

Parámetros de calidad del biodiésel de aceite de palma, las mezclas diésel - biodiésel y su incidencia en el desempeño de motores diésel

Quality parameters of palm oil biodiesel, diesel-biodiesel blends and their impact on the performance of diesel engines

Autores

Johan A. Reyes B.

Investigador Biodiésel, Programa
Procesamiento (Cenipalma)

Guido A. Sierra R.

Líder Área Ingeniería, Programa
Procesamiento (Cenipalma)

Jesús A. García-Núñez.

Coordinador Programa Procesa-
miento (Cenipalma)

Palabras clave

Biodiésel, aceite de palma, calidad
combustibles, desempeño
motores diésel

Biodiesel, palm oil, quality fuels,
performance diesel engines

Recibido: 8 marzo 2012
Aprobado: 30 marzo 2012

Resumen

La búsqueda de combustibles alternos a los derivados del petróleo ha llevado al desarrollo de combustibles a partir de diversas fuentes, incluidas las materias primas renovables, tales como las grasas y los aceites. Existen combustibles que se pueden derivar de los triacilgliceroles que contiene la materia prima. Uno de ellos es el biodiésel, que se define como mezclas de mono-alkyl ésteres de aceites vegetales o grasas animales. Este artículo aborda aspectos generales del uso del biodiésel de aceite de palma en motores diésel, la normatividad vigente y los factores que inciden en su calidad.

Abstract

The quest for alternative fuels to petroleum has led to the development of fuels from various sources, including renewable raw materials such as fats and oils. There are fuels that can be derived from triacylglycerols containing raw material. One of them is biodiesel, defined as blends of mono-alkyl esters of vegetable oils or animal fats. This article discusses general aspects of the use of palm oil biodiesel in diesel engines, the current regulations and the factors that affect the quality of biodiesel.



Antecedentes

La dependencia de las reservas de combustibles fósiles, la creciente demanda del diésel, la incertidumbre que rodea su disponibilidad y las altas emisiones contaminantes generadas por su uso, son las principales causas para buscar nuevas alternativas de energía que puedan complementar o sustituir a los combustibles fósiles (Shay, 1993).

Hace más de cien años, Rudolf Diesel inventó un motor que podía funcionar con aceites vegetales debido a las altas temperaturas generadas, y lo demostró empleando aceite de maní como combustible, durante una exposición en París. Además, tenía la idea de que con ello ayudaría considerablemente al desarrollo de la agricultura en los países que lo necesitan (Shay, 1993).

Más tarde, en las décadas de 1930 y 1940 se utilizaron aceites vegetales como combustibles de motores diésel, generalmente solo en situaciones de emergencia. Sin embargo, preocupaban su costo, el efecto del aceite vegetal en el rendimiento del motor, la especificación en la preparación del combustible, la producción del aceite, el procesamiento de semillas oleaginosas y la extracción del aceite vegetal (ASAE, 1982).

En la actualidad, el uso de aceites vegetales puros como combustibles alternativos para motores diésel es limitado, debido a que generan problemas operativos –incluyendo la formación de depósitos y coque en el inyector¹, por su alta viscosidad, baja volatilidad y escasas propiedades de flujo en frío (Knothe, 2010). Con el fin de mejorar tales aspectos, se han realizado investigaciones para utilizar total o parcialmente sustitutos del combustible diésel como por ejemplo los ésteres metílicos de ácidos grasos, conocidos como biodiésel (o FAME, por su sigla en inglés) (Zhang et ál., 2003; Perkins y Peterson, 1991; Ameer et ál., 2009).

La materia prima más utilizada para la producción de biodiésel es el aceite de colza o canola, con una participación del 80% en el mercado mundial, pero también se conocen experiencias con aceites

de girasol, soya (Estados Unidos) y palma (Malasia y Colombia). Además, teniendo en cuenta la disponibilidad y el costo de estos recursos se podría pensar que el aceite de palma lograría a futuro ser el candidato más adecuado y atractivo como fuente de biodiésel (Mesa, 2008).

El biodiésel puede ser utilizado en mezclas con diésel sin perder sus principales propiedades fisicoquímicas, comparables con las de este último. Además, tiene efectos favorables característicos por ser fácilmente biodegradable, seguro de manejar, mejorar la lubricidad, no ser tóxico y, en lo fundamental, por estar libre de azufre y aromáticos. En particular, el biodiésel se ha vuelto más atractivo debido a sus beneficios sobre el medio ambiente, justamente por provenir de recursos renovables (Knothe, 2010; Karavalakis et ál., 2010). Por tanto, es una alternativa importante como combustible de vehículos.

Sin embargo, es necesario que el biodiésel cumpla altos estándares de calidad basados principalmente en la normatividad internacional (ASTM D 6751, EN 14214) para minimizar problemas en su operación y desempeño. Además, la calidad del biodiésel está influenciada por diferentes factores como la pureza de la materia prima, la composición de ácidos grasos de los aceites vegetales y las condiciones de producción (Atadashi et ál., 2010).

El auge del biodiésel en Colombia ha provocado una expansión sin precedentes en la proyección de siembra de palma de aceite. Se espera que para el año 2012 se produzcan alrededor de 460.000 toneladas de biodiésel para satisfacer la demanda nacional de mezcla diésel-biodiésel de palma, que por mandato legal ha venido en aumento en los últimos años. De hecho, Colombia es hoy el único país del mundo en utilizar de forma obligatoria mezclas superiores al 8% en el parque automotor diésel que rueda por todo su territorio.

Este artículo se centra en el uso del biodiésel en motores diésel, la normatividad vigente y los factores que inciden en la calidad del biodiésel.

¹ Por la pobre atomización de la inyección en la cámara de combustión.



Uso del biodiésel en motores diésel

Propiedades del biodiésel como combustible

Las principales propiedades del biodiésel son similares a las del diésel fósil o ACPM (aceite combustible para motores). (Tabla 1). Las más importantes son la viscosidad, la densidad, el punto de inflamación, el número de cetano, el punto de fluidez y el punto de nube (Demirbas, 2008).

Sin embargo, el carácter químico de uno y otro es distinto, puesto que el biodiésel básicamente se compone de ésteres, mientras que el diésel es parafínico y aromático. Como resultado de ello, el biodiésel presenta propiedades físicas diferentes a las del diésel, como tener un mayor número de cetano,

del sistema de inyección de combustible, debido a que merma la fluidez de este último. De manera que cuanto menor sea la viscosidad del biodiésel, más fácil será la atomización del combustible, lo cual mejorará la operación de la bomba de inyección (Demirbas, 2008).

El número de cetano es una medida de la calidad de ignición del combustible diésel. Por tanto, cuanto más elevado es el número de cetano, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión. El biodiésel por lo general tiene mayor número de cetano que el diésel, está influenciado por la estructura del metil éster y el grado de insaturación, longitud y ramificación de las cadenas de ácidos grasos que están presentes en él. Por esta razón, los cambios en este parámetro ocasionan aumentos en el número de cetano de manera proporcional a la longitud y ramificación

Tabla 1. Propiedades de los combustibles diésel y biodiésel *

Propiedad del combustible	Diésel	Biodiésel
Norma	ASTM D975	ASTM D6751
Valor calentamiento superior, BTU/gal	~137,640	~127,042
Valor calentamiento inferior, BTU/gal	~129,050	~118,170
Viscosidad Cinemática, a 40 °C	1.3-4.1	4.0-6.0
Gravedad específica, kg/l a 15.5 °C	0.85	0.88
Densidad, lb/gal a 15.5 °C	7.1	7.3
Carbono, % peso	87	77
Hidrógeno, % peso	13	12
Oxígeno, por dif. % peso	0	11
Sulfuro, % peso	0,0015 máx.	0,0-0,0024
Punto de ebullición, °C	180-340	315-350
Punto de inflamación, °C	60-80	100-170
Punto de nube, °C	-35 a 5	-3 a 15
Punto de fluidez, °C	-35 a -15	-5 a 10
Número de cetano	40-55	48-65

*Fuente: Biodiésel Handling and Use Guide, 2009.

menor poder calorífico, mayor viscosidad y mayor punto de inflamación (Tabla 1). Tales diferencias pueden afectar la combustión y las emisiones en motores diésel (Karavalakis et ál., 2010; Fontaras et ál., 2009; Mueller et ál., 2009; Demirbas, 2008).

La viscosidad es una de las propiedades más importantes del biodiésel, pues su incremento –especialmente a bajas temperaturas– afecta el funcionamiento

de la misma (Wadumesthrige et ál., 2008; Knothe et ál., 2006).

Sin embargo, el biodiésel tiene un mayor punto de nube y punto de fluidez en comparación con el diésel convencional. Estos parámetros son importantes para el uso de combustibles a bajas temperaturas. El punto de nube es la temperatura a la cual aparece una nubosidad de cristales cuando

el combustible se enfría. El punto de fluidez indica la temperatura más baja a la cual fluirá un combustible cuando se le enfríe bajo condiciones recomendadas; de ahí que, cuanto más bajo sea el punto de fluidez del combustible, mejor será el desempeño del motor a bajas temperaturas (Demirbas, 2008).

El biodiésel contiene de 10 a 11% en peso de oxígeno, lo que puede provocar mejor combustión que el diésel en el motor, debido a un incremento en la homogeneidad del oxígeno con el combustible durante la combustión; por ello la eficiencia de la combustión del biodiésel es mayor que la del diésel. El biodiésel es considerado un combustible limpio pues no tiene azufre ni aromáticos; mejora la combustión (debido a su mayor número de cetano) y la calidad de ignición, incluso cuando se mezcla con diésel (Singh y Singh, 2010; Demirbas, 2008).

Experiencias del uso de biodiésel en motores diésel

Desempeño del biodiésel

Existe la necesidad de determinar el desempeño del combustible al utilizar mezclas diésel-biodiésel, ya que el uso de distintos combustibles provenientes de diferentes aceites vegetales en la operación de motores diésel puede evitar problemas de compresión en el encendido del motor, mejorar la calidad de los gases de escape y conducir a la reducción de los gases de efecto invernadero.

Sin embargo, investigaciones reportadas por varios autores difieren en concluir el impacto al usar un determinado combustible y, en algunos casos con diferencias en el rendimiento del combustible por la composición química del mismo y por la tecnología utilizada en las pruebas (Tabla 2).

Emisiones contaminantes

Otro elemento de juicio al usar combustibles fósiles es su potencial de generación de emisiones contaminantes, entre las cuales se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), principal gas causante del efecto invernadero; monóxido de carbono (CO), que tiene efectos letales sobre el hombre; óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos no quemados o

parcialmente quemados (HC), principales formadores de esmog fotoquímico en presencia de luz; emisiones sulfurosas (SO_x), responsables de la lluvia ácida, de sulfatos y de material particulado (PM), este último causante de enfermedades respiratorias y cáncer (Agudelo et ál., 2003).

Las emisiones reguladas estrictamente por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos son PM, HC y CO . Por tanto, el desarrollo y la búsqueda de alternativas para el uso del combustible diésel en motores sin modificar han recibido atención considerable en la comunidad ambientalista internacional. De ahí que el biodiésel está desempeñando un papel importante en el mercado de los combustibles alternativos (Schmidt, 2007).

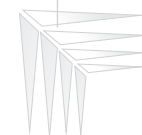
El biodiésel utilizado en los motores diésel puede reducir las emisiones de CO , CO_2 , HC, PM, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y compuestos orgánicos volátiles (VOC) (Karavalakis et ál., 2010). Sin embargo, existen en la literatura varios autores que difieren en el efecto positivo o negativo de las emisiones de NO_x , dependiendo del vehículo, el biodiésel utilizado y las cargas suministradas al motor.

Las emisiones de NO_x aumentan linealmente a medida que aumenta la concentración de biodiésel (2% con el combustible B20 de soya). Por el contrario, las emisiones de PM, CO y HC disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de mezcla de biodiésel, según lo determinado por la *US Environmental Protection Agency* (EPA, 2002) (Figura 1). Por consiguiente, las emisiones de los gases de escape al utilizar biodiésel son menores que las de operación con diésel, debido a la presencia de oxígeno en la estructura molecular del biodiésel. Además, el biodiésel es ecológico, ya que no produce SO_x y no aumenta las emisiones de CO_2 (Kapilan et ál., 2009).

Los efectos del biodiésel sobre las emisiones tienen una reducción sustancial del PM, CO e HC; sin embargo, el incremento o la disminución de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) no están determinados por un cambio de una sola propiedad del combustible (densidad, número de cetano, poder calorífico y viscosidad), sino es el resultado de una serie de mecanismos de formación, que dependen de la combustión específica, las condiciones de operación del motor y la tecnología utilizada (Karavalakis et ál., 2010; Fontaras et ál., 2009; Mueller et ál., 2009; Knothe and Steidley, 2005).

Tabla 2. Experiencias del uso de biodiésel y mezclas en motores diésel *

Desempeño del biodiésel y sus mezclas en motores diésel	Referencias
La potencia de los motores disminuye al utilizar mezclas diésel-biodiésel de aceite de palma (B0, B25, B50, B75 Y B100). Sin embargo, las mezclas de combustible presentan un desempeño en el motor muy similar al del diésel convencional.	Masjuki et ál, 1993.
La potencia de los motores disminuye al utilizar biodiésel de diferentes tipos de aceite, debido a la menor energía que contiene el biodiésel por unidad de volumen comparada con la del diésel, razón por la cual también se obtiene un mayor consumo de combustible.	Shumacher et ál, 1994.
El uso de diferentes mezclas diésel-biodiésel de palma (B30, B100) y diésel de Indonesia, en los motores diésel genera en promedio una disminución de 5% en el torque y en la potencia. El desempeño de los vehículos que usan biodiésel no se ve afectado notablemente.	Gafar et ál, 1995.
El uso de biodiésel de aceite de palma realizado en pruebas de estado estacionario, demuestran que el desempeño de los motores es bueno, dado que encienden fácilmente y disminuye el ruido característico del encendido del motor, teniendo en cuenta que no hay que realizar ningún cambio en el motor para poder utilizar el biocombustible.	Choo et ál, 1995.
El desempeño de mezclas diésel - biodiésel (palma y colza) en un vehículo de ruta, mostró una caída de potencia y un mayor consumo de combustible comparado con el diésel.	Shäfer et ál, 1995.
El desempeño del biodiésel de colza en pruebas de larga duración en flota de buses y camiones, muestran que la potencia disminuye del 6 al 7 % cuando se utiliza B100. Los conductores de buses no notaron esta diferencia, mientras que los conductores de camión si lo hicieron conduciendo cuesta arriba.	Staat et ál, 1995.
El rendimiento de las mezclas con biodiésel de aceite de palma fue casi similar al del combustible diésel. Además no se mostraron signos de desgaste adversos en la cámara de combustión, ni aumento en los depósitos de carbón, tampoco contaminación del aceite lubricante.	Sapuan et ál, 1996. Masjuki et ál, 1996.
Pruebas de desempeño en motores diésel con biodiésel de aceite de palma (B30), reportan que la potencia en lugar de disminuir sufría un ligero aumento de 10%, debido a que el poder calorífico del biodiésel es menor que el del diésel, 10% en volumen aproximadamente.	Agudelo et ál, 2001.
Pruebas en ruta con nueve camiones pesados utilizando mezclas diésel - biodiésel (B35), muestran resultados favorables para el biodiésel; en las pruebas no registraron diferencias notables en cuanto al desempeño del motor, torque, potencia y consumo de combustible con respecto al diésel común.	Wang et ál, 2001.
El seguimiento a doce vehículos en ruta con motores diésel de inyección directa y utilizando mezclas diésel - biodiésel de colza, soya y canola (B1, B2, B20, B50 Y B100). Muestran que el uso del biodiésel reduce la cantidad de aluminio, hierro, cromo y plomo presentes en el aceite lubricante de los motores diésel. Además que no genera un mayor desgaste que el uso del diésel.	Lin et ál, 2001.



Desempeño del biodiésel y sus mezclas en motores diésel	Referencias
Pruebas en un motor de inyección indirecta 2,8 L utilizando biodiésel de aceite de palma, puro y en mezclas de 20%, indican una disminución del rendimiento de combustible (<2,3% en todos los casos). Estas diferencias no son significativas; sin embargo, se reportaron aumentos en el consumo energético.	Masjuki et ál, 1993.
Pruebas de larga duración utilizando mezclas diésel - biodiésel (B20), demuestran que el biodiésel es un excelente combustible cuando se utiliza en motores de encendido por compresión, debido a su alta biodegradabilidad y su excelente lubricidad.	Shumacher et ál, 1994.
Pruebas realizadas en laboratorio demostraron que el biodiésel de palma puro o en mezclas con el combustible diésel (B30), no tiene efectos negativos en el motor. Además, pruebas realizadas en motores estacionarios y en carretera para evaluar el desempeño del biodiésel de palma de aceite en Colombia, al utilizar mezclas de diésel - biodiésel de palma en cinco vehículos en una prueba corta en un chasis dinámometro, confirman que el biodiésel de aceite de palma aumenta el número de cetano en la mezcla con diésel fósil convencional, mejora la lubricidad, reduce el contenido de azufre y desarrolla un buen rendimiento sin afectar el torque, la potencia y el consumo de combustible.	Gafar et ál, 1995.
Pruebas de larga duración con biodiésel de palma en una flota de servicio público en Bogotá (Transmilenio), muestran que el desempeño y consumo de combustible de los buses que utilizaron las mezclas diésel - biodiésel fue muy similar al de los buses que utilizaron diésel fósil. Además, las mezclas de diésel - biodiésel de palma hasta un 50% (B5, B10, B20, B30 y B50) cumplieron con las especificaciones de calidad establecidas para el combustible diésel en Colombia. Por tanto, las pruebas corroboraron que las mezclas presentan un buen desempeño en condiciones de clima frío a una altura de 2600 msnm. y no se presentan efectos adversos sobre el motor por el uso prolongado de las mezclas de diésel - biodiésel de palma.	Choo et ál, 1995.
El uso del biodiésel al operar motores diésel muestra una ligera reducción en la potencia del brake y un ligero aumento en el consumo de combustible. Sin embargo, las propiedades lubricantes del biodiésel son mejores que el diésel, lo que aumenta la vida útil del motor.	Shäfer et ál, 1995.
EL uso de las mezclas diésel - biodiésel (B20) mejora las propiedades lubricantes del combustible diésel. Además, disminuye a largo plazo el desgaste del motor. También, el biodiésel mejora la eficiencia de la combustión al ocupar espacio en la mezcla, aumentando ligeramente la tasa aparente de consumo de combustible al operar un motor diésel.	Staat et ál, 1995.
El uso de biodiésel de la palma disminuye la potencia entregada por el motor, aumenta el consumo de combustible e incrementa ligeramente la eficiencia, debido a diferencias en el contenido energético del combustible.	Sapuan et ál, 1996. Masjuki et ál, 1996.
El rendimiento del biodiésel puede superar el del combustible diésel, pero su aplicación no requiere de motores modificados.	Agudelo et ál, 2001.
Pruebas de larga duración en Colombia utilizando mezclas diésel - biodiésel de palma (B5, B10 y B20) en nueve vehículos Chevrolet NKR III, en rutas intermunicipales y urbanas en Bogotá (hasta 2600 msnm) recorriendo mas de 900,000 km (100,000 km/camión), muestran que el desempeño y consumo del combustible de los vehículos que utilizaron las mezclas diésel - biodiésel (B10 y B20) fueron muy similares al de los vehículos que utilizaron la mezcla diésel - biodiésel (B5, vehículos de control). Las revisiones mecánicas realizadas a los sistemas de inyección permitieron verificar que no se presentaron desgastes anormales en las piezas por el uso de las mezclas diésel - biodiésel de palma.	Wang et ál, 2001.

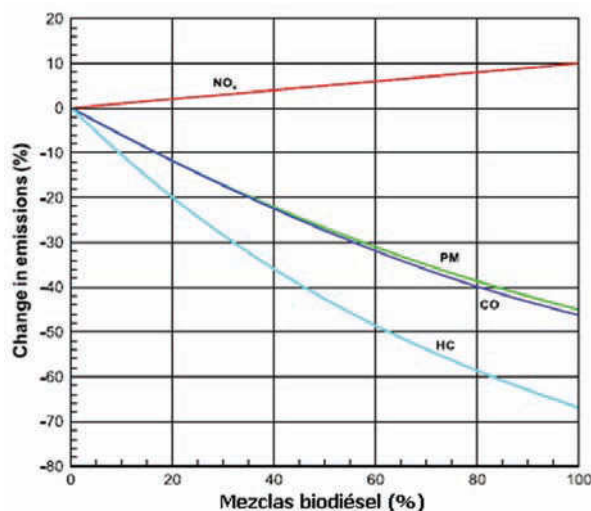


Figura 1. Relación de las emisiones (NO_x, PM, CO, HC) al usar mezclas de biodiésel de soja (EPA, 2002).

Los mecanismos de formación de NO_x son complejos y se afectan en los motores de combustión interna por varias características (tamaño, puntos de funcionamiento, diseño de cámara de combustión, diseño del sistema de combustible y diseño de sistemas de aire). Además de otros parámetros que intervienen en las emisiones de NO_x al utilizar biodiésel, como el tiempo de inyección, la temperatura adiabática de llama, la transferencia de la radiación de calor y retardo del encendido. Por tanto, las pequeñas diferencias en las propiedades entre el biodiésel y el diésel son suficientes para crear varios cambios en el sistema y en el comportamiento de la combustión de los motores diésel (Sun et ál., 2010).

No obstante, otras investigaciones sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y opacidad de humos (motor diésel de alta velocidad e inyección directa), operando con biodiésel de palma y combustible diésel convencional, muestran que al utilizar biodiésel de palma operando en un motor a condiciones de plena carga y bajos regímenes de giro se incrementaron los NO_x en torno a un 20%. Bajo las mismas condiciones de carga y altas velocidades del motor se obtuvo una disminución de los NO_x del 6%, mientras que a carga parcial siempre se obtuvieron incrementos en las emisiones de NO_x al usar biodiésel de palma, siendo más pronunciado el efecto a bajo régimen de giro; por tanto, las emisiones de NO_x disminuyeron o aumentaron dependiendo del modo de operación del motor (Benjumea et ál., 2009; Agudelo et ál., 2010).

Asimismo, resultados obtenidos durante las investigaciones llevadas a cabo en Colombia en pruebas de larga duración con flotas de vehículos (Figura 2), muestran que el diésel y mezclas de biodiésel de aceite de palma contribuyen a mejorar la calidad del aire, debido a la corrección de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, demostraron que el uso de biodiésel de palma puro o en mezclas con el combustible diésel disminuye apreciablemente las emisiones PM, NO_x y CO₂ (Cuéllar y Torres, 2007). También se comprueba que la opacidad de humos evaluada cada 10.000 km a vehículos en una flota de servicio público en Bogotá, al utilizar mezclas con biodiésel de palma presenta menores valores de opacidad que los operados con diésel.

Lo anterior se corroboró con los resultados de las pruebas de emisiones en ruta, mostrando reducciones en las emisiones de CO₂ y PM (Amado et ál., 2008; García et ál., 2009). Igualmente, los resultados obtenidos al evaluar el desempeño de las mezclas diésel-biodiésel de palma en nueve vehículos Chevrolet NKR III pertenecientes a la flota de Coordinadora Mercantil, mostraron beneficios ambientales como la reducción en índice de opacidad, CO, HC y PM; los óxidos de nitrógeno (NO_x) variaron de acuerdo con la carga aplicada (Reyes et ál., 2011; García-Núñez et ál., 2011).

Normatividad vigente

Parámetros de calidad de las mezclas diésel- biodiésel

La pureza del biodiésel debe ser alta y ajustarse a las especificaciones de estándares internacionales provistas por la ASTM (*American Standard for Testing Materials*) y la EN (norma europea) para combustibles alternativos; de manera que la alta calidad del biodiésel puede minimizar los problemas de pegue de anillos, formación de coque en los inyectores y de depósitos de carbono, y mejorar el rendimiento de los motores diésel. Por esta razón, es importante el cumplimiento de la normatividad asegurando la calidad de biodiésel Atadashi, 2010).

La calidad del combustible diésel se regula basándose en normas que rigen en Estados Unidos (ASTM D 975, 2009) y en Europa (EN 590, 2009). Se encuentran varias especificaciones dadas por ASTM para estos combustibles: las normas ASTM D6751

ANTECEDENTES



Figura 2. Antecedentes de la viabilidad técnica del uso de biodiésel de Palma en Colombia (Reyes et ál., 2011(a))

(especificación principal de biodiésel, B100); ASTM D975 (Especificación para el combustible diésel, incluye las mezclas que contienen hasta 5% (B5) de biodiésel); y ASTM D7467 (Especificación para combustible diésel y la mezcla de combustibles que contienen entre 6% (B6) y 20% (B20) de biodiésel para ser usadas en motores diésel). Se deben tener en cuenta las propiedades más comunes de comparación entre los combustibles diésel y biodiésel que se muestran en la Tabla 3.

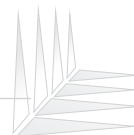
Desarrollo normativo de parámetros de información de la calidad del biodiésel de palma en Colombia

El programa nacional de biodiésel de palma en Colombia se inició con éxito desde el año 2004 con la expedición de la Ley 939 y tiene tres objetivos fundamentales: desarrollo del sector agrícola –con énfasis en la generación de empleo rural estable–, diversificación de la canasta energética y contribución a

disminuir el impacto ambiental de los combustibles fósiles (Cuéllar, 2010).

La normatividad internacional de calidad de biodiésel está basada en metodologías y ensayos dependiendo de la disponibilidad de materia prima en cada país productor, así: en Europa, el aceite de colza; en Estados Unidos, el aceite de soya, y en Colombia, el aceite de palma.

En Colombia en particular, a partir de la Ley 939 de 2004, el Gobierno Nacional, con la participación activa de los diferentes sectores industriales relacionados, ha venido desarrollando un marco normativo riguroso y estable relacionado con la calidad del biodiésel, plasmado en la Resolución 182087 de 2007, del Ministerio de Minas y Energía. Es de resaltar que el mismo es bastante estricto y robusto, pues combina exigencias establecidas en la normatividad internacional (ASTM D 6751 y EN 14214) con exigencias propias de estricto cumplimiento. De igual forma existe la norma técnica colombiana NTC 5444 (Icontec, 2007) que define los parámetros técnicos que debe cumplir el biodiésel para uso en motores diésel (Tabla 4).


Tabla 3. Parámetros de información de calidad del biodiésel, del diésel y de las mezclas diésel-biodiésel (B6-B20)*.

<i>Propiedad del combustible</i>	<i>Método de Ensayo</i>	<i>Biodiésel (B100) ASTM D6751</i>	<i>D6751Diésel (B0) ASTM D975</i>	<i>Mezclas diésel-biodiésel (B6-B20) ASTM D7467</i>
Punto de inflamación	ASTM D93	130°C	38-55°C	>52°C
Ca + Mg + Na + K	EN 14538	<5 ppm	---	---
Metanol	EN 14110	<0,2 % vol	---	---
Agua y sedimentos	ASTM D2709	<0,05 % vol.	<0,05 % vol	<0,05 % vol
Viscosidad Cinemática	ASTM D445 @ 40°C	1,9- 6,0 cst	1,3- 4,1 cst	1,9- 4,1 cst
Cenizas	ASTM D482	---	<0,01 % mol	<0,01 % mol
Cenizas sulfatadas	ASTM D874	<0,02 % mol	---	---
Azufre	ASTM D5453;	<15 ppm	<15 ppm	<15 ppm
	ASTM D129/	---	<0,05 % mol	0,05- 0,5 % mol
	ASTM D2622	---	<0,05 % mol	0,05- 0,5 % mol
Corrosión lamina de cobre	ASTM D130	<3	<3	<3
Número de cetano	ASTM D613	47	>40	>40
Índice de cetano	ASTM D973	---	>40	40
Aromaticidad	ASTM D1319	---	<35	<35
Punto de nube	ASTM D2500	Reportar, °C	---	N.A
Carbón residual	ASTM D4530	<0,05 % mol	---	---
Carbón residual-Ramsbottom	ASTM D524	---	<0,15 % mol	<0,35 % mol
Numero acido	ASTM D664	<0,5 mg KOH/g	---	<0,3 mg KOH/g
Glicerina libre	ASTM D6584	<0,020 % mol	---	---
Glicerina total	ASTM D6584	0,240 % mol	---	---
Contenido de fosforo	ASTM D4951	0,001 % mol	---	---
Temperatura de destilación	ASTM D1160	<360°C	---	---
Destilación	ASTM D86	---	282- 338°C	<343°C
Destilación simulada	ASTM D2887	---	300- 356°C	---
Estabilidad a la oxidación	EN 14112	>3 h	---	>6 h
LTFT/CFPP	ASTM D4539/ ASTM D6371	---	---	N.A
Lubricidad HFRR	ASTM D6079	---	<520 µm	<520 µm
Contenido de biodiésel	ASTM D7371	---	---	6- 20 % vol

N.A: No Aplica

*Fuente: Journal of ASTM International. Selected Technical Papers, STP 1477. Biofuels, 2011.

Factores que inciden en la calidad del biodiésel

La pureza y la calidad del combustible biodiésel pueden ser influenciadas significativamente por factores, entre los cuales los principales son: la calidad de la materia prima, la composición de ácidos grasos de los aceites vegetales (aceites vírgenes, grasas animales o aceites usados), y el tipo de producción (procesos de refinación empleados y parámetros de posproducción) (Atadashi, 2010). Los mismos se pueden agrupar en tres grupos que proporcionan información sobre

la calidad del combustible, como indicadores de la materia prima, y de la pureza y el comportamiento del producto (Tabla 5).

Los parámetros incluidos en el primer grupo son indicadores de la naturaleza de la materia prima empleada en la fabricación del biodiésel, y proveen información de las propiedades esperadas. Los del segundo grupo muestran la eficiencia del proceso de conversión del aceite en metil-ésteres y la eficiencia del proceso de separación de estos de productos secundarios formados durante la reacción, es decir que todos estos son en realidad indicadores de la pureza del producto. Finalmente, en el último grupo

Tabla 4. Comparación de parámetros de información de la calidad del biodiésel

Propiedad	Método / Límite ASTM D6751-08	Método / Límite EN 14214:2008	Método / NTC 5444
Punto de inflamación	ASTM D93/ 93 mín. (°C)	EN ISO 2719, 36/9/ 101 mín. (°C)	ASTM D93, ISO 2719/ 120 mín. (°C)
Contenido de alcohol % Contenido de metanol (GC) 2. Flash point	FN14110/ 0,2 máx. (% masa) ASTM D93/ 130 mín. (°C)	FN 14110/ 0,20 máx. (% masa)	ISO 14110/ 0,2% máx. (% masa)
Agua y sedimentos	ASTM D2709/ 0,050 máx. (% volumen)	—	—
Contenido de agua	—	FN ISO 12937/ 500 máx. (mg/kg)	ISO 12937, ASTM F203/ 500 máx. (mg/kg)
Viscosidad cinemática a 40°C	ASTM D445/ 1.9-6,0 (mm ² /s)	FN ISO 3104/ 3,5 – 5,0 (mm ² /s)	ASTM D445, ISO 3104/ 1,9-6,0 (mm ² /s)
Densidad 15°C	—	EN ISO 3675, 12185/ 850-900 (kg/m ³)	ISO 3675, ASTM D4052/ 850-900 (kg/m ³)
Cenizas sulfatadas	ASTM D874/ 0,020 máx. (% masa)	EN ISO 3987/ 0,02 máx. (% masa)	ASTM D874, ISO 3987/ 0,02 máx. (% masa)
Azufre	ASTM D5453/ 0,0015 máx. (S15); 0,05 máx. (S500) (% masa)	EN ISO 10846, 20884/ 10,0 máx. (mg/kg)	—
Corrosión lámina de cobre	ASTM D130/ Número 3 máx.	EN ISO 2160/ clase 1	ASTM D130, ISO 2160/ 1 (unidad)
Número de cetano	ASTM D613/ 47 mín.	EN ISO 5165/ 51,0 mín.	ASTM D613, ISO 5165/ 47 mín. (cetanos)
Punto de nube	ASTM D2500/ Reportar (°C)	—	ASTM D2500, ISO 3015/ Reportar (°C)
Temperatura de Obturación del filtro frío (CFPP)	—	—	ASTM D6371, EN 116/ Reportar (°C)
Punto de fluidez	—	—	ASTM D97/ Reportar (°C)
Residuo de carbón	ASTM D4530/ 0,050 máx. (% masa)	FN ISO 10370/ 0,30 máx. (% masa)	ASTM D4530, ISO 10370/ 0,3 % máx. (% masa)
Número ácido	ASTM D664/ 0,50 máx. (mg KOH/g)	EN 14104/ 0,50 máx. (mg KOH/g)	ASTM D664, EN 14104/ 0,5 máx. (mg KOH/g)
Prueba de filtrabilidad en frío (CSFT)	ASTM D4057, D4865, D5452/ 360 máx. (segundos)	—	—
Glicerina libre	ASTM D6584/ 0,020 máx. (% masa)	EN 14105-14106/ 0,02 máx. (% masa)	ASTM D6584, ISO 14105-14106/ 0,02 máx. (% masa)
Glicerina total	ASTM D6584/ 0,240 máx. (% masa)	EN 14105/ 0,25 máx.; MAG (0,8 máx.); DAG (0,2 máx.); TAG (0,2 máx.). (% masa)	ASTM D6584, ISO 14105-14106/ 0,25 máx.; MAG (0,8 máx.); DAG (0,2 máx.); TAG (0,2 máx.). (% masa)
Contenido de fósforo	ASTM D4951/ 0,001 máx. (% masa)	EN 14107/ 4,0 máx. (mg/kg)	ASTM D4951, ISO 14107/ 0,001 máx. (% masa)
Temperatura de destilación (atmosférica, 90% recuperada)	ASTM D1160/ 350 máx. (°C)	—	ASTM D86, ISO 3405/ 360 máx. (°C)
Contenido de sodio y potasio	EN 14538/ 5 máx. (ppm)	EN 14108, 14109, 14538/ 5,0 máx. (mg/kg)	ASTM D5853, EN 14108, EN 14109/ 5 máx. (mg/kg)
Contenido de Calcio y Magnesio	EN 14538/ 5 máx. (ppm)	EN 14538/ 5,0 máx. (mg/kg)	ASTM D5853, EN 14108, EN 14109/ 5 máx. (mg/kg)
Estabilidad a la oxidación	EN 14112/ 3 mín. (horas)	EN 14112/ 5 mín. (horas)	EN 14112/ 5 mín. (horas)
Contenido de éster	—	FN 14103/ FAMF (96,5 mín.); Éster metílico de ácido linoléico (12 máx.); Ésteres metílicos poli-insaturados (≥ 4 dobles enlaces) 1 máx. (% masa)	FN 14103/ 96,5 mín.; alquilester de ácido linoléico 12 máx. (% masa)
Índice de yodo	—	EN 14111/ 120 máx. (g I/100 g)	EN 14111/ 120 máx. (g I/100 g)
Contaminación total	—	EN 12662/ 24 máx. (mg/kg)	EN 12662/ 24 máx. (mg/kg)
Estabilidad térmica	—	—	ASTM D6668/ 70 mín. (% de reflectancia)

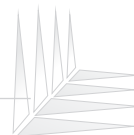
MAG: Monoglicéridos; DAG: Diglicéridos; TAG: Triglicéridos; S15: Especificación de azufre de 15 ppm máx.; S500: Especificación de azufre de 500 ppm máx.

se encuentran algunos parámetros que si bien están influenciados por la materia prima, muestran cómo será el desempeño del combustible cuando sea utilizado puro o en diferentes mezclas con diésel.

Materia prima

La materia prima de la cual proviene el biodiésel es de gran importancia, ya que el grado de refinación del aceite contribuye a mejorar notablemente las especi-

caciones de calidad y pureza del biodiésel (Atadashi et ál., 2010). También es importante recordar que, por ser una mezcla de ésteres alquílicos, la composición del biodiésel dependerá estrechamente del perfil de ácidos grasos que estén presentes en el aceite empleado como materia prima. Los ácidos grasos que se encuentran comúnmente en los aceites vegetales son: esteárico, palmítico, oleico, linoleico y linolénico, entre otros; y en el caso del aceite de palma los ácidos grasos mayoritarios son el palmítico (C16:0; 36,7%),


Tabla 5. Información que aportan los parámetros de calidad

Parámetro	Indicador de
Densidad a 15°C	Materia prima
Índice de yodo	
Viscosidad (cinemática a 40°C)	
Temperatura de obturación del filtro frío (CFPP)	
Punto de nube/ enturbiamiento	
Punto de fluidez	
Contenido de alquiléster de ácido linoleico	
Contenido de agua	Pureza del producto
Contaminación total	
Punto de inflamación	
Número ácido	
Contenido de éster	
Contenido de monoglicéridos	
Contenido de triglicéridos	
Glicerina libre y total	
Contenido de metanol o etanol	
Contenido de sodio y potasio	
Contenido de calcio y magnesio	Comportamiento del producto
Contenido de fósforo	
Carbón residual	
Cenizas sulfatadas	
Corrosión lámina de cobre	
Estabilidad a la oxidación	
Estabilidad térmica	
Destilación (PFE)	
Número de cetano	

esteárico (C18:0; 6,6%), oleico (C18:1; 46,1%) y linoleico (C18:2; 8,6%), como se observa en la Tabla 6 (Ramos et ál., 2009).

Adicionalmente, existe una relación entre la composición de ácidos grasos de la materia prima y las propiedades del biodiésel. En la Tabla 7 se muestran las diferencias entre las características del biodiésel proveniente de diferentes aceites vegetales como los de palma, oliva, maní, colza, soya, girasol, almendra y maíz (Ramos et ál., 2009). Asimismo, se describen los principales parámetros del biodiésel relacionados con la composición de ácidos grasos de la materia prima, como el índice de yodo y la temperatura de obturación del filtro frío.

El índice de yodo es una medida de la insaturación total de una mezcla de ácidos grasos correlacionados linealmente, pues al aumentar los ácidos grasos insaturados en el aceite, mayor es el índice de yodo. Este parámetro tiene un límite máximo de 120 g I₂/100 g (Tabla 7), necesario porque al someter a altas temperaturas a los ácidos grasos insaturados, se origina la polimerización de glicéridos (formación de compuestos de alto peso molecular). El aceite de palma, rico en ácidos grasos saturados como el ácido palmítico (C16:0) y esteárico (C18:0), tiene un índice

Tabla 6. Composición de ácidos grasos de aceites vegetales (% peso)

Ácido graso	Palma	Oliva	Maní	Colza	Soya	Girasol	Almendra	Maíz
Láurico C12:0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mirístico C14:0	0,7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Palmítico C16:0	36,7	11,6	8,0	4,9	11,3	6,2	10,4	6,5
Palmitoleico C16:1	0,1	1,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	0,6
Esteárico C18:0	6,6	3,1	1,8	1,6	3,6	3,7	2,9	1,4
Oleico C18:1	46,1	75,0	53,3	33,0	24,9	25,2	77,1	65,6
Linoleico C18:2	8,6	7,8	28,4	20,4	53,0	63,1	7,6	25,2
Linolénico C18:3	0,3	0,6	0,3	7,9	6,1	0,2	0,8	0,1
Araquídico C20:0	0,4	0,3	0,9	0,0	0,3	0,3	0,3	0,1
Gadoleico C20:1	0,2	0,0	2,4	9,3	0,3	0,2	0,0	0,1
Behénico C22:0	0,1	0,1	3,0	0,0	0,0	0,7	0,1	0,0
Erúico C22:1	0,0	0,0	0,0	23,0	0,3	0,1	0,0	0,1
Lignocerico C24:0	0,1	0,5	1,8	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1
Nervónico C24:1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
Composición (% peso), grado de insaturación (DU) y factor de saturación de cadena larga (LCSF)								
Saturados	44,7	15,7	15,6	6,5	15,3	11,1	13,9	8,0
Monoinsaturados	46,4	76,0	55,7	65,3	25,6	25,6	78,0	66,4
Poliinsaturados (2,3)	8,9	8,4	28,7	28,3	59,1	63,3	8,4	25,3
DU	64,2	92,7	113,1	121,9	143,8	152,2	94,8	117,0
LCSF (A) ^a	2,9	1,7	3,8	0,6	1,6	2,1	1,4	0,6
LCSF (B) ^b	7,7	4,2	10,7	1,3	3,4	4,2	3,3	1,5

a. Factor de saturación de cadena larga, calculada usando el punto de fusión

b. Factor de saturación de cadena larga, calculada usando la composición de esteres metílicos

de yodo inferior (57 g I₂/100 g) comparado con otros aceites vegetales, lo que indica que el biodiésel de palma es más estable a altas temperaturas (disminuye la oxidación, la formación de depósitos y la reducción de la lubricidad) (Ramos et ál., 2009).

Asimismo, la temperatura de obturación del filtro frío (también conocida como CFPP, por su sigla en inglés) hace referencia a la temperatura a la que un combustible provoca el taponamiento de un filtro; se puede considerar que es una medida de la capacidad del combustible para desempeñarse a temperaturas bajas.

guiente, la pureza del producto es alta de acuerdo con lo reportado.

Sin embargo, los parámetros que aportan información de la pureza del biodiésel (Tabla 5) deben cumplir los estándares mínimos de calidad basados en las normas ASTM D 6751 y EN 14214 (Tabla 4). Además, están influenciados por la materia prima, reacciones incompletas durante el proceso de transesterificación del biodiésel y por remociones incompletas durante la purificación del mismo. Por esta razón, la presencia de impurezas en el biodiésel (ácidos grasos libres, jabones, agua, glicerol, esterol, mono-, di-, triglicéridos,

Tabla 7. Características del biodiésel proveniente de diferentes fuentes vegetales

Propiedad	Unidad	Límites		Palma	Oliva	Maní	Colza	Soya	Girasol	Almendra	Maíz
		Min.	Máx.								
Contenido de éster	% peso	96,5	---	97,7	99,0	99,5	99,5	96,9	97,2	99,7	99,8
Viscosidad cinemática, 40 °C	mm ² /s	3,5	5,0	4,5	4,5	4,6	4,4	4,2	4,2	4,2	4,4
Flash point	°C	120	---	176	178	176	170	171	177	172	170
Número de cetano	---	51	---	61	57	53	55	49	50	57	53
Estabilidad oxidativa, 110 °C	h	3,0	---	4,0	3,3	2,0	2,0	1,3	0,8	3,0	1,2
Número ácido	Mg KOH/g	---	0,50	0,12	0,13	0,10	0,16	0,14	0,15	0,17	0,15
Índice de yodo	g I ₂ /100 g	---	120	57	84	97	109	128	132	92	101
Contenido de ácido linoléico	% peso	---	12,0	0,2	0,6	0,3	7,9	6,3	0,2	0,8	0,1
CFPP	°C	---	---	10	-6	17	-10	-5	-3	-6	-12
Contenido de metanol	% peso	---	0,20	0	0	0	0	0	0	0	0
Contenido de monoglicéridos	% peso	---	0,80	0,17	0,67	0,32	0,41	0,21	0,37	0,27	0,40
Contenido de diglicéridos	% peso	---	0,20	0,06	0,09	0,07	0,08	0,10	0,07	0,08	0,06
Contenido de triglicéridos	% peso	---	0,20	0,04	0,03	0,03	0,03	0,07	0,04	0,02	0,03
Glicerina libre	% peso	---	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,07	0,00	0,00	0,00
Glicerina total	% peso	---	0,25	0,06	0,19	0,11	0,09	0,00	0,11	0,07	0,09

Además, la CFPP del biodiésel proveniente de diferentes fuentes vegetales (Tabla 7), presenta un valor bajo (10 °C de CFPP) para el biodiésel de palma comparado con otras fuentes vegetales. Por esta razón, a bajas temperaturas el biodiésel se precipita principalmente debido a los ácidos grasos saturados palmítico (C16:0) y esteárico (C18:0). Además, cuanto más sea la saturación de cadena larga de carbono en el biodiésel, como los ácidos grasos behénico (C22:0) y lignocérico (C24:0) (Tabla 6), son peores las propiedades a bajas temperaturas (Ramos et ál., 2009).

Pureza del producto

Como se observa en la Tabla 7, en los diferentes aceites vegetales el proceso de conversión de ácidos grasos a ésteres fue superior al límite (>96,5%), y el contenido de ácido linoléico, metanol, mono-, di-, triglicéridos, glicerina libre y glicerina total, estuvieron por debajo del límite máximo permitido. Por consi-

alcohol, iones metálicos, etcétera) en concentraciones mayores a las permitidas por la normatividad, son perjudiciales para la estabilidad del biodiésel en los tanques de almacenamiento y los sistemas de combustión (Tyagi et ál., 2010; Moser 2009).

Se ha reportado que la presencia de sustancias insolubles en el biodiésel por encima de la especificación, 24 mg/kg de impurezas insolubles de acuerdo a la norma EN 12662 (Contaminación total, Tabla 4), tiene un gran impacto en la calidad del producto y su desarrollo, creando problemas durante la operación del motor, tal como la interrupción de flujo de combustible hacia éste, por causa del taponamiento de los filtros (Bondioli et ál., 2008). Por esta razón, la problemática de sedimentación en el biodiésel está asociada principalmente al efecto de la presencia de monoglicéridos, jabones, agua y esteril glucósidos (sg). Experiencias del mercado han mostrado que a pesar de que el biodiésel producido cumple con las especificaciones nacionales e internacionales, se han



presentado problemas de obstrucción de filtros al emplear mezclas diésel-biodiésel, independientemente de la materia prima empleada para su obtención (Pfalzgraf et ál., 2007).

Comportamiento del producto

Los principales parámetros que inciden en el comportamiento del biodiésel son el número de cetano y la estabilidad oxidativa (Tabla 5). Estas propiedades están influenciadas por las características de la materia prima (Tabla 6).

Como el número de cetano es una de las propiedades más importantes para medir la calidad de ignición de un combustible para motores diésel con límite mínimo de 51 (Tabla 7), entre mayor sea el número de cetano, mejor son sus propiedades de ignición y arranque en frío. Sin embargo, existen marcadas diferencias en el número de cetano, puesto que entre más ácidos grasos saturados tenga el aceite vegetal mayor será el número de cetano en el biodiésel (Ramos et ál., 2009). Por esta razón, al comparar el aceite de palma con otros aceites vegetales se encuentran en mayor proporción ácidos grasos saturados palmítico (C16:0; 36,7%) y esteárico (C18:0; 6,6%) (Tabla 6), encontrando para el biodiésel de palma un número de cetano de 61, valor superior al proveniente de otras fuentes vegetales (Tabla 7). Esto indica que el biodiésel de palma mejora la calidad de ignición, el tiempo de retardo del encendido del combustible inyectado en la cámara de combustión y el rendimiento del motor.

La estabilidad oxidativa es una de las propiedades principales que afectan el uso del biodiésel durante la combustión y almacenamiento, debido a la formación de gomas y sedimentos precursores del taponamiento de filtros de combustible. Además, está influenciada por factores tales como la presencia de aire, temperatura, residuos de metales, peróxidos, luz y las características estructurales de la materia prima, sobre todo la presencia de dobles enlaces (Atadashi, 2010). En consecuencia, la estabilidad oxidativa disminuye con el aumento del contenido de los ésteres metílicos poliinsaturados (Tabla 6). Por tanto, los aceites vegetales ricos en ácidos grasos linoleico (C18:2) y linolénico (C18:3), como el aceite de soya y girasol, tienden a dar a los combustibles una estabilidad pobre a la oxidación, mientras que los aceites vegetales como el

de palma, oliva y de almendras, en general, muestran una mayor estabilidad a la oxidación (Tabla 7).

Conclusiones

El uso de biodiésel derivado de aceites vegetales se convierte en una importante fuente para reemplazar al diésel fósil, no solo porque sus características son similares, sino también porque su uso en la operación de motores diésel evita problemas de compresión en el encendido del motor y mejora la calidad de los gases de escape, con lo que se reducen los efectos sobre el calentamiento global.

Colombia cumple con la normatividad para garantizar el buen desempeño del biodiésel de palma y sus mezclas con diésel. Además, contempla rigurosas exigencias combinadas con las establecidas en la normatividad internacional, todo ello plasmado en un estándar bastante robusto como lo es la Resolución 182087 de 2007.

Se requiere tener un mayor conocimiento tanto del proceso de transesterificación como de refinación previa durante la producción de biodiésel, para determinar los factores que inciden sobre su calidad. Además, se desconoce la interacción y cinética de formación de los compuestos que conforman los sedimentos del biodiésel (esteril glucósidos, mono, -di, - triglicéridos, jabones, fósforo, acidez y agua), así como las condiciones de almacenamiento que promueven su formación.

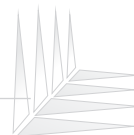
Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma.



Bibliografía

- Amado, M.; García, J.; Carranza, R.; Cuéllar, M.; Torres, J.; Acero, J.; Sarmiento, J. A.; Sarmiento, J. L.; Cabuya, D.; Rincón, O. 2008. Pruebas de larga duración con biodiésel de palma en una flota de servicio público en Bogotá. *Palmas (Colombia)* 29 (4).
- Ameer, S.; Gopal, K.; Jebaraj, S. 2009. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *En: Renewable and Sustainable Energy Review*. 13 (6): 1628-1634.
- Agudelo, J.; Benjumea, P.; Villegas, A.P. 2010. Evaluation of nitrogen oxide emissions and smoke opacity in a HSDI diesel engine fuelled with palm oil biodiesel. *Rev.fac.ing.univ. Antioquia* 51: 62-71.
- Agudelo, J.; Benjumea, P.; Gómez Meneses, E.; Pérez Bayer, J. F. 2003. Biodiésel. Una revisión del desempeño mecánico y ambiental. *Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte* 13: 1-14.
- Agudelo, J. R.; Peña, D.; Mejía, R. 2001. Pruebas de desempeño del éster metílico de aceite de palma en un motor diésel. *Revista Energética* 26. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- ASAE. 1982. Vegetable oil fuels. In: Backers, L. (ed.) *Proceedings of the international conference on plant and vegetable oils as fuels*. ASAE, St. Joseph, MI.
- ASTM D6751, 2008. American Society for Testing and Materials (ASTM) standard D 6751. Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM D7467, 2008. American Society for Testing and Materials (ASTM) standard D 7467. Standard Specification for Diesel presiva de la palma africana. En: Resúmenes II Congreso Ascolfi. Bogotá, 1-3 septiembre, 1976. p. 32.
- Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20), PA: ASTM.
- ASTM D 975, 2009. American Society for Testing and Materials (ASTM) standard D 975. Standard specification for diesel fuel oils. West Conshohocken, PA: ASTM
- Atadashi, I. M.; Aroua, M. K.; Abdul Aziz, A. 2010. High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 1999-2008.
- Benjumea, P.; Agudelo, J.; Agudelo, A. 2009. Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine. *Fuel* 88. 725-731.
- Biodiesel Handling and Use Guide. 2009. Fourth Edition. NREL/TP-540-43672.
- Bondioli, P.; Cortesi, N.; Mariani, C. 2008. Identification and quantification of steryl glucosides in biodiesel. *Research Paper. Proteomics*. 110: 120-126.
- Choo, Y.; Ma; Ah-Ngan; Barison; Yusof. 1995. Production and evaluation of palm oil methyl ester as diesel substitute. *Proceedings of Porim Biofuel '95*. Porim International Biofuel Conference, p. 15.
- Cuéllar, M.; Torres, J. 2007. Posibilidades del biodiésel de palma y sus mezclas con diésel en Colombia. *Palmas (Colombia)* 28 (2) Número especial.
- Cuéllar Sánchez, M. 2010. Impacto del programa de biodiésel en el mercado de aceite de palma en Colombia. *Palmas (Colombia)* 31 (3): 27-34.
- Demirbas A. 2008. *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Springer- Verlag London Limited. ISBN-13: 9781846289941. p 210.
- Demirbas, A. 2009. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. 50: 14-34.
- Ejaz, M. S.; Younis, J. 2008. A review of biodiesel as vehicular fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12: 2484-94.
- EN 14214, 2008. European Committee for Standardization. Standard EN 14214. Automotive fuels – fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines – requirements and test methods.
- EN 590, 2009. European Committee for Standardization. Standard EN 590. Automotive fuels – diesel – requirements and test methods.
- EPA. 2002. A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions. Draft Technical Report. United States Environmental Protection Agency. Air and Radiation. EPA 420-P-02-001.
- Fontaras, G.; Karavalakis, G.; Kousoulidou, M.; Tzamkiozis, T.; Ntzia-christos, L.; Bakeas, E. 2009. Effects of biodiesel on passenger car fuel consumption, regulated and non-regulated pollutant emissions over legislated and realworld driving cycles. *Fuel*. 88: 1608-17.
- Gafar, A.; Widodo, J. S.; Sidjabat, O.; Legowo, E. H.; Rahman, M.; Harimurti, K.; Sutardjo; Iskandar, N. R. 1995. Preparation of palm oil esters-diesel fuel mix and its performance test on stationary engine. *Proceedings of Porim Biofuel '95*. Porim International Biofuel Conference, p. 52.
- García, J.; Amado, M.; Torres, J.; Acero, J.; Sarmiento, J.A.; Cuéllar, M.; Rincón, O.; Cabuya, D. 2009. Stationary Engine and On-road test for Assessing the Performance of Palm Oil Biodiesel in Colombia.



- Proceeding of Chemistry, Processing Technology & Bio-Energy Conference*. Pipoc 2009. International Palm Oil Congress, Palm Oil- Balancing Ecologics with Economics. Malaysian Palm Oil Board, 2009. C25. 296 p.
- García-Núñez, J. A.; Reyes, J. A.; Carranza, R.; Varón, D.; Mesa, E.; Acero, J. R.; Sarmiento, J.A.; Sarmiento, J.A.; Espitia, E. 2011. Performance of Palm Oil Biodiesel Blends B10 and B20 during a Long Term Test in Light Duty Truck Fleet in Colombia. Chemistry, Processing Technology & Bio-energy Conference, Pipoc 2011. International Palm Oil Congress, Palm Oil- Fortifying and Energizing the Word. Malaysian Palm Oil Board, 2011. C22. 250 p.
 - Icontec. 2007. Norma técnica colombiana NTC 5444. Biodiésel para uso en motores diésel. Especificaciones.
 - Journal of ASTM International. Selected Technical Papers, STP 1477. Biofuels, 2011. In Nadkarni, R. A. Kishore, "Challenge of Analytical Characterization of Biofuels," J. ASTM Intl. 7 (3). doi:10.1520/JAI102445.
 - Kapilan, N.; Ashok Babu, T. P.; Reddy, R. P. 2009. Technical aspects of biodiesel and its oxidation stability. *International Journal of ChemTech Research* 1 (2): 278-282.
 - Karavalakis, G.; Bakeas, E.; Tournas, S. 2010. Influence of Oxidized Biodiesel Blends on Regulated and Unregulated Emissions from a Diesel Passenger Car. *Environ. Sci. Technology* 44: 5306-5312.
 - Karavalakis, G.; Stournas, S.; Karonis, D. 2010. Evaluation of the oxidation stability of diesel/biodiesel blends. *Fuel* 89: 2483-2489.
 - Knothe, G. 2010. Biodiesel and renewable diesel: A comparison. *Progress in Energy and Combustion Science* 36: 364-373.
 - Knothe, G.; Sharp, C.A.; Ryan, T.W. 2006. Exhaust Emissions of Biodiesel, Petrodiesel, Neat Methyl Esters, and Alkanes in a New Technology Engine. *Energy & Fuels* 20: 403-408.
 - Knothe, G.; Steidley, K. 2005. Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds, influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components. *Fuel Process Technology* 84:1059-65.
 - Lin, Y. C.; Lee, W. J.; Wu, T. S.; Wang, C. T. 2006. Comparison of PAH and regulated harmful matter emissions from biodiesel blends and paraffinic fuel blends on engine accumulated mileage test. *Fuel* 85: 2516-23.
 - Masjuki, H.; Zaki, A. M.; Sapuan, S. M. 1993. A rapid test to measure performance, emissions and wear of a diesel engine fueled with palm oil diesel. *Jaocs* 70 (10): 1021.
 - Masjuki, H.; Abdulmuin, M. Z.; Miasted, Sii, H. 1996. Investigations on preheated palm oil methyl esters in the diesel engine». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE)*: 131-138.
 - Mesa, J. 2008. Biodiésel de palma en Colombia: un sueño hecho realidad. *Palmas (Colombia)*. 29 (2): 81-89.
 - Ministerio de Minas y Energía de Colombia. 2007. Resolución 182087 de 2007 "Por la cual se modifican los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de la mezcla con el combustible diésel de origen fósil en procesos de combustión".
 - Moser, B. R. 2009. Biodiesel production, properties, and feedstocks. *In Vitro Cell.Dev.Biol.-Plant* 45:229-266
 - Mueller, C.J.; Boehman, A.L.; Martin, G.C. 2009. An experimental investigation of the origin of increased NOx emissions when fuelling a heavy-duty compression-ignition engine with soy biodiesel. *SAE technical paper* No. 2009-01-1792.
 - Perkins, L.A.; Peterson, C.L. 1991. Durability testing of transesterified winter rape oil (*Brassica napus* L.) as fuel in small bore, multi-cylinder, DI, CI engines. *SAE Paper* 911, 764.
 - Pfalzgraf, L.; Lee, I.; Foster, J.; Poppe, G. 2007. Effect of minor components in soy biodiesel on cloud point and filterability. *Inform supplement-biorenewable resources* No. 4. J Am Oil Chem Soc (Estados Unidos): 17-21
 - Ramos, M.J.; Fernández, C.M.; Casas, A.; Rodríguez, L.; Pérez, A. 2009. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology* 100: 261-268.
 - Reyes, J. A.; García-Núñez, J. A.; Varón, D.; Carranza, R.; Acero, J. R.; Sarmiento, J.A.; Sarmiento, J.A.; Espitia, E.; García, H.; Ávila, S. 2011. Pruebas de larga duración con biodiésel de palma en una flota de camiones de transporte. *Palmas (Colombia)* 32 (3).
 - Reyes, J. A.; García-Núñez, J. A.; Acero, J. R.; Sarmiento, J.A.; Espitia, E. 2011 (a). Long-term Test with Palm Biodiesel in a Fleet of Trucks. 14th *AOCS Latin America Congress and Exhibition on Fats and Oils*. 2011. Cartagena, Colombia.
 - Sapuan, S. M.; Masjuki, H.; & Azlan, A. 1996. The use of palm oil as diesel substitute, *Proceedings of ImechE* 210: 47.
 - Schäfer, Ansgar. 1995. The use of biofuel in modern diesel engines. *Proceedings of Porim Biofuel '95. Porim International Biofuel Conference* (61).
 - Schmidt, C.W. 2007. Biodiesel: cultivating alternative fuels. *Environ Health Persp.* 115: A86-91.
 - Schumacher, L. G.; Kolb, T. S.; & Borgelt, S. C. 1994. *Biodiesel: World Status*. University of Missouri.
 - Schumacher, L. G.; Peterson, C.; & Gerpen, J. 2001. Engine oil analysis of diesel engines fueled with biodiesel blends. *Annual International Meeting Sponsored by ASAE. ASAE paper* N° 01-6053.
 - Shay, E.G. 1993. Diesel fuel from vegetable oils: status and opportunities. *Biomass Bioenergy* 4: 227.42.
 - Singh, S.P.; Singh, D. 2010. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14, 200-216.
 - Sun, J.; Caton, J.A.; Jacobs, T.J. 2010. Oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fuelled diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 36, 677-695.
 - Staat; Frederic; Gatau & Paul. 1995. The effects of rapeseed oil methyl ester on diesel engine performance, exhaust emissions and long-term behavior - a summary of three years of experimentation. *SAE paper* N° 950053.

- Tyagi, O. S.; Atray, N.; Kumar, B.; and Datta, A. 2010. Production, Characterization and Development of Standards for Biodiesel - A Review. MAPAN - Journal of Metrology Society of India, Vol. 25, No. 3, pp. 197-218
- Wadumesthrige, K.; Smith, J.C.; Wilson, J.R.; Salley, S.O.; Ng, K.Y.S. 2008. Investigation of the parameters affecting the cetane number of biodiesel. J Am Oil Chem Soc., 85: 1073-81.
- Wang, W.; Lyons, D.; Clark, N.; Gautam, M.; Norton, P. 2000. Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification. *Environmental Science and Technology* 34 (6): 933.
- Zhang, Y.; Dub, M.A.; McLean, D.D.; Kates, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresour Technology* 90: 229-240.



Oficina: Carrera 1 C N° 22 -58 Oficina 801
Edificio Bahía Centro
Planta Extractora: Km 49 de la vía Ciénaga - Fundación
Tel: (5) 431 6252 Cel: 312 687 6167

www.palmaceite.com



Hay oportunidades que no se deben desaprovechar

Invierta con éxito en el negocio de la palma de aceite

Como promotores de negocios e inversiones con rentabilidad competitiva, ponemos a su disposición excelentes alternativas para que invierta en lo que más le conviene:

- Venta de semillas híbrido OxG INDUPALMA con la mejor asesoría y asistencia técnica.
- Venta de plántulas, torta de palmiste y polen de la más alta calidad.
- Servicio de Banca de inversión y operación de negocios. Ofrecemos soluciones integrales (estructuramos su proyecto, administramos su negocio y garantizamos la compra del fruto).

Mayores informes: comercial@indupalma.com PBX (57-1) 347 00 10

