aceite. *Pastos Forrajes.* 4: 381-392.
- Mohsenin N.N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Publications. New York. 45 p.
- Nelson D.W., Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In: Methods of Soil Analysis*. Page A. L., Miller R. H., and D. R. Keeney (eds). American Society of Agronomy. Madison. pp: 539-579.
- NMX-F-074-SCFI-2011. Norma Mexicana. 2011. Determinación del índice de refracción.
- NMX-F-075-SCFI-2012. Norma Mexicana 2012. Determinación de la densidad relativa.
- NMX-F-101-SCFI-2006. Norma Mexicana 2006. Determinación de ácidos grasos libres.
- NMX-F-152-SCFI-2011. Norma Mexicana 2011. Determinación del índice de yodo.
- NMX-F-174-S-2006. Norma Mexicana 2006. Determinación del índice de saponificación.
- Ogunniyi D.S. 2006 Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresource. Technol.* 97: 1086-1091.
- Olsen S.R., Khasawneh F.E. 1980. Use and limitations of physical chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils, the role of phosphorus in agriculture. *In: Khasawneh F. E., Sample E. C., and E. I. Kamprath (eds)*. Madison. pp: 361-410.
- Perdomo E.C., Acosta-Osorio F.A., Herrera A.A., Vasco-Leal G., Mosquera-Artamonov J. F., Millan-Malo J.D. Rodríguez-García M.E. 2013. Physicochemical characterization of seven Mexican *Ricinus communis* L. seeds and oil contents. *Biomass. Bioenerg.* 48: 17-24.
- Rhoades J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. *In: Methods of Soil Analysis. Chemical Methods*. Sparks D. L. (ed). Soil Science Society of America. Madison. pp: 417-435.
- Rowell D.L. 1994. *Soil Science. Methods and Applications*. Longman, UK. 35 p.
- Ruiz-Olivares A., Carrillo-González R., Marcos Soto R., González-Chávez M.C.A. 2013. Potential of *Ricinus communis* L. in phytoremediation and oil production. *J. Environ. Manage.* 114: 316-323.
- Scholz V., Nogueira J. 2008. Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. *Biomass. Bioenerg.* 32:95-100.
- Tchuenteu T.L., Megueni C., Y Njintang N. 2013. A study of the variability for grain and oil yield and yield related traits of castor beans accessions in two savannah agro-ecological zones of Cameroon. *Int. J. Biosci.* 8: 251-263.
- Udeozo I.P., Okafor C.M., Chukwuemeka I.M., Eze-Stephen P.E. 2013. Extraction and characterization of castor seed oil (*Ricinus communis*) from Isiala Mbano, Imo State, Nigeria. *World J. Pharm. Sci.* 4: 1186-1193.
- Zaku S.A., Emmanuel A.H.I., Kabir A. 2012. Comparative studies on the functional properties of neem, jatropha, castor, and moringa seeds oil as potential feed stocks for biodiesel production in Nigeria. *Global Journals Inc.* 7: 23-26.