

**Caracterización fisicoquímica de biodiésel
producido a partir de tres variedades de
piñón (*Jatropha curcas*)**

Ernesto Emilio González Durán

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2012.

ZAMORANO
DEPARTAMENTO DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

Caracterización fisicoquímica de biodiésel producido a partir de tres variedades de piñón (*Jatropha curcas*)

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Agroindustria Alimentaria en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por:

Ernesto Emilio González Durán

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2012

Caracterización fisicoquímica de biodiésel producido a partir de tres variedades de piñón (*Jatropha curcas*)

Presentado por:

Ernesto Emilio González Durán

Aprobado:

Francisco Javier Bueso, Ph.D.
Asesor principal

Luis Fernando Osorio, Ph.D.
Director
Departamento de Agroindustria Alimentaria

Jorge Cardona, Ph.D.
Asesor

Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

RESUMEN

González Durán, E.E. 2012. Caracterización fisicoquímica del biodiésel producido a partir de tres variedades de piñón (*Jatropha curcas*). Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 27 p.

Este estudio evaluó las características fisicoquímicas del biodiésel elaborado a escala de laboratorio de aceite de tres variedades de *Jatropha curcas*: Criolla Mexicana, Cabo Verde e Hindú Salvadoreña, comparándolo con los parámetros establecidos por la norma ASTM D6751 a fin de determinar su aplicabilidad comercial y destacar ventajas de variedades no tóxicas para el uso de sus subproductos. Se utilizó una transesterificación con catálisis alcalina y metanol. Se evaluaron rendimiento, análisis físicos y químicos utilizando métodos oficiales de la AOCS, AOAC y ASTM. Se utilizó un DCA con tres repeticiones, se usó un ANDEVA y separación de medias Tukey con significancia de 0.05 con el programa SAS versión 9.3. El biodiésel elaborado cumplió todos los parámetros de la norma ASTM D6751 a excepción de humedad. Las variedades presentaron diferencias significativas en el porcentaje de ácidos grasos monoinsaturados y polinsaturados, la variedad Criolla Mexicana mostró 46% y 42% respectivamente, la Cabo Verde 42% y 38% y la Hindú Salvadoreña 42% y 36%. El porcentaje de ácidos grasos oleico y α -linoleico fueron los que más aportaron a estas diferencias manifestándose en diferencias significativas en el índice de cetanos. No se encontraron diferencias significativas en rendimiento, estabilidad oxidativa ni calorimetría. Se recomienda hacer estudios a escala de planta piloto y ampliar la caracterización con otras variedades tomando en cuenta sus aspectos agronómicos.

Palabras clave: ASTM D6751, biodiésel, índice de cetanos, piñón.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| Portadilla | i |
| Página de firmas | ii |
| Resumen | iii |
| Contenido | iv |
| Índice de cuadros, figuras y anexos..... | v |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 2 MATERIALES Y MÉTODOS..... | 3 |
| 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 7 |
| 4 CONCLUSIONES..... | 15 |
| 5 RECOMENDACIONES..... | 16 |
| 6 LITERATURA CITADA..... | 17 |
| 7 ANEXOS..... | 21 |

ÍNDICE DE CUADROS Y ANEXOS

| | Cuadros | Página |
|----|--|--------|
| 1. | Rendimientos de aceite semi-refinado a biodiésel. | 7 |
| 2. | Viscosidad cinemática y punto de turbidez del biodiésel. | 8 |
| 3. | Color del biodiésel. | 9 |
| 4. | Humedad y estabilidad oxidativa del biodiésel..... | 10 |
| 5. | Perfil de ácidos grasos del biodiésel. | 12 |
| 6. | Potencial energético en el biodiésel. | 13 |
| | | |
| | Anexos | Página |
| 1. | Proceso detallado de elaboración de biodiésel..... | 21 |
| 2. | Flujograma ilustrado del proceso de elaboración de biodiésel. | 23 |
| 3. | Parámetros de la norma ASTM D6751. | 24 |
| 4. | Factores que afectan el rendimiento del biodiésel. | 25 |
| 5. | Cálculos para la transformación de mg de KOH/g a porcentaje de ácidos grasos libres expresados como ácido oleico..... | 26 |
| 6. | Resumen de ANDEVA. | 26 |
| 7. | Análisis fisicoquímicos del aceite utilizado para la elaboración del biodiésel..... | 27 |

1. INTRODUCCIÓN

El biodiésel es un combustible alternativo al diésel fósil, que según la American Society for Testing Materials 2012 (ASTM) en su norma D6751 se define como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga provenientes de grasas vegetales o animales. La producción de biodiésel se da a partir de una fuente grasa, un alcohol de bajo peso molecular (metanol o etanol) y un catalizador de los cuales los más utilizados por su alto rendimiento son los hidróxidos de sodio o de potasio (Raja *et al.* 2011; Benavides *et al.* 2007; Berchmans e Hirata 2007 y Moser 2008), el proceso de ruptura de triglicéridos y sustitución del glicerol por tres radicales del alcohol utilizado se conoce como transesterificación y el resultado es la formación de ácidos grasos unidos con un enlace éster con un radical metil o etil (según el alcohol utilizado).

La producción de energía utilizando biomasa es muy atractiva ya que es un recurso renovable y su combustión es considerada más limpia y menos dañina al ambiente (Sarin *et al.* 2006) reduciendo un 65% las emisiones de monóxido de carbono, un 90% dióxido de azufre y un 50% menos emisiones de hidrocarburos no combustionados (Alamu *et al.* 2007). Esta propuesta trae consigo un problema y es el de la utilización de alimentos y de recursos que pueden ser destinados para alimentos para la producción de energía, lo que amenaza la seguridad alimentaria de muchas comunidades. El piñón (*Jatropha curcas*), al no ser una fuente alimenticia y que su fisiología le permite crecer y desarrollarse en tierras áridas y además que no compiten en la producción de otros alimentos (Sarin *et al.* 2006 y Lu *et al.* 2008).

El nombre *Jatropha* proviene del griego “iatros” que significa doctor y “trophe” que significa comida y pertenece a la familia de las Euforbiácea, es originaria de Centro y Sudamérica (Nithiyantham *et al.* 2012) y ha sido esparcida por el resto de los continentes en la región tropical por su buena adaptación a gran variedad de suelos y por su alta producción de aceite. En algunos casos las semillas son utilizadas medicinalmente (Misra *et al.* 2010 y Gubitz *et al.* 1999) y para curar asma y bronquitis (Nzikou *et al.* 2009).

La semilla de la planta es la que se utiliza para la extracción de aceite y esta contiene entre un 40 y 50% de aceite y de estos alrededor del 75% son ácidos grasos insaturados (Nzikou *et al.* 2009). El aceite puede ser utilizado como combustible directamente en motores diésel, pero no con el mismo rendimiento y comportamiento al atomizarse por lo que puede generar daños al motor, es por eso que se recomienda el proceso de transesterificación previo para el uso comercial sin riesgos de daños y con un buen desempeño (Kywe *et al.* 2009). Dentro del proceso de extracción de aceite se genera como subproducto la torta la cual tiene un alto porcentaje de proteína, desde un 50% hasta un

60%, pero por su carácter tóxico no puede ser utilizado como alimento animal ni humano (Makkar y Becker 2009).

Las semillas y la torta de *Jatropha curcas* tienen varios compuestos tóxicos como los ésteres de forbol y otros compuestos anti nutricionales como la inhibidores de tripsina y de amilasa, saponinas, lectinas y fitatos, es por esto que existe un importante interés en identificar y domesticar variedades no tóxicas o mejorar genéticamente variedades para suprimir los genes productores de estas sustancias (Makkar *et al.* 1997). Algunas variedades no tóxicas se han descubierto en regiones de México (Makkar *et al.* 2009) como Veracruz y Yucatán, en las cuales se han encontrado cantidades mínimas de ésteres de forbol, pero inhibidores de tripsina, lectina y fitatos fueron encontrados en cantidades significativas. En estados como Quintana Roo, se tiene la costumbre de tostar estas semillas para adecuarlas al consumo humano y la torta luego de desengrasarla presenta propiedades nutricionales similares a las de variedades tóxicas (Makkar *et al.* 1998). La diversidad genética es reducida entre variedades tóxicas así mismo entre variedades no tóxicas, pero tienden a ser ligeramente diferentes entre ellas asignando a un locus en específico como responsable de la producción de ésteres de forbol (He *at al.* 2011). Estudios de Makkar *et al.* (2009) describen que variedades no tóxicas poseen marcadores genéticos diferentes a las variedades tóxicas, describiendo una variedad salvadoreña como posible híbrido entre variedades tóxicas y no tóxicas ya que presentó genes de ambas.

Muchas de las variedades de *Jatropha curcas* poseen características químicas que difieren ligeramente entre si, incluso mismas variedades de diferentes regiones pueden presentar diferencias en cuanto a perfil de ácidos grasos, lo que se traduce en diferencias en las características fisicoquímicas del biodiésel como índice de cetanos, punto de turbidez, viscosidad y estabilidad oxidativa (Naresh 2012). Makkar *et al.* (2009) concluyó que existe una correlación positiva entre el contenido de aceite en la semilla y la cantidad de ésteres de forbol.

El beneficio económico del uso *Jatropha curcas* para producción de biodiésel puede ser mejorado si se le da un uso comercial a la torta o si se mejoran rendimientos o características determinadas en el combustible terminado de acuerdo a la variedad seleccionada. El proceso de generación de biodiésel tiene muchas variables y controles críticos con respecto a su calidad que la ASTM regula con la norma D6751 la cual define los parámetros tanto químicos como físicos (Anexo 3) para que éste pueda ser comercializado y utilizado debidamente. Este estudio comparó con los parámetros establecidos en la norma antes mencionada con el comportamiento en términos de rendimiento, características físicas y químicas del biodiésel de tres variedades de *Jatropha curcas*: Cabo Verde, Hindú Salvadoreña y Criolla Mexicana, esta ultima considerada una variedad no tóxica. Se estableció como objetivo de este estudio:

- Comparar las características físicas y químicas del biodiésel de las tres variedades de *Jatropha curcas*: Criolla Mexicana, Cabo Verde e Hindú Salvadoreña con los parámetros establecidos por la norma ASTM D6751.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización: Este estudio se realizó en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ), ubicado a 30 kilómetros al este de Tegucigalpa en Honduras.

Materia prima.

- Aceite Vegetal desengomado y neutralizado de *Jatropha curcas* de tres variedades: Cabo verde, Hindú Salvadoreña y Criolla Mexicana. El Anexo 7 muestra las características fisicoquímicas del aceite utilizado para la elaboración del biodiésel (Espinal 2012).
- Metanol Grado ACS, ISO, Reag. Ph EUR. 98% de pureza. Merck® 106009500.
- Hidróxido de sodio en pellets, Grado Reactivo. 98.4% pureza. J. T Baker® 3722-19. CAS 1310-73-2.

Reactivos.

- Reactivo Karl Fisher Hydranal Composite 5 Sigma-Aldrich® 34805.
- Fenolftaleína, indicador. Merck® 2870-4. CAS 77-09-8.
- Isopropanol, 99.8% GR. EM Science®. CAS 67-63-0 PX1835-5.
- Ácido Acético Glacial 99.9% Baker 9507. CAS 64-19-7.
- Isooctano Uvasol 99.8% MERCK® 1.04718.2500. CAS 540-84-1.
- Cloroformo CHROMASOLV (HPLC) ≥ 99.8 % Sigma-Aldrich® 650552. CAS 67-66-3.
- Yoduro de potasio (KI) 99% Sigma-Aldrich® 11319. CAS 7681-11-0.
- Tiosulfato de Sodio Pentahidratado 99.5% MERCK® 106516.0500. CAS 10102-17-7.
- Sulfato de Sodio Monobásico 100%. MERK® 1.06649.1000. CAS 10049-21-5.
- Rojo de metilo, grado reactivo en cristales Sigma-Aldrich® 2696-00. CAS 493-52-7.
- Estándares componente FAME (GLC-463) Supelco® 47885-U.
- Carbonato de Sodio, Grado reactivo. 99% de pureza. Fisher® S420-10. CAS 497-19-9.
- Agua destilada.

Equipos.

- Prensa sin fin modelo KEK-P0101, KEK Egon Keller, 2008.
- Reómetro Brookfield LVD-III Ultra.
- Rancimat 873 Metrohm.
- Karl Fisher Titrino 847.
- Calorímetro adiabático Parr.
- Balanza analítica Metler AE 200.
- Balanza AND ET-6100.
- Agitadores magnéticos con hornilla Thermo Scientific Cimerec.
- Baño de temperatura, Brookfield, TC-501
- Cromatografo de gases, Agilent 7890A.
- Automuestreador, Agilent 7693.
- Generador de Hidrógeno, Agilent 5182-3483.
- Horno de aire forzado a 105°C, Fisher Scientific
- ColorFlex, Hunterlab.
- Campana de gases, Labconco 080993260J.
- Bomba al vacío Butchi V710

Cristalería.

- Beaker de reacción para Rancimat.
- Tubos de ensayo especiales para Rancimat.
- Probeta de 50 y 100 mL.
- Pipetas de 1 ml y de 5ml.
- Bureta de 100 ml con precisión de 0.1ml.
- Embudos decantadores de 500 ml.
- Cristalería de laboratorio.
- Bulbos.

Equipo de Seguridad.

- Guantes de Nitrilo
- Gafas de plástico
- Mascarilla 3M con filtros para vapores de ácidos orgánicos NIOSH 6003

Consumibles.

- Papel aluminio.
- Filtros de papel No. 4 0.25 μm .
- Jeringas de 5 ml.

Diseño Experimental: Para este estudio se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con tres repeticiones, siendo los tratamientos evaluados las tres variedades de *Jatropha curcas*. Los resultados se analizaron mediante un ANDEVA y las medias se separaron por la prueba de Tukey ($P < 0.05$) con el programa Statistical Analysis System (SAS) Versión 9.3.

Elaboración de biodiésel. Se utilizó el método sugerido por Baccaro (2008), Cruz (2011), adaptado de Kywe (2009) y de Raja *et al.* (2011); donde primero se pesó la cantidad de aceite desengomado y neutralizado a utilizar luego de manera simultánea se preparó metóxido de sodio, se calentó el aceite a 60° C y se agregó el metóxido de sodio en agitación constante (400 RPM) por una hora. Posteriormente se dejó decantar por 30 minutos para separar la glicerina formada (fase inferior) y el biodiésel (fase superior), se dejó por 30 minutos más para la separación definitiva de fases, luego se procedió a lavar el biodiésel con agua a 50° C (Lu *et al.* 2009), se utilizaron de 3 a 5 lavados con una relación de agua de 1/3 con respecto al peso del aceite (Mis 2008).

Rendimiento. Se midió el porcentaje de conversión de aceite utilizado a biodiésel final con la ecuación 1.

$$\% \text{ de Rendimiento} = \frac{\text{kg de biodiésel obtenido}}{\text{kg de aceite utilizado}} \quad [1]$$

Punto de Turbidez método de referencia AOCS Cc6-25. Es la temperatura expresada en grados centígrados a la cual el biodiésel empieza a perder su transparencia y se forma una especie de nubosidad que lo vuelve opaco, se hizo esta prueba enfriando el biodiésel hasta notar visualmente los cambios descritos. La norma ASTM D 6751 no establece ningún límite para esta prueba, solo reportarla en grados centígrados. Esta prueba se realizó por duplicado.

Viscosidad Cinemática. El análisis se determinó a partir de la viscosidad dinámica del biodiésel, dividiéndola entre su densidad a 40° C. El método referente para este análisis es el de la ASTM D 445 que establece que se realice la medición a una temperatura de 40°C, para mantener esta temperatura se utilizó una hornilla. Los resultados de viscosidad cinemática fueron expresados en mm^2/s y el rango permitido por la ASTM D 6751 es de 1.9 a 6.0 mm^2/s . Este análisis se hizo por duplicado.

Análisis de color. Se tomó como referencia el método ASTM D1500, se utilizó el ColorFlex, Hunterlab y los resultados se reportaron según los componentes L, a y b de las muestras. La norma ASTM D6751 no establece ningún parámetro de color para el biodiésel.

Humedad con Karl Fisher método AOCS Ca 2e-84. Los resultados se expresaron en porcentaje y el límite máximo establecido por la norma ASTM D6751 es 500 ppm (0.05%). Esta prueba se realizó por duplicado.

Ácidos grasos libres (AGL) método AOCS Ca 5a-40. Los resultados fueron reportados como porcentajes de ácido oleico. Para esta prueba se tomó el parámetro máximo de la

norma ASTM D 6751 que establece un límite que no debe de exceder de 0.25% de ácidos grasos libres o 0.5 mg de KOH/g de biodiésel. Esta prueba se realizó por duplicado.

Índice de peróxidos método AOCS Cd 8b-90. El índice de peróxidos indica el grado de oxidación que tiene un aceite promovidos por factores como la temperatura, humedad, luz, oxígeno y metales. La norma ASTM no establece un límite para esta prueba. Este análisis se realizó por duplicado para cada repetición.

Índice de estabilidad oxidativa (OSI, por sus siglas en inglés) con Rancimat método AOCS Cd 12b -92. Esta prueba produce una oxidación acelerada de las muestras de biodiésel mediante la adición constante de un flujo oxígeno (9 litros por hora) y una temperatura controlada (110° C), donde una cámara que contiene agua destilada y sensores miden la conductividad eléctrica formada por ácidos orgánicos (ácido fórmico) producidos en el proceso de enranciamiento del biodiésel. Los resultados son expresados en horas y la norma ASTM D-6751 establece un límite mínimo de tres horas de inducción. Esta prueba se realizó por duplicado.

Perfil de Ácidos Grasos AOCS Ce 2b 11. Este análisis se realizó por cromatografía de gases y no se derivatizó por que las muestras ya estaban previamente transesterificadas. Se analizaron las muestras por duplicado y los resultados se reportaron en porcentajes (%). El área bajo las curvas de los cromatogramas permitió conocer el porcentaje de cada ácido graso presente en las muestras comparándolo con un estándar GLC-463.

Poder calorífico. Es la unidad de energía por unidad de masa que el biodiésel puede desprender al combustionarse. Se utilizó como referencia el método ASTM D240, con el calorímetro adiabático, las unidades se reportaron en MJ/Kg de biodiésel y las ASTM D6751 no establece ningún parámetro para esta prueba.

Índice de cetanos. Este análisis determina la calidad de ignición del biodiésel. El método de referencia es el de la ASTM D 613, es adimensional y la norma ASTM D6751 establece un mínimo de 47. Para la predicción de este valor se utilizó la Ecuación 2 desarrollada por Bamgboye y Hansen (2008) a partir del perfil de ácidos grasos por cromatografía de gases, esta ecuación es recomendada por Manzanares (2011) como la más exacta para la predicción del índice de cetanos en relación al método de referencia.

$$CN = 61.1 + 0.088x_2 + 0.133x_3 + 0.152x_4 - 0.101x_5 - 0.039x_6 - 0.243x_7 - 0.395x_8 \quad [2]$$

Donde:

x_2 = % de Ácido mirístico (14:0)

x_3 = % de Ácido palmítico (16:0)

x_4 = % de Ácido esteárico (18:0)

x_5 = % de Ácido palmitoleico (16:1 cis-9)

x_6 = % de Ácido oleico (18:1 cis-9)

x_7 = % de Ácido alfa linoleico (18:2n6 cis-9,12)

x_8 = % de Ácido linolénico (18:3n3 cis-9,12,15)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la producción de biodiésel es necesario conocer la calidad del aceite, el Instituto Alemán de Estandarización en su norma DIN V 51605, establece los parámetros que un aceite vegetal debe de cumplir para su uso en biocombustibles. El aceite de *Jatropha curcas* de las tres variedades utilizado en este estudio cumplió con los parámetros de calidad establecidos por la norma DIN V 51605 para la elaboración de biodiésel (Espinal 2012).

Sólo se pudieron encontrar diferencias significativas en viscosidad cinemática, color, humedad, ácidos grasos monoinsaturados, polinsaturados y en el índice de cetanos, con una probabilidad menor a 0.05. Los demás análisis realizados no mostraron diferencias entre variedades.

El rendimiento en la producción de biodiésel ha sido muy estudiado con el objetivo de optimizar los procesos y hacerlos más eficientes y menos costosos, para esto se han hecho muchas pruebas en relación a la elaboración del biodiésel que involucran variaciones en tiempos y temperaturas de reacción durante transesterificación (Suwito *et al.* 2012), variaciones en cuanto a catalizadores y su concentración, diferentes tipos de alcoholes (Patil y Deng 2009) y proporciones molares (Baccaro 2007) e incluso interacciones entre éstas. Los rendimientos obtenidos con el proceso de elaboración de biodiésel descrito en Materiales y Métodos y ampliado en el Anexo 1 se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Rendimientos de aceite semi-refinado a biodiésel.

| Fuente de biodiésel | Rendimiento % \pm D. E. ¹ |
|---------------------|---|
| Criolla Mexicana | 90.3 \pm 0.01 ^a |
| Cabo Verde | 90.6 \pm 0.00 ^a |
| Hindú Salvadoreña | 92.1 \pm 0.02 ^a |

¹D.E.= Desviación Estándar.

^aMedias seguidas de letras iguales en la misma columna indican igualdad estadística (P>0.05).

Los rendimientos mostrados en el Cuadro 1 sobrepasan el 90%, es decir por cada kilogramo de aceite transesterificado se obtuvieron más de 900 gramos de biodiésel. Contrario a Kywe (2009) que obtuvo rendimientos del 76% usando aceite de *Jatropha curcas* sin refinar, pero en la misma investigación también realizó pruebas con aceite refinado llegando a rendimientos del 92% en escala de laboratorio y de 90% en escala de planta piloto, datos que concuerdan con los de Patil y Deng (2008) y Okullo *et al.* (2012)

con rangos entre 90 y 95%. Rendimientos de 85 al 90% son considerados normales, rendimientos por encima de estos son considerados altos y por debajo de éstos son considerados bajos (Fukuda *et al* 2001). El Anexo 4 explica los factores que afectan el rendimiento en la producción de biodiésel.

El proceso adecuado de transesterificación y elaboración de biodiésel se traducen no solo en el rendimiento sino en el calidad del mismo, la norma ASTM D6751 especifica que el biocombustible debe de cumplir con parámetros tanto físicos como químicos (Ver Anexo 3) para su comercialización y uso adecuado. El Cuadro 2 detalla los resultados obtenidos de los análisis físicos y el Cuadro 3 los análisis de color en L a b y los compara con los límites o rangos que establece la norma antes mencionada. La ASTM no tiene limites para color y para el punto de turbidez solo exige que se reporte en grados centígrados.

Cuadro 2. Viscosidad cinemática y punto de turbidez del biodiésel.

| Fuente de biodiésel | Viscosidad cinemática | Punto de turbidez |
|---------------------|---|--------------------------|
| | mm ² /s ± D. E. ¹ | °C ± D. E. |
| Criolla Mexicana | 2.73 ± 0.22 ^a | 3.78 ± 0.04 ^a |
| Cabo Verde | 2.14 ± 0.04 ^b | 3.23 ± 0.71 ^a |
| Hindú Salvadoreña | 2.55 ± 0.11 ^a | 3.40 ± 0.10 ^a |
| ASTM D6751 | 1.9-6.0 | - |

¹D.E.= Desviación Estándar.

^{ab}Medias seguidas de letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadística (P<0.05).

El aceite de *Jatropha curcas* tiene una viscosidad cinemática entre 30 mm²/s (Suwito *et al.* 2012; Kywe *et al.* 2009) y 50 mm²/s (Nithiyantham *et al.* 2012), el aceite de *Jatropha curcas* que se utilizó para este estudio tenía una viscosidad de 33.1 mm²/s para la variedad Criolla Mexicana, 31.2 mm²/s para Cabo Verde y 32.1 mm²/s para la Hindú Salvadoreña (Espinal 2012) y se redujeron a los resultados mostrados en el Cuadro 2, esto debido al proceso de transesterificación que mejora las propiedades de fluidez, elimina la glicerina que es altamente viscosa y esto permite un mejor desempeño en motores (Van Gerpen 2005; Refaat 2009), todos los resultados obtenidos están dentro del rango de 1.9 a 6.0 mm²/s establecido por la norma ASTM D6751, son muy parecidos a la viscosidad del diésel fósil que según la norma ASTM D 975 debe de estar entre 1.3 y 4.1 mm²/s y concuerdan con los Hyun *et al.* (2007) de 2.7 mm²/s en biodiésel a partir de soya y son menores a los encontrados por Kywe (2009) de 4.0 mm²/s, los encontrados por Becker y Makkar (2008) de 4.4 mm²/s en biodiésel de *Jatropha curcas* y a los encontrados por Benjumea y sus colaboradores (2008) de 4.71 mm²/s en biodiésel de palma.

La variedad Cabo Verde fue estadísticamente menor a las otras dos variedades ya que fue 0.31 mm²/s menor a la variedad Hindú Salvadoreña y 0.59 mm²/s menor a la Criolla mexicana. Según Moser (2005), las razones más importantes en variabilidad en viscosidad cinemática pueden ser: el perfil de ácidos grasos, el contenido residual de glicerina y la presencia de gomas o de jabones. Según el Cuadro 5, que muestra los resultados del perfil

de ácidos grasos del biodiésel de las tres variedades no hay diferencias significativas en el perfil que puedan ocasionar esta diferencia en viscosidad, ya que los ácidos grasos de cadena larga tienden a incrementar la viscosidad, pero los ácidos grasos insaturados y con orientación *cis* a reducirla, la variedad Cabo Verde presenta iguales contenidos de ácidos grasos saturados y monoinsaturados que la Hindú Salvadoreña, por lo que la diferencia en viscosidad debe de radicar en algunas impurezas presentes en las muestras de Hindú Salvadoreña y de Criolla Mexicana o de menor contenido de glicerina en las muestras de Cabo Verde.

El punto de turbidez es la temperatura a la cual se empieza a opacar el biodiésel, se forma una especie de nubosidad, esto debido a la formación de ceras, que afectan las propiedades de fluidez del biodiésel que a su vez afectan el desempeño en un motor (Han Ng *et al.* 2009), este parámetro es particularmente importante en países o regiones con inviernos fríos y es el límite al cual el biodiésel empieza a cambiar sus propiedades y deja de ser utilizable ya que se empieza a volver sólido (Han Ng *et al.* 2009). El Cuadro 2 indica que los biodiésel de las tres variedades son estadísticamente iguales y tienen un relativo bajo punto de turbidez, lo cual es positivo porque permite su utilización a un mayor rango de temperaturas. Los resultados de punto de turbidez son menores a los obtenidos por Benjumea y sus colaboradores (2008) de 16° C en biodiésel de palma, mayores a los del diésel fósil que es de -5° C, a los obtenidos por Okullo *et al.* (2012) de 1° C, en biodiésel de *Jatropha curcas* y similares a los obtenidos por Sarin *et al.* (2006), Ying y Mohd (2011) de 2 a 4° C respectivamente en biodiésel de *Jatropha curcas*.

Altas concentraciones de ácidos grasos saturados y de cadena larga aumentan el punto de turbidez (Zuleta *et al.* 2012), el bajo punto de turbidez del biodiésel de *Jatropha curcas* elaborado se puede explicar por la gran cantidad de ácidos grasos insaturados que presenta, más de 75% en las tres variedades según el Cuadro 5.

Cuadro 3. Color del biodiésel.

| Fuente de biodiésel | Color | | |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | L ± D. E. ¹ | a ± D. E. | b ± D. E. |
| Criolla Mexicana | 76.71 ± 1.43 ^a | -2.31 ± 0.19 ^a | 9.25 ± 0.55 ^b |
| Cabo Verde | 76.19 ± 0.34 ^a | -2.88 ± 0.21 ^b | 12.30 ± 1.06 ^a |
| Hindú Salvadoreña | 68.32 ± 6.98 ^b | -2.61 ± 0.31 ^{ab} | 12.11 ± 1.08 ^a |
| ASTM D6751 | - | - | - |

¹D.E.= Desviación Estándar.

^{ab}Medias seguidas de letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas (P<0.05).

En cuanto al color los tres biodiésel presentaron un color amarillo claro y muy transparentes, la variedad Hindú Salvadoreña es diferente estadísticamente para su valor de L, lo cual indica que fue la más oscura de todas, los demás resultados concuerdan con lo obtenidos por Anguaya (2007) el cual también indica que a medida el biodiésel se va oxidando algunos pigmentos como carotenoides también además esto resulta en un

oscurecimiento del biodiésel. El valor a en biodiésel es prácticamente despreciable, ya que solo llega hasta un -2.8, sabiendo que el color verde va desde 0 hasta -60 de atribuyéndole trazas de color verde al combustible, resultados que concuerdan con los obtenidos por Anguaya (2007). El valor importante en esta escala es el de b, ya que este le atribuye el color amarillo, predominante en aceites y biodiésel, para este caso la variedad Criolla Mexicana fue estadísticamente diferente con un valor en la escala b de 9.25, tres unidades por debajo de las otras variedades, de igual manera la oxidación de carotenoides puede ocasionar esta diferencia. Los biodiésel de las tres variedades no mostraron diferencias en color perceptibles a simple vista.

Uno de los factores más importantes en la calidad de biodiésel es su estabilidad oxidativa, por ser de origen vegetal y su naturaleza lípida sufre las mismas degradaciones que un aceite o grasa, se autooxida y genera compuestos que alteran su funcionamiento y desempeño (Zuleta *et al.* 2012). El Cuadro 4 detalla los resultados para los parámetros más importantes que influyen en la estabilidad oxidativa.

Cuadro 4. Humedad y estabilidad oxidativa del biodiésel.

| Fuente de biodiésel | Humedad % \pm D. E. ¹ | AGL % \pm D. E. | Peróxidos meq/kg \pm D. E. | OSI h \pm D. E. |
|---------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Criolla Mexicana | 0.14 \pm 0.03 ^b | 0.09 \pm 0.00 ^a | 7.00 \pm 2.09 ^a | 4.02 \pm 0.47 ^a |
| Cabo Verde | 0.10 \pm 0.01 ^b | 0.10 \pm 0.02 ^a | 7.66 \pm 1.50 ^a | 3.40 \pm 0.79 ^a |
| Hindú Salvadoreña | 0.22 \pm 0.02 ^a | 0.11 \pm 0.01 ^a | 6.33 \pm 2.33 ^a | 4.71 \pm 1.71 ^a |
| ASTM D6751 | Max. 0.05 | Max. 0.25 | - | Min. 3 |

¹D.E.= Desviación Estándar.

^{ab}Medias seguidas de letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas (P<0.05).

Los resultados de humedad muestran diferencias significativas en Humedad solo para la variedad Hindú Salvadoreña con un promedio de 0.22% de agua, ninguna de las muestras cumplió con la norma ASTM D6751 y el proceso de secado a 105° C no se continuó para no maltratar más el biodiésel, se realizaron pruebas de hasta 30 horas en el Horno Fisher Scientific de aire forzado a 105°C, las que redujeron la humedad hasta valores no detectables por el Karl Fisher, pero también redujeron su Índice de estabilidad oxidativa a menos de 1 hora, por lo que se continuó el estudio con las humedades descritas en el Cuadro 4. Estos resultados son menores a los obtenidos por Manzanares (2011) con las variedades de *Jatropha curcas*: Cabo Verde e Hindú Salvadoreña de 0.6% y 0.7% respectivamente. El aceite inicial tenía una humedad de 0.05% para todas las variedades (Espinal 2012), pero con los lavados luego del proceso de transesterificación el contenido de agua se incrementó. Zuleta *et al.* (2012) recomienda el uso de sistemas de evaporación al vacío para lograr mejores extracciones de agua sin dañar el biocombustible.

El porcentaje de ácidos grasos libres fue estadísticamente igual para las tres variedades analizadas y todos están por debajo del límite establecido por la norma ASTM D6751 de 0.5 mg de KOH/ g de muestra, esto traducido a porcentaje se representa en un 0.25% de ácidos grasos libres expresados como ácido oleico, por la relación molar de KOH utilizado para

neutralizar un porcentaje determinado de ácidos grasos. Estos resultados son menores a los obtenidos por Okullo (2012) y Mazumdar (2012) y similares a los obtenidos por Nithiyantham *et al.* (2012), Lu *et al.* (2009), Manzanares (2011) y Cruz (2011). La presencia de ácidos grasos libres se debe a la ruptura de enlaces ésteres que genera el catalizador (NaOH) y la presencia de agua (Cruz, 2011).

El valor de acidez del biodiésel se incrementa a medida se aumenta la cantidad de peróxidos porque los enlaces ester del biodiésel se oxidan y forman peróxidos los cuales generan reacciones más complejas que involucran aldehídos los cuales se vuelven a oxidar en ácidos orgánicos (Bouaid *et al.* 2009). El índice de peróxidos es un indicador de la cantidad de compuestos generados por rancidez que existen en la muestra de aceite o de biodiésel, estos se incrementan cuando el biodiésel es expuesto a condiciones que promueven la autooxidación, así como la presencia de ácidos grasos polinsaturados, por lo que a menor índice de peróxidos mejor estabilidad oxidativa. Los resultados obtenidos no mostraron diferencias significativas y concuerdan con los de Cruz (2011) al día 45, con los de Zuleta *et al.* (2012) y con los de Jain y Sharma (2012) todos con biodiésel de *Jatropha curcas*. Aunque la ASTM D6751 no especifica un valor para peróxidos, éstos si afectan el índice de cetanos, que si está especificado por la norma ASTM D6751, a más peróxidos mayor es el índice de cetanos, lo que puede reducir el tiempo de ignición del combustible en un motor (Bouaid *et al.* 2009).

Según Knothe (2007), el índice de peróxidos no es un análisis muy adecuado para medir estabilidad oxidativa ya que al inicio del enrancimiento (degradación oxidativa) este valor se incrementa y medida avanza el proceso de oxidación éste se reduce debido a la formación de compuestos secundarios (Dantas *et al.* 2011).

El índice de estabilidad oxidativa (OSI por sus siglas en inglés: Oil Stability Index) es una prueba de deterioro oxidativo acelerado que mide al tiempo al cual ocurre el mayor cambio en la tasa de oxidación del biodiésel, es decir la máxima segunda derivada de la conductibilidad eléctrica generada por los ácidos orgánicos volátiles (mayormente ácido fórmico) con respecto al tiempo. Los resultados mostrados en el Cuadro 4 indican que no existieron diferencias significativas entre los biodiésel de las tres variedades y todos cumplieron con la norma ASTM D6751 que establece un límite mínimo de 3 horas de inducción. Estos resultados superan ligeramente a los obtenidos por Zuleta *et al.* (2012), Sarin *et al.* (2007) y Jain y Sharma (2012) de 3.28, 3.23 y 3.27 horas de inducción respectivamente el cual es explicado por su alto contenido de ácidos grasos polinsaturados como el Ácido α -linoleico, el cual reduce el tiempo de inducción considerablemente comparándolo con otros aceites como el de palma el cual según Cruz (2011) tiene un tiempo de inducción al día 0 de 18 horas, según Sarin *et al.* (2007) de 16 horas y el biodiésel de soya, que llega a 9 horas según Dunn (2005).

Según el Southwest Research Institute (2005), la medición de la estabilidad oxidativa por OSI con Rancimat es más acertada que las mediciones con peróxidos, ya que el Rancimat mide el aumento de productos secundarios del proceso de oxidación, mientras que el índice de peróxidos esta limitado solo a peróxidos (productos primarios del proceso de oxidación).

El Cuadro 5 muestra el perfil de ácidos grasos del biodiésel de las tres variedades, identificando un total de 16 ácidos grasos diferentes y destacando como los más importantes de acuerdo a su concentración en el biodiésel al ácido palmítico (16:0), ácido esteárico (18:0), ácido oleico (18:1 n9 cis-9) y al ácido α -linoleico (18:2n6 cis-6,12), composición muy parecida a la obtenida por Jain y Sharma (2011).

Los resultados no muestran diferencias significativas en el total de ácidos grasos saturados, la variedad Criolla Mexicana es estadísticamente diferente al resto en ácidos grasos monoinsaturados y las tres variedades son diferentes en ácidos grasos polinsaturados, dentro de los polinsaturados solo el Ácido α -linoleico (18:2n6 cis-6,12) muestra diferencias significativas entre variedades, datos que concuerdan con los obtenidos por Manzanares (2011) en los cuales la cantidad de Ácido α -linoleico de la variedad Cabo Verde fue menor a la de Hindú Salvadoreña, contrario a los resultados mostrados en el Cuadro 5. Según Manzanares (2011) el biodiésel de palma africana (*Elaeis guineensis*) tiene solo 9.34% de Ácido α -linoleico y solo un 9.87% de ácidos grasos polinsaturados, esta puede ser una razón importante por la cual el tiempo de inducción en OSI de la palma africana es mucho mayor al de las tres variedades de *Jatropha curcas* (Sarin *et al.* 2007).

Cuadro 5. Perfil de ácidos grasos del biodiésel.

| Ácido graso | Criolla Mexicana % \pm D. E. ¹ | Cabo Verde % \pm D. E. | Hindú Salvadoreña % \pm D. E. |
|------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------------|
| 14:0 | 0.12 \pm 0.00 ^X | 0.07 \pm 0.00 ^Y | 0.08 \pm 0.00 ^Y |
| 15:0 | 0.01 \pm 0.00 ^X | 0.01 \pm 0.00 ^X | 0.01 \pm 0.00 ^X |
| 16:0 | 13.22 \pm 0.00 ^X | 12.72 \pm 1.39 ^X | 13.85 \pm 0.03 ^X |
| 17:0 | 0.08 \pm 0.01 ^{XY} | 0.07 \pm 0.01 ^Y | 0.10 \pm 0.00 ^X |
| 18:0 | 7.49 \pm 0.00 ^X | 6.62 \pm 0.71 ^Y | 7.21 \pm 0.02 ^{XY} |
| 20:0 | 0.17 \pm 0.01 ^X | 0.16 \pm 0.01 ^X | 0.16 \pm 0.01 ^X |
| 22:0 | 0.02 \pm 0.00 ^X | 0.02 \pm 0.01 ^X | 0.02 \pm 0.02 ^X |
| 16:1 cis-9 | 0.72 \pm 0.02 ^Y | 0.82 \pm 0.08 ^X | 0.85 \pm 0.04 ^X |
| 17:1 cis-10 | 0.04 \pm 0.00 ^Y | 0.04 \pm 0.01 ^X | 0.05 \pm 0.00 ^X |
| 18:1n9 cis-9 | 34.07 \pm 0.04 ^Y | 40.14 \pm 1.30 ^X | 39.57 \pm 0.09 ^X |
| 18:1 cis-11 | 1.09 \pm 0.03 ^X | 1.58 \pm 0.09 ^X | 1.19 \pm 0.06 ^X |
| 20:1 cis-11 | 0.06 \pm 0.00 ^X | 0.05 \pm 0.00 ^Y | 0.05 \pm 0.00 ^Y |
| 18:2n6 cis- 9,12 | 42.62 \pm 0.02 ^X | 37.83 \pm 1.06 ^Y | 36.59 \pm 0.07 ^Z |
| 18:3n3 cis-9,12,15 | 0.16 \pm 0.02 ^X | 0.18 \pm 0.02 ^X | 0.17 \pm 0.02 ^X |
| 20:5n3 cis-5,8,11,14,17 | 0.04 \pm 0.00 ^X | 0.03 \pm 0.00 ^X | 0.03 \pm 0.00 ^X |
| 22:5 cis-7,10,13,16,19 | 0.01 \pm 0.00 ^X | 0.01 \pm 0.01 ^X | 0.01 \pm 0.02 ^X |
| Σ Ac. Saturados | 21.13 \pm 0.03 ^X | 19.69 \pm 2.12 ^X | 21.45 \pm 0.04 ^X |
| Σ Ac. Monoinsaturados | 36.00 \pm 0.02 ^Y | 42.22 \pm 1.16 ^X | 41.73 \pm 0.07 ^X |
| Σ Ac. Polinsaturados | 42.85 \pm 0.02 ^X | 38.07 \pm 1.06 ^Y | 36.81 \pm 0.08 ^Z |

¹D.E.= Desviación Estándar.

^{XYZ}Medias seguidas de letras diferentes en la misma fila indican diferencias estadísticas (P<0.05).

Las proporciones de los resultados obtenidos concuerdan con los perfiles de ácidos grasos encontrados por Raja (2011), Berchmans e Hirita (2008), Ying y Mohd (2011) Sarin *et al.* (2007) y con Makkar y Becker (2008) pero difieren en el porcentaje de ácido mirístico con Okullo *et al.* (2012) y Devappa *et al.* (2010) ya que éstos no lo encontraron en cantidades considerables, con Zuleta *et al.* (2012) que encontró mayor porcentaje de ácido palmítico (17%) y más de ácido esteárico (11.02%), no encontró ácido mirístico pero en los demás ácidos sus resultados fueron muy parecidos.

Las diferencias entre las variedades Criolla Mexicana y las otras en total de ácidos grasos monoinsaturados y polinsaturados también fueron encontradas por Makkar y Becker (2008) evaluando variedades tóxicas y no tóxicas de *Jatropha curcas*, obteniendo similares resultados la variedad no tóxica a los obtenidos en este estudio por la Criolla Mexicana.

El perfil de ácidos grasos influye mucho en el comportamiento físico y químico del biodiésel; para el cálculo del índice de cetanos los ácidos grasos saturados lo aumentan mientras que los ácidos grasos insaturados los disminuyen según la fórmula de Bamgboye y Hansen (2008). El Cuadro 6 muestra los resultados obtenidos para las características energéticas del biodiésel estudiado.

Cuadro 6. Potencial energético en el biodiésel.

| Fuente de biodiésel | Índice de cetanos CN \pm D. E. ¹ | Energía bruta MJ/kg \pm D. E. ¹ |
|---------------------|--|---|
| Criolla Mexicana | 52.18 \pm 0.00 ^b | 39.58 \pm 2.71 ^a |
| Cabo Verde | 52.89 \pm 0.40 ^a | 41.76 \pm 6.79 ^a |
| Hindú Salvadoreña | 53.45 \pm 0.02 ^a | 43.75 \pm 4.17 ^a |
| ASTM D6751 | Min. 47 | - |

¹D.E.= Desviación Estándar.

^{ab}Medias seguidas de letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas (P<0.05).

El hexadecano o también llamado cetano, es la unidad base de comparación para la medición de este índice, este tiene un valor de cetano de 100 asignado por la ASTM; el índice de cetanos es influenciado por el tipo de ácidos grasos que existen en el biocombustible, cadenas de carbonos largas y saturadas tienden a incrementar el índice así como cadenas cortas o insaturadas tienden a reducirlo (Moser 2009).

Los biodiésel de las tres variedades están sobre el límite exigido por la norma ASTM D6751. De las tres variedades sólo la variedad Criolla Mexicana resultó diferente de las otras dos, esta diferencia se da ya que esta variedad presenta el mayor porcentaje de Ácido α -linoleico que es uno de los ácidos grasos que se multiplica por un coeficiente negativo en la fórmula de Bamgboye y Hansen (2008), aunque la diferencia numérica no fue tan abrupta, la poca diferencia en el perfil de ácidos grasos, resultó en diferencias estadísticas en el cálculo de índice de cetanos para esa variedad.

Los datos obtenidos concuerdan con el rango de las diferentes variedades de *Jatropha curcas* probadas por Aminul *et al.* (2012) de 46.4 a 53.7, y muy cercanos a los obtenidos por Manzanares (2011), son mayores a los encontrados por Fukuda *et al.* (2001) de 49 en biodiésel de aceite de girasol (*Helianthus annuus*), y menores a los encontrados por Sarin *et al.* (2007) de 57, Makkar y Becker (2008) de 58, Patil y Deng (2009) de más de 60, todos en *Jatropha curcas*, además son inferiores a los encontrados por Benjumea *et al.* (2008) de 57 en palma africana. Los biodiésel de las tres variedades están dentro de los parámetros establecidos por la norma ASTM D975 para diésel fósil, el cual establece un rango de 40 a 55 (Kywe *et al.* 2009).

El Cuadro 6 muestra los resultados del análisis de energía aportada por unidad de masa del biodiésel expresada en Mega Joules por kilogramo de muestra, los biodiésel de las tres variedades no muestran diferencias significativas a pesar de tener valores numéricamente bastante alejados, en este caso hubo mucha variabilidad en los datos, por lo que no permitió encontrar diferencias claras. Los datos mostrados por las variedades Cabo Verde e Hindú Salvadoreña concuerdan con los obtenidos por Okullo *et al.* (2012) de 42.15 MJ/kg, con los obtenidos por Mofijur (2012) de 42.04 MJ/kg, los obtenidos por Raja *et al.* (2011) de 42.8 MJ/kg y los resultados de Deng *et al.* (2011) de 41.72 MJ/kg. Los resultados de la variedad Criolla Mexicana concuerdan con los obtenidos por Nithiyantham *et al.* (2012) de 39.65 MJ/kg, las variedades Criolla Mexicana e Hindu Salvadoreña están en el rango que obtuvo Makkar y Becker (2008) de 38.9 a 41.3 MJ/kg y el rango obtenido por Thompson *et al.* (1998) de 39.8 a 42.5 MJ/kg en biodiésel de canola (*Brassica napus*). Estos resultados están por encima de los obtenidos por Benjumea *et al.* (2008) de 39.8 en biodiésel de palma, a los obtenidos por Mis (2008) de 39.5 MJ/kg también en biodiésel de palma. Para esta prueba no existe un rango establecido por la norma ASTM D6751.

4. CONCLUSIONES

- No hubo diferencias en calidad del biodiésel producido a partir del aceite de las tres variedades de *Jatropha curcas* ya que cumplieron con todos los parámetros de la norma ASTM D6751, a excepción de humedad.
- Los biodiésel elaborados con las tres variedades no presentaron diferencias en rendimiento, estabilidad oxidativa ni calorimetría.

5. RECOMENDACIONES

- Hacer un estudio de optimización de secado de biodiésel, utilizando mayores tiempos y menores temperaturas o utilizando evaporación al vacío y analizar su efecto en la estabilidad oxidativa.
- Realizar un estudio a escala de planta piloto o industrial con las mismas variedades de *Jatropha curcas*.
- Evaluar física y químicamente distintos lotes de variedades de diferentes regiones geográficas a fin determinar variabilidad entre mismas variedades por factores como clima, suelo, edad de la planta y tiempo de cosecha.
- Hacer estudios similares comparando otras variedades de *Jatropha curcas* bajo las mismas condiciones.

6. LITERATURA CITADA

Alamu, O., M. Waheed y S. Jekayinfa. 2007. Effect of ethanol palm kernel oil ratio on alkali catalyzed biodiesel yield. Elsevier. Fuel Volumen 87 , 8-9 (2008): 1529-1533.

Aminul, I; Z. Yaakob, N. Anuar y N. Osman. 2012. Physicochemical properties of *Jatropha curcas* Seed oil from different origins and candidate plus plants (CPPs). Journal of the American Oil Chemist Society (2012) 89: 293-300.

Anguaya Velásquez, C.A. 2007. Estudio de estabilidad en almacén del biodiésel obtenido de aceite de soya (*Glycine max*), palma africana (*Elaeis guineensis*), maíz (*Zea mays*) higuierilla (*Ricinus communis*) y piñon (*Jatropha curcas*). Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, Honduras. 71 p.

Baccaro Díaz, J. R. 2007. Evaluación de rendimiento de biodiésel elaborado a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y etanol anhidro de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, Honduras. 34 p.

Bamgboye, A., A. Hansen. 2008. Prediction of cetane number of biodiesel fuel from the fatty acid methyl ester (FAME) composition. International Agrophysics (2008) 22: 21.29.

Berchmans, H; S. Hirata. 2007. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. Elsevier. Biosource Technology 99 (2008): 1716-1721.

Benjumea, P., J. Agudelo y A. Agudelo. 2007. Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends. Elsevier. Fuel 87 (2008): 2069-2075.

Bouaid, A., M. Martinez y J. Aracil. 2009. Production of biodiesel from bioethanol and *Brassica carinata* oil: Oxidation stability study. Elsevier. Bioresource Technology 100 (2009): 2234-2239.

Cruz Quiroz, B. A. 2011. Evaluación de estabilidad en almacenamiento en dos ambientes del biodiésel de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y dos variedades de piñon (*Jatropha curcas*). Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, Honduras. 26 p.

Dantas M., A. Albuquerque, A. Barros y A. Souza. 2011. Evaluation of the oxidative stability of corn biodiesel. Elsevier. Fuel 90 (2011):773-778.

- Devappa, R., J. Maes, H. Makkar, W. De Greyt y Becker, K. 2010. Quality of biodiesel prepared from phorbol ester extracted *Jatropha curcas* oil. Journal of the American Oil Chemist Society (2010) 87: 697-704.
- Dunn R. 2005. Oxidative Stability of Soybean oil fatty acid methyl esters by Oil Stability Index (OSI). Journal of the American Oil Chemist Society 82: 381-387.
- Espinal Méndez, Á.F. 2012. Composición de la semilla y evaluación de la calidad de aceite y torta desgrasada de tres variedades de piñón (*Jatropha curcas*). Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, Honduras. 32 p.
- Fukuda, H., A. Kondo y H. Noda. 2001. Biodiesel fuel production by transesterification. Journal of Bioscience and bioengineering Vol. 92 No. 5: 406-416.
- Gubitz G., M. Mittelbach y M. Trabi. 1999. Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. Bioresource Technology 67: 73-82.
- He, W., A. King y A. Khan. 2011. Anylisis of seed phorbol-ester and curcin content together with genetic diversity in multiple provenances of *Jatropha curcas* L. from Madagascar and Mexico. Elsevier. Plant Physiology and Biochemistry 49 (2011): 1183-1190.
- Hyun, S., S. Han y C. Sik. (2008) Experimental investigation on the fuel properties of biodiesel and its blends at various temperatures. Energy and Fuels (2008) 22: 652-656.
- Jain, S. y M. Sharma. 2011. Long term storage stability of *Jatropha curcas* biodiesel. Elsevier. Energy 36 (2011): 5409-5415.
- Jain, S. y M. Sharma. 2012. Study of oxidation stability of *Jatropha curcas* diesel blends. Biofuel Research Laboratory. International Journal of energy and Environment Vol. 2, Issue 3: 533-542.
- Kywe, T. y M. Oo. 2009. Production of biodiesel from *Jatropha* oil (*Jatropha curcas*) in pilot plant. Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology Volume 28-February ISSN: 2070-3740: 481-487.
- Makkar, H., A. Aderibigbe y K. Becker. 1997. Comparative evaluation of non-toxic and toxic varieties of *Jatropha curcas* for chemical composition, digestibility, protein degradability and toxic factors. Elsevier. Food Chemistry Vol. 62 No. 2: 207-215.
- Makkar, H., A. Basha, G. Francis y K. Becker. 2009. A comparative study of biochemical traits and molecular markers for assessment of genetic relationships between *Jatropha curcas* L. germplasm from different countries. Plant Science Volume 176, Issue 6: 812-823.
- Makkar, H., K. Becker. 2009. *Jatropha curcas*, a promising crop for the generation for biodiesel and value-added coproducts. European Journal of Lipid Science and Technology. (2009) 111: 773-787.
- Makkar, H., K. Becker, B. Schmook. 1998. Edible provenances of *Jatropha curcas* from Quintana Roo state of Mexico and effect of roasting on antinutrient and toxic factors in seeds. Plant Foods for Animal Nutrition 52: 31-36.

- Manzanares Paz, K.G. 2011. Predicción del número de cetano de biodiésel de piñon (*Jatropha curcas*) y Palma Africana (*Elaeis guineensis*) por cromatografía de gases.). Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano. 27 p.
- Mazundar, P., V. Borugadda, V. Goud, y L. Sahoo. 2012. Physico-chemical characteristics of *Jatropha curcas* L. of North East India for exploration of biodiesel. Elsevier. Biomass and Bioenergy (2012): 9 p.
- Mis Solval, K.E. 2008. Efecto del tiempo de freído del aceite de palma (*Elaeis guineensis*) sobre las características físico-químicas del biodiésel.). Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano. 30 p.
- Misra, M y A. Misra. 2010. *Jatropha*: The biodiesel plant biology, tissue culture and genetic transformation- A review. International Journal of pure and Applied Science and Technology (2010) 1-1:11-24.
- Moser, B. 2008. Biodiesel production, properties and feedstocks. The society for In Vitro Biology 45: 229-266.
- Mofijur, M., H. Masjuki, M. Kalam y M. Hazrat. 2012. Prospects of biodiesel from *Jatropha* in Malaysia. Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(2012): 5007-5020.
- Myint, L. y M. El-Halwagi. 2009. Process analysis and optimization of biodiesel production from soybean oil. Clean Technologies Environmental Policy (2009) 11: 263-276.
- Naresh, B., M. Reddy, P. Vijayalakshmi, y P. Devi. 2012. Physico-chemical screening of accessions of *Jatropha curcas* for biodiesel production. Elsevier. Biomass and Energy 40 (2012): 155-161.
- Ng, J., H. Ng y S. Gan. (2010). Advances in biodiesel fuel for application in compression engines. Clean Technologies Environmental Policy (2010) 12: 459-493.
- Nithiyamtham, S; P. Siddhuraju y G. Francis. 2012. Potencial of *Jatropha curcas* as a biofuel, animal feed and health products. Journal of the American Oil Chemist Society. (2012) 89: 961-972.
- Nzihou, J., L. Matos y F. Mbemba. 2009. Characteristics and composition of *Jatropha curcas* oils, Variety Congo- Brazzavile. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology 1(3) ISSN: 2040-7467: 154-159.
- Okullo, A., A. Temu, P. Ogwok, W. Ntalikwa. 2012. Physico-Chemical properties of biodiesel from *Jatropha* and Castor oils. International Journal of Renewable Energy Research Vol.1, No.1. 6 p.
- Patil, P. y S. Deng. 2009. Optimization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oils. Fuel 88 (2009): 1302-1306.
- Phan, A. y T. Phan. 2008. Biodiesel Production from waste cooking oils. Elsevier. Fuel 87 (2008): 3490-3496.

Qiul, J., X. Fan y H. Zou. 2011. Current Problems: Alternative Fuels. Development of biodiesel from inedible feedstock through various production process. Review. Chemistry and Technology of fuels and oils. Volume 47, No. 2 (Mayo 2011): 102-111.

Raja, A; D. Robinson y R. Lee. 2011. Biodiesel production from *Jatropha* oil and its characterization. School of mechanical Sciences, Research Journal of Chemical Sciences Vol. 1 (1) (Abril 2011): 81-87.

Refaat, A. 2009. Correlation between the chemical structure of biodiesel and its physical properties. International Journal of Environment Science and Technology Vol. 6, No. 4: 667-694.

SAG (Secretaria de Agricultura y Ganadería de Honduras). 2011. Incrementan producción de palma africana en 18 mil hectáreas nuevas. Artículo en línea consultado el 31 de mayo de 2012 y disponible en:

http://www.sag.gob.hn/index.php?option=com_content&task=view&id=1571&Itemid=0

Sarin, A; R. Arora, N. Singh, R. Sarin y K. Kundu. 2009. Effects of blends of Palm-*Jatropha*-*Pongamia* biodiesels on cloud point and pour point. Elsevier. Energy 34 (2009): 2016-2012

Sarin, R; M. Sharma, S. Sinharay y R. Malhotra. 2006. *Jatropha*-Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. Elsevier. Fuel 86 (2007): 1365-1371.

Shahbazi, M; B. Khoshandam, M. Nasiri y Ghazvini. 2011. Biodiesel production via alkali-catalyzed transesterification of Malaysian RBD palm oil- Characterization, kinetics model. Elsevier. Journal of the Taiwan institute of Chemical Engineers 43 (2012): 504-510.

SwRI (Southwets Research Institute). 2005. Characterization of biodiesel oxidation and oxidation products. 51 páginas.

Suwito, S; G. Dragone, H. Sulisyo y B. Murachman. 2012. Optimization of pretreatment of *Jatropha* oil with high free fatty acids for biodiesel production. Frontiers of Chemical Science and Engineering DOI 10.1007. 6 p.

Van Gerpen, J. 2005. Biodiesel processing and production. Fuel Processing Technology 86 (2005): 1097-1107.

Ying K. y T. Mohd. 2011. A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011): 2240-2251.

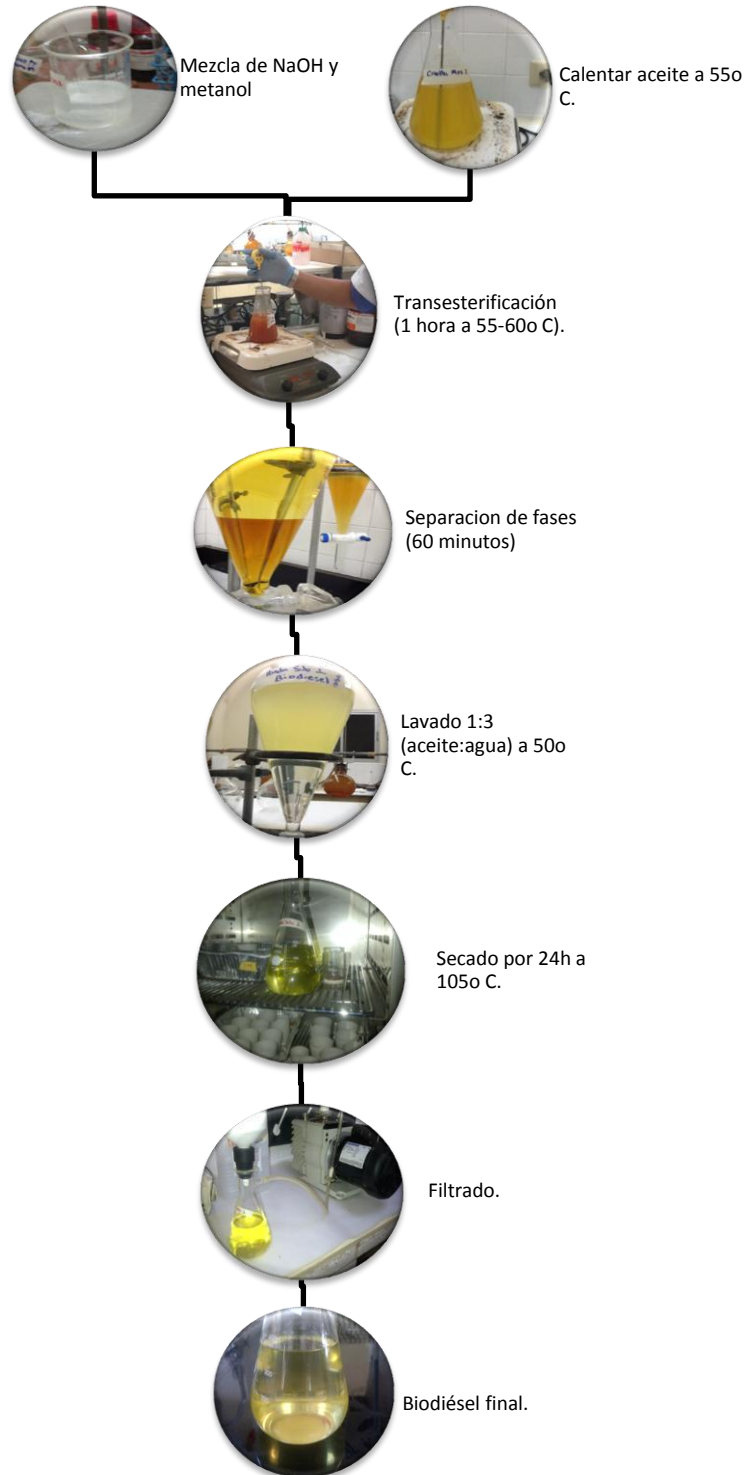
Zuleta, E; L. Rios y P. Benjumea. 2012. Oxidative stability and cold flow behavior of palm, sacha-inchi, *jatropha* and castor oil biodiesel blends. Elsevier. Fuel Processing and Technology 102 (2012): 96-101.

7. ANEXOS

Anexo 1. Proceso detallado de elaboración de biodiésel.

1. Se pesó la cantidad de aceite a utilizar de la muestra con un error de ± 0.01 g en un Erlenmeyer apropiado al volumen.
2. Luego se procedió a pesar la cantidad de metanol con un error de ± 0.01 g relacionándolo con el peso molecular de cada aceite, utilizando una relación molar de 6:1, esto quiere decir por cada mol de aceite se aplicaron seis de metanol (CH_3OH). Se pesó el hidróxido de sodio (NaOH) usado como catalizador al 1% con relación al peso del aceite con un margen de error de ± 0.01 g. Para el cálculo de la relación molar se sumó el peso del glicerol más el peso de los tres ácidos grasos más comunes en el aceite o grasa con la que se trabajó, los rangos más comunes oscilan entre 800 a 900 gramos por mol.
3. Se calentó el aceite hasta que llegó a 55°C , en una placa magnética de agitación constante a 400 rpm.
4. Se mezcló el metanol con el catalizador (NaOH), y se agitó con un agitador magnético, sin calentar por 20min aproximadamente. Hasta que se disolvieron los pellets.
5. Se mezcló el metóxido de sodio con el aceite a 55°C y se subió la temperatura a 60°C por 1hr controlando esta temperatura entre 55°C y 60°C , se pudo observar cambio de color de amarillo a un color miel oscuro luego de mezclar, esto debido a la transesterificación.
6. Se dejó reposando en un embudo decantador de 20-30 minutos para separar el glicerol (fase inferior) del biodiésel (fase superior), dejar mucho tiempo decantando hace más solido al glicerol y más difícil de separarlo. Se esperaron 30 minutos más, antes de empezar a lavarlo.
7. Una vez ya separadas las fases de biodiésel y glicerol se procedió a hacer varios lavados con agua destilada a 50°C utilizando una relación de 1:3 con base al peso del aceite, se hacen aproximadamente de 3-5 lavados hasta que el agua residual no salga con espuma y el biodiésel llegue a un pH de 7.0.
8. Se decantó el biodiésel para separar el agua por gravedad y luego se introdujo al horno a una temperatura de 105°C por 24hrs. Se pueden lograr métodos que deterioren menos el biodiésel con más tiempo y menos temperatura. También el uso de evaporadores al vacío para lograr separar el agua a menores temperaturas.

9. Luego se filtró al vacío (también se puede centrifugar a 2500 rpm por 20 min) para la eliminación total de impurezas como jabón o gomas (fosfátidos), que habían en el biodiésel.
10. Se obtuvo el biodiésel y se dejó almacenado en botellas de Tereftalato de Polietileno cubierto con papel aluminio en una habitación fresca y oscura.



Anexo 2. Flujograma ilustrado del proceso de elaboración de biodiésel.

Anexo 3. Parámetros de la norma ASTM D6751.

| Propiedad | Método | Límite | Unidades |
|-----------------------------|----------|----------|--------------------|
| Agua y sedimentos | D2709 | 0.05 max | % volumen |
| Viscosidad cinemática, 40 C | D445 | 1.9-6.0 | mm ² /s |
| Índice de cetanos | D613 | 47 min | |
| Punto de turbidez | D2500 | - | ° C |
| Valor de acidez | D664 | 0.5 max | mg KOH/g |
| Estabilidad oxidativa | EN 15751 | 3 min | horas |

Anexo 4. Factores que afectan el rendimiento del biodiésel.

Existen muchos factores que afectan el rendimiento ajenos a la reacción de transesterificación (temperatura, tiempo, catalizador y alcohol) como la calidad del aceite a utilizar para la producción, elevados porcentajes de ácidos grasos libres (2% o más) o cantidades de agua elevadas (1 al 2%) típicas de un aceite crudo sin refinar interfieren en la reacción y resultan en la formación de jabones, que por sus características anfipáticas tienden de diluirse muy bien en la matriz del biodiésel y dificultan la separación con la glicerina y además incrementan el número de lavados (Van Gerpen 2005), esterificaciones previas al proceso de transesterificación mejoran rendimientos que pueden llegar incluso hasta un 99% combinando catalizadores ácidos fuertes y alcalinos como el ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio o también con el uso de algunas lipasa producidas por bacterias como *Candida antarctica* o *Burkholderia cepacia* (Nithiyantham *et al.* 2012), usar catalizadores alternativos como el metilato de sodio también logran rendimientos por encima del 97% (Myint y El-Halwagi 2009).

El aumento en la proporción molar del alcohol utilizado en la reacción tiene un efecto directo en el rendimiento del biodiésel e incrementa hasta llegar a relaciones molares de 10:1 donde el rendimiento disminuye, de igual manera con la concentración del catalizador, se pueden mejorar rendimientos hasta utilizar un máximo de 2% de catalizador con respecto al peso del aceite (Patil y Deng 2009).

El aceite refinado de palma bajo condiciones similares de transesterificación a las usadas en este estudio alcanza un rendimiento de 97.54% (Baccaro 2007) y de 81% (Shahbazi *et al.* 2012). Utilizando aceites usados con proporciones molares de 7:1 y 8:1 se han obtenido rendimientos de 88% y de 90% (Phan y Phan 2008), siendo la calidad del refinado y la combinación de factores de transesterificación como la concentración de catalizadores los factores que más afectan el rendimiento.

Anexo 5. Cálculos para la transformación de mg de KOH/g de muestra a porcentaje de ácidos grasos libres expresados como ácido oleico.

Peso molecular del KOH: 56.1 g/mol

Peso molecular del Ácido oleico: 282.48 g/mol

Máximo de KOH a utilizar para neutralizar según la ASTM: 0.5 mg KOH/g de muestra.

56.1 g de KOH es necesario para neutralizar 282.48 g de Ácido oleico.

Cantidad de Ácido oleico neutralizado utilizando el parámetro máximo de la norma ASTM D6751:

$$\frac{\left(\frac{0.0005 \text{ g KOH}}{\text{kg de muestra}} \times \frac{282.48 \text{ g de Ac. oleico}}{\text{mol}} \right)}{56.1 \text{ g} \frac{\text{KOH}}{\text{mol}}}$$

$$= 2.51 \text{ g de Ac. oleico} / \text{kg de muestra}$$

$$\approx 0.251\% \text{ de Ácidos grasos libres expresado como Ácido oleico.}$$

Anexo 6. Resumen de ANDEVA.

| Análisis | F | Pr > F ¹ | CV% ² |
|---------------------------------|-------|---------------------|------------------|
| Rendimiento | 0.85 | 0.474 | 2.06 |
| Viscosidad cinemática, 40 C | 24.38 | <0.0001 | 6.06 |
| Punto de turbidez | 2.71 | 0.0989 | 12.08 |
| Color L* | 7.80 | 0.0048 | 5.58 |
| a* | 8.6 | 0.0032 | 12.69 |
| b* | 19.32 | <0.0001 | 8.34 |
| Humedad | 27.96 | <0.0001 | 17.54 |
| Ácidos grasos libres | 2.68 | 0.1014 | 16.09 |
| Peróxidos | 0.66 | 0.5312 | 28.72 |
| Índice de estabilidad oxidativa | 2.01 | 0.1682 | 27.86 |
| Σ Ac. Grasos saturados | 3.48 | 0.0574 | 5.09 |
| Σ Ac. Grasos monosaturados | 158 | <0.0001 | 1.68 |
| Σ Ac. Grasos polisaturados | 159 | <0.0002 | 1.57 |
| Índice de cetanos | 21.73 | 0.0018 | 0.44 |
| Calorimetría | 1.10 | 0.3577 | 11.65 |

¹Probabilidades significativas menores <0.05.

²CV= Coeficiente de variación.

Anexo 7. Análisis físicoquímicos del aceite utilizado para la elaboración del biodiésel.

Propiedades físicas de los aceites semi-refinados de *Jatropha curcas*.

| Variedad | Viscosidad 40°C (mm ² /s) | | Punto de turbidez (°C) | |
|-------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | Media±D.E. ¹ | %C.V. ² | Media±D.E. ¹ | %C.V. ² |
| Cabo Verde | 31.2±0.46 ^a | 1.4 | 2.60±0.18 ^b | 6.9 |
| Criolla Mexicana | 33.1±0.04 ^a | 0.1 | 3.05±0.10 ^a | 3.2 |
| Hindú Salvadoreña | 32.1±0.60 ^a | 1.8 | 2.26±0.16 ^c | 7.0 |
| Noma DIN V 51605 | Máximo 36 cSt | | | SL ³ |

Letras diferentes en misma columnas indican diferencias estadísticas (p<0.05)

¹D.E.= Desviación Estándar.

²%C.V.= Coeficiente de variación.

³SL= Sin limite.

Análisis de color de los aceites semi-refinados de *Jatropha curcas*.

| Variedad | Color LAB | | | | | |
|-------------------|-------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|
| | L ±DE ¹ | %CV ² | a ± DE ¹ | %CV ² | b ±DE ¹ | %CV ² |
| Cabo Verde | 58.49±0.02 ^c | 0.04 | -1.9±0.02 ^a | 1.1 | 15.6±0.02 ^a | 0.1 |
| Criolla Mexicana | 59.5±0.04 ^b | 0.08 | -2.1±0.05 ^a | 2.3 | 11.0±0.04 ^c | 0.4 |
| Hindú Salvadoreña | 60.4±0.10 ^a | 0.27 | -2.5±0.10 ^b | 6.3 | 13.6±0.2 ^b | 1.5 |

Letras diferentes en misma columnas indican diferencias estadísticas (p<0.05)

¹D.E.= Desviación Estándar.

²%C.V.= Coeficiente de variación.

Propiedades químicas de los aceites semi-refinados de *Jatropha curcas*.

| Variedad | Humedad (%) | | Ácidos grasos libres (%) | | Energía bruta (Cal/100g) | |
|-------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| | Media±D.E. ¹ | %C.V. ² | Media±D.E. ¹ | %C.V. ² | Media±D.E. ¹ | %C.V. ² |
| Cabo Verde | 0.058±0.0012 ^a | 2.1 | 0.039±0.0012 ^a | 3.1 | 899±0.039 ^b | 0.004 |
| Criolla Mexicana | 0.056±0.0007 ^b | 1.3 | 0.028±0.0003 ^b | 1.3 | 899±0.018 ^b | 0.002 |
| Hindú Salvadoreña | 0.052±0.0012 ^c | 2.4 | 0.019±0.0003 ^c | 2.0 | 900±0.012 ^a | 0.001 |
| Noma DIN V 51605 | Máximo 0.0750% | | Máximo 2% | | Mínimo 860 cal/100g | |

Letras diferentes en misma columnas indican diferencias estadísticas (p<0.05)

¹D.E.= Desviación Estándar.

²%C.V.= Coeficiente de variación.

Oxidación de los aceites semi-refinados de *Jatropha curcas*.

| Variedad | Índice de peróxido | | Estabilidad oxidativa | |
|-------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | Meq/kg±D.E. ¹ | %C.V. ² | Horas±D.E. ¹ | %C.V. ² |
| Cabo Verde | 4.00±0.04 ^a | 1.0 | 11.7±0.46 ^a | 3.9 |
| Criolla Mexicana | 1.96±0.08 ^c | 4.1 | 11.2±0.97 ^a | 8.8 |
| Hindú Salvadoreña | 2.73±0.23 ^b | 8.5 | 10.7±0.84 ^a | 7.8 |
| Norma DIN V 51605 | SL ³ | | Mínimo 6 horas | |

Letras diferentes en misma columnas indican diferencias estadísticas (p<0.05)

¹D.E.= Desviación Estándar.

²%C.V.= Coeficiente de variación.

³SL= Sin limite.