

# Estudio de la viabilidad técnico-económica del biodiésel obtenido a partir de oleína de palma<sup>1</sup>

MARIO F. RIVERA  
GERARDO CABRERA  
SANTIAGO LAÍN



Motor biodiésel, laboratorio de mecánica. Foto UAO

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación del desempeño de dos formulaciones de biodiésel obtenidas a partir de aceite vegetal de palma. Los resultados obtenidos en ensayos en un dinamómetro para motores de encendido por compresión demuestran su viabilidad tanto técnica como ecológica para la producción de potencia. También se formulan lineamientos para su viabilidad económica. Por consiguiente, la posibilidad de cultivos de energía auto-sustentables es una posibilidad real.

**Palabras clave:** Biodiésel, biombustibles, transesterificación, generación de potencia, tecnología alternativa.

## Abstract

This work presents the performance results of two

<sup>1</sup> Investigación enmarcada en el grupo de «Desarrollo y difusión de tecnologías alternativas» de la Universidad del Valle dirigido por el Ing. Gerardo Cabrera Cifuentes y apoyado por el doctor. Santiago Laín de la Universidad Autónoma de Occidente, director del Grupo de Investigación en Mecánica de Fluidos.

mafrivera@gawab.com; acabrera@univalle.edu.co; slain@uao.edu.co

Fecha de recepción: 06/02/05, Fecha de aprobación: 09/01/05

biodiesel formulations obtained from palm oil. The technical and ecological viability for power generation is demonstrated by the experimental measurements performed in a diesel engine dynamometer. Additionally, the requirements for the biodiesel economic viability are also formulated. Therefore, the possibility of sustainable cultures for power generation becomes real.

*Keywords:* Biodiesel, biofuel, transesterification, power generation, alternative technologies.

## 1. Introducción

Desde hace unos cuantos años se conoce que los combustibles tradicionales como el petróleo y el carbón, sobre los que descansa la técnica moderna, se agotarán a corto plazo. Por consiguiente, la utilización de fuentes alternas de energía como los biocombustibles obtenidos a partir de aceites y grasas vegetales y animales, constituye una alternativa para reemplazar los combustibles fósiles tradicionales, especialmente en plantas de generación distribuida y en el transporte.

El diésel es un derivado del petróleo utilizado como combustible para los motores de encendido por compresión que realizan el ciclo del mismo nombre y que fue inventado por Rudolph Diésel en 1892. El uso de biocombustibles en automotores se remonta a los orígenes del motor de combustión interna. El original motor diésel que se mostró en la exhibición mundial de París, utilizaba como combustible aceite de cacahuete. Henry Ford diseñó sus automóviles, empezando con el

modelo T1980, para usar etanol como combustible y promovió su uso hasta los años 40 cuando por la presión de la industria petrolera cerró la planta de fabricación del biocombustible.

En nuestros días sobre la disponibilidad del combustible diésel descansa alrededor del 60% del suministro energético de la tecnología actual por lo que plantas y vehículos quedarían inservibles tras su agotamiento. Adicionalmente, la crisis energética y el encarecimiento de los derivados de los combustibles fósiles apremian más hacia el hallazgo de sustitutos. Entre ellos destaca el biodiésel derivado de vegetales el cual es una buena alternativa debido a que es un combustible ecológicamente «limpio» y su producción y uso sostenibles y sustentables. Además, los biocombustibles pueden producirse en cualquier clima usando la tecnología agrícola ya desarrollada en ciclos que van hacia el infinito en el tiempo, a diferencia de los combustibles fósiles. Por último, la dependencia de los países desarrollados del uso del diésel y la posibilidad natural de ser producidos en clima tropical abre las puertas hacia la exportación del energético.

En nuestro país apenas se están comenzando a dar los primeros pasos en la definición de políticas claras de energía que supongan el aprovechamiento de combustibles renovables de origen vegetal y el uso de combustibles híbridos (mezcla de combustibles de origen vegetal con hidrocarburos-etanol carburante). En el XXXII Congreso Nacional de Cultivadores de Palma de aceite,<sup>1</sup> el presidente Álvaro Uribe Vélez invitó al sector productivo de palma de aceite a aumentar los cultivos con miras a la producción de biodiésel: «Nosotros tenemos que anticiparnos a la crisis energética y una de las posibilidades es el biodiésel. Si algo necesita el país es

tener una política energética de múltiples fuentes y en la cual se le dé gran peso a las fuentes vegetales», expresó el presidente al Congreso. Sin embargo, la definición de estas políticas necesita conocer la utilidad y las aplicaciones de combustibles renovables de origen vegetal, además de su viabilidad económica de distribución y uso. Por consiguiente, se hace necesario realizar estudios de factibilidad técnica y económica de generación de potencia en motores diésel utilizando como combustible biodiésel obtenido de aceites vegetales propios de la región, como son el aceite de palma y sus fracciones, principalmente oleína de palma.

Este trabajo prueba que el biodiésel obtenido a partir de la transesterificación de la oleína de palma es una alternativa ecológica y técnicamente viable para la generación de potencia en motores diésel bien puro o mezclado con el diésel tradicional.

## 2. Material y métodos

Los aceites vegetales suelen poseer buenas características de combustión pero normalmente su viscosidad es inadecuada para el uso en motores por lo que debe adecuarse. El proceso químico en que se basa la obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal se denomina transesterificación, el cual es el más utilizado y probado alrededor del mundo por lo que se encuentra ampliamente documentado en la literatura.<sup>2</sup> En este proceso un alcohol reacciona con un aceite vegetal en presencia de un catalizador y se obtiene un alkyl ester (biocombustible) y glicerina como subproducto. Este proceso es muy común y sencillo debido a que se realiza en condiciones atmosféricas, a presiones y temperaturas relativamente bajas.

Las materias primas utilizadas en el proceso de transesterificación

se escogieron teniendo en cuenta lo reportado en la literatura y la disponibilidad de las mismas en el mercado nacional actual. Como principal materia prima se escogió el aceite de palma debido a su alta productividad por hectárea cultivada. En Colombia su cultivo está siendo impulsado por el gobierno nacional ante la necesidad apremiante de incentivar el agro y a la gran diversidad de usos que este aceite posee.

En el proceso experimental de transesterificación se probaron dos alcoholes: etanol industrial al 96% de pureza, cuyo contenido de agua (4%) produce una reacción inestable y poco predecible pero de fácil consecución y libre comercio en nuestro medio; y metanol que produce una reacción más estable y predecible pero de difícil consecución ya que se trata de un producto controlado en nuestro país. Finalmente como catalizador se utilizó soda cáustica en escamas (NaOH), producto químico de libre comercio y fácil consecución en Colombia.

La obtención del biodiésel utilizado en esta investigación se realizó siguiendo los procedimientos experimentales reportados en Tickell (2003)<sup>2</sup> para el proceso de transesterificación y para la refinación del biodiésel, adaptándolos a la realidad del aceite de palma de la región.

Con los procedimientos reportados se obtuvieron varios baches de biodiésel a escala de laboratorio a fin de definir las materias primas y ajustar el procedimiento a las mismas, optimizando tiempos de reacción, sedimentación, lavado, filtración y rendimientos. Los baches piloto de biodiésel se fabricaron en un tanque de mezcla en acero inoxidable con agitación mecánica. El tanque también sirvió para sedimentación y lavado. Para el proceso de

secado se utilizó una estufa de gas y para el filtrado un filtro normal de gasolina para automotores. De estos baches se escogieron los dos últimos, uno de biodiésel hecho con metanol (biodiésel 1) y el otro con etanol (biodiésel 2) para que sus propiedades fisicoquímicas y de combustión fueran analizadas en laboratorios especializados (Universidad del Valle y Lloreda S.A.). Se ajustaron las propiedades del biocombustible obtenido con las del diésel comercial. Una vez hecho esto, se fabricaron dos baches piloto de biodiésel, uno con metanol (1) y otro con Etanol (2) para ser ensayados en el dinamómetro diésel de la Universidad Autónoma de Occidente.

De acuerdo con lo observado en los baches a escala laboratorio se encontró que el proceso de transesterificación para la obtención de biodiésel se debe llevar a cabo utilizando las siguientes materias primas: oleína de palma, etanol (o metanol), NaOH y la siguiente formulación y procedimiento:

1. Medir la cantidad de oleína de palma (en mililitros) y depositarla en el tanque de mezcla.
2. Medir la cantidad de alcohol en mililitros (20% del volumen de aceite para el metanol, y 30% del volumen de aceite para el etanol) y depositarlo en un tanque aparte.
3. Medir la cantidad de catalizador (cuando se usa metanol, 0.35% del volumen de aceite vegetal usado, es decir, 3.5 gramos de NaOH por litro de aceite vegetal; cuando se usa etanol, 0.1% del volumen de aceite vegetal, esto es, 1 gramo de NaOH por litro de aceite vegetal) y depositarlos en el tanque que contiene el alcohol.
4. Disolver el NaOH en el alcohol, mezclándolo fuertemente hasta que el NaOH se disuelva por completo en el alcohol.
5. Depositar cuidadosamente la mezcla alcohol + NaOH en el tanque que contiene la oleína de palma y mezclar todo durante 30 minutos, con agitación fuerte y constante (por encima de 120 RPM).
6. Dejar reposar la mezcla mínimo 24 horas, para que la glicerina se decante al fondo del tanque y se pueda separar.
7. Separar cuidadosamente la glicerina del biodiésel.
8. Lavar el biodiésel con agua, la cual debe caer en forma de rocío o spray, sin generar turbulencia o agitación al biodiésel. La cantidad de agua debe ser igual a la cantidad de biodiésel en el tanque.
9. Dejar reposar el biodiésel lavado mínimo 58 horas para que el jabón producido por el lavado y la glicerina remanentes en la mezcla se decanten al fondo del tanque, junto con el agua sobrante.
10. Separar cuidadosamente el agua y el jabón del biodiésel.
11. Filtrar el biodiésel con un filtro de 100 micras (mínimo) para remover impurezas y sobrantes de jabón que puedan quedar en él.
12. Secar el biodiésel calentándolo por encima del punto de evaporación del alcohol utilizado (metanol: 65°C - etanol: 79°C), manteniendo esa temperatura por un tiempo no inferior a 20 minutos.
13. Dejar enfriar el biodiésel y filtrarlo con filtros de hasta 5 micrones.

En la Tabla 1 se puede observar que los procesos de transesterificación utilizando metanol y etanol son

muy similares, tanto en sus tiempos de proceso como en sus rendimientos. En general el tiempo de proceso por bache es de 24 horas, tiempo que es utilizado para el diseño, cálculos y estimación del costo de producción industrial de biodiésel.

### Fundamentos mecánicos

Los baches piloto de biodiésel escogidos, uno con metanol (biodiésel 1) y otro con etanol (biodiésel 2) se ensayaron en el dinamómetro Diésel de la Universidad Autónoma de Occidente. En las pruebas se determinó el torque, revoluciones por minuto (rpm) y consumo de combustible para los dos tipos de biodiésel y diésel fósil.

La medición del torque se realizó utilizando un freno Pronny. Para obtener el valor de la potencia generada se tomaron los datos de

fuerza para determinado número de rpm's. Con estos datos se encontró el torque T y por ende la potencia generada P utilizando las siguientes ecuaciones:

$$P = T\omega \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad f = \frac{rpm}{60}$$

(Torque (N m) = Fuerza (N) x Distancia (metros); Potencia (HP) = 0.1428 x Torque (N-m) x rpm)

Los resultados obtenidos para el combustible diésel y los dos baches piloto de biodiésel para la potencia, se presentan en la Figura 1. La discusión se posterga hasta la sección de resultados.

### 3. Resultados

En las siguientes Tablas y Figuras se presentan los resultados obtenidos en este trabajo.

**Tabla 1.** Resultados de baches de biodiésel experimental.

			Biodiésel 1	Biodiésel 2
Materia prima	Aceite	Oleína (ml)	30000	30000
	Alcohol	Metanol (ml)	6000	-
		Etanol (ml)	-	9000
	Catalizador	NaOH (gr)	105	30
Agua (ml)			30000	30000
Tiempos de mezcla y reposo	Alcohol + Catalizador (min)		10	10
	Aceite + Químicos (min)		30	30
	Para separación de glicerina		8 horas	8 horas
	Productos obtenidos			
		Biodiésel crudo (ml)	32000	33000
		Glicerina (ml)	3000	5600
Procesos de refinación	Lavado	Biodiésel lavado (ml)	28750	29500
		Agua + Jabón (ml)	32920	30100
		Tiempo de reposo	12 horas	12 horas
	Secado	Biodiésel secado (ml)	28000	29000
		Temperatura (°C)	65 - 70	80 - 85
		Tiempo de secado (min)	20	20
	Filtrado	Biodiésel refinado (ml)	28000	28550
		Tiempo de filtrado	3 horas	3 horas
Tiempo total de proceso			24 horas	24 horas

La Tabla 1 presenta las diferentes cantidades de materia prima utilizadas y productos obtenidos para la producción de los dos baches de biodiésel, así como los tiempos parciales requeridos en cada proceso de refinado y el tiempo total.

**Tabla 2.** Comparación de propiedades entre biodiésel experimental, diésel y biodiésel comercial.

Propiedades	Unidades	Diésel premium No. 2	Diésel corriente (ACPM)	Biodiésel (Literatura)	Biodiésel (Experimental)	
					Biodiésel 1 (Metanol)	Biodiésel 2 (Etanol)
Azufre total	g/100g	0,1	0,45	0,05	0,00	0,00
Índice de cetano		45,00	45,00	46,00	45,00	48,20
Viscosidad a 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	1,90 - 4,10	1,90 - 5,00	1,90 - 6,00	-	-
Punto de inflamación	°C	-	-	130,00	176,20	197,20
Punto inicial de ebullición	°C	Reportar	Reportar	-	304,70	203,90
Punto final de ebullición	°C	360	390	-	325,80	340,00
Poder Calorífico	BTU/lb	17600 - 18000	17600 - 18000	17650,00	17126,00	16992,00
Cenizas	%p/p	-	-	0,02	0,00	0,00
Gravedad específica 15°C	g/cm <sup>3</sup>	Reportar	Reportar	0,86 - 0,90	-	-
Gravedad específica 25°C	g/cm <sup>3</sup>	-	-	-	0,63	0,66
Viscosidad a 25°C	cps, aguja #1, 60 rpm	-	-	-	11,4	32,4
Densidad a 25°C	g/cm <sup>3</sup>	-	-	-	0,90	0,92

La Tabla 2 presenta las propiedades de los dos tipos de biodiésel empleados en este trabajo, comparadas con dos tipos de diésel comerciales (Premium y ACPM) y el biodiésel estándar reportado en la literatura. Las propiedades de ambos tipos de biodiésel 1 y 2 se determinaron en los laboratorios de la Universidad del Valle y de Llorede Grasas S.A. Aunque las propiedades físico-químicas de todos los combustibles son similares, en la tabla se puede identificar un mayor índice de cetano en el biodiésel 2 respecto a los demás, lo cual favorece la combustión, pero también un menor poder calorífico que el diésel fósil y una temperatura de inflamación menor. Es esperable que el menor poder calorífico de los biodiésel 1 y 2 implique una menor potencia desarrollada por el motor, lo cual se confirma en la Figura 1,

donde a las revoluciones más elevadas consideradas en este estudio (2750 rpm) el biodiésel 2 produce un 12.5% menos potencia que el diésel fósil. Como resultado colateral se obtiene un aumento medio del consumo del 10% respecto al hidrocarburo según la literatura especializada.

Estos resultados muestran la viabilidad técnica del uso del biodiésel obtenido por transesterificación a partir de oleína de palma. Esta viabilidad sumada a la escasez del combustible fósil y la combustión «limpia» del biodiésel, lo convierte en un candidato muy atractivo para la sustitución del diésel derivado del petróleo. Beneficios adicionales de su uso son la no necesidad de adaptación de los motores actuales y la lubricación interna del motor que se traduce en un mayor ciclo de vida de éste.

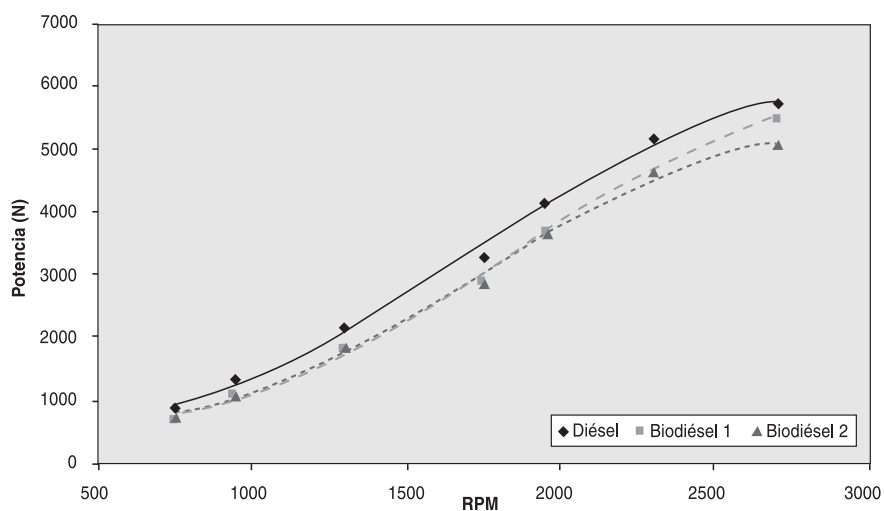


Figura 1. Resultados de ensayo de potencia.

El siguiente paso fue realizar una aproximación a la viabilidad económica del uso del biocombustible obtenido a partir de oleína de palma. Para el cálculo de los costos de materia prima y de mano de obra

requerida al año, se asume que la planta trabaja 3 turnos de 8 horas 360 días al año, contando con 1 supervisor y 3 operarios por turno y en la parte administrativa 1 jefe de planta.

Tabla 3. Costos estimados de producción de biodiésel por año.

		Cantidad (Toneladas/año)	Valor unitario (\$/Kg)	Valor total (\$/año)
Materia prima	Oleína de palma	10800,00	\$ 1.527,20	\$ 16.493.760.000,00
	Etanol	2598,78	\$ 3.004,86	\$ 7.808.963.868,20
	NaOH	12,26	\$ 2.000,00	\$ 24.524.623,87
	Agua	11564,24	\$ 0,30	\$ 3.469.270,88
	Total materia prima			\$ 24.330.717.762,95
		Cantidad (unidad)	Valor unitario (\$/h)	Valor total (\$/año)
Costos de mano de obra	Operarios	3	\$ 3.337,29	\$ 86.502.600,00
	Supervisor	1	\$ 4.322,92	\$ 37.350.000,00
	Jefe de Planta	1	\$ 12.968,75	\$ 37.350.000,00
	Total mano de obra			\$ 161.202.600,00
	Total			\$ 24.491.920.362,95

**Tabla 4.** Costo estimado de equipos y planta.

Equipos	Material	Capacidad	Valor unitario calculado	Valor unitario corregido	Cantidad	Valor total
Tanque de almacenamiento en (Oleína de Palma)	Acero al carbón	30 Ton	\$ 36.626.174,88	\$ 37.000.000	1	\$ 37.000.000
Tanque de almacenamiento (Etanol)	Acero al carbón	10 Ton	\$ 19.580.890,99	\$ 20.000.000	1	\$ 20.000.000
Tanque de almacenamiento (Glicerina)	Acero al carbón	10 Ton	\$ 19.580.890,99	\$ 20.000.000	1	\$ 20.000.000
Tanque de almacenamiento (Agua residual)	Acero al carbón	40 Ton	\$ 43.152.567,90	\$ 44.000.000	1	\$ 44.000.000
Tanque de almacenamiento (Biodiésel refinado)	Acero al carbón	60 Ton	\$ 54.372.419,92	\$ 55.000.000	1	\$ 55.000.000
Tanque de mezcla (Etanol + NaOH)	Acero inoxidable	10 Ton	\$ 62.492.205,28	\$ 63.000.000	1	\$ 63.000.000
Tanque de mezcla (Oleína + Etilato de Sodio)	Acero inoxidable	15 Ton	\$ 78.740.445,63	\$ 79.000.000	1	\$ 79.000.000
Tanque sedimentador (Biodiésel + Glicerina)	Acero inoxidable	15 Ton	\$ 11.956.869,25	\$ 12.000.000	3	\$ 36.000.000
Tanque sedimentador (Biodiésel + Agua)	Acero inoxidable	25 Ton	\$ 13.937.090,02	\$ 14.000.000	3	\$ 42.000.000
Secador	Acero inoxidable	10 Ton	\$ 126.301.609,24	\$ 127.000.000	1	\$ 127.000.000
Condensador (Vapor de Etanol)	Acero al carbón	0,2 Ton (1 m <sup>2</sup> )	\$ 13.972.239,97	\$ 14.000.000	1	\$ 14.000.000
Batería de filtros (hasta 5 micrones)		20 gal/min (2 m <sup>2</sup> )	\$ 16.990.727,71	\$ 17.000.000	2	\$ 34.000.000
Bomba centrífuga	Acero al carbón	20 gal/min	\$ 14.355.931,04	\$ 15.000.000	2	\$ 30.000.000
Bomba centrífuga	Acero al carbón	60 gal/min	\$ 23.142.529,08	\$ 24.000.000	9	\$ 216.000.000
Tubería y accesorios	Acero al carbón	30% del costo total de los equipos	-	-	-	\$ 245.100.000
					<b>Total</b>	<b>\$ 1.062.100.000</b>

Costo total de instalación (25% del costo total de equipos)	\$ 265.525.000
Costo total (Instalación + equipos)	\$ 1.327.625.000

Para el cálculo del costo de los equipos anteriormente listados se utiliza el método de exponentes de la relación o razón de capacidad.<sup>4</sup>

Si el costo de un equipo con un tamaño o capacidad  $q_1$  es  $C_1$ , entonces el costo de un equipo simi-

lar, de tamaño o capacidad  $q_2$ , se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$C_2 = C_1 \times (q_1 / q_2)^n$$

donde el valor del exponente  $n$  depende del tipo de equipo.



**Tabla 5.** Costos de producción de biodiésel por bache.

Item de costo	Costo por bache
Materia prima	\$ 67.585.327,12
Mano de obra	\$ 655.285,00
Servicios	\$ 337.926,64
Depreciación de planta y equipos	\$ 368.784,72
Mantenimiento	\$ 206.841,97
Varios	\$ 345.770,83
<b>Total</b>	<b>\$ 69.499.936,27</b>

Para el cálculo de los costos de producción por bache se toma como tiempo de proceso 24 horas.

**Tabla 6.** Costo estimado de fabricación de biodiésel por galón.

Costo de fabricación biodiésel	Valor
\$/Kg	\$ 2.458,69
\$/lt	\$ 2.223,40
\$/gal	\$ 8.415,55
Precio de venta con utilidad del 30% (\$/gal)	\$ 10.940,22
Precio de venta corregido (\$/gal)	\$ 11.000,00
<b>Precio de venta diésel fósil (Mayo/2005)</b>	<b>\$ 3.956</b>

Para la estimación de los costos de producción se escogió el proceso de transesterificación utilizando etanol. Los dos baches de biodiésel experimental poseen características fisicoquímicas y de combustión muy similares, pero la elección del etanol se debió a su fácil manejo y consecución en el mercado nacional, además de ser un alcohol de fuentes renovables.

De las Tablas 3, 4, 5 y 6 se puede observar que el costo de producción de biodiésel por galón es muy alto con respecto al combustible diésel en un 112.7%, haciendo no via-

ble su comercialización. Teniendo en cuenta varias recomendaciones para mejorar y optimizar los procesos (recuperación de etanol, recuperación de biodiésel, recuperación de agua de lavado, uso de aceite crudo de palma como materia prima) el costo de fabricación de biodiésel se puede disminuir hasta un valor de 69.5% por encima del costo del diésel. Como alternativa adicional para reducir costos se plantea la mezcla del biodiésel con el diésel fósil, bien en porcentajes del 5% o del 20%, constituyendo mezclas conocidas como B5 y B20.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se demuestra que el biodiésel obtenido experimentalmente a partir de oleína de palma por medio del proceso de transesterificación es viable técnicamente y se puede utilizar en la generación de potencia en motores diésel, aunque no es viable económicamente para usarse como combustible 100% puro. El biodiésel presenta ciertas desventajas respecto al diésel fósil como son la disminución en el torque y la potencia generada, además de un incremento en el consumo de combustible, y como ventajas la de ser un combustible obtenido de cultivos renovables, alta viscosidad que lubrica y protege las partes internas del motor y su baja contaminación, además de generar empleo y crecimiento para el sector agrícola en el país. El biodiésel puede hacerse económicamente viable cuando en lugar de oleína de palma se utiliza como materia prima aceite crudo de palma y se realizan mezclas de biodiésel y diésel entre el 5% y el 20%, denominadas mezclas B5, B20. Con el fin de comercializar el biodiésel y permitir su respectivo crecimiento industrial como combustible, se puede promover su consumo con mezclas B5 en sistemas de transporte específicos, como por ejemplo el MIO de la ciudad de Cali generando

impactos económicos y ambientales positivos localizados.

## 5. Agradecimientos

El primer autor quiere expresar su más sincero agradecimiento a los ingenieros Alberto Rivera Velasco, Ángel Fabio Barona, Alfredo Aragón, a la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente y a Lloredda S.A. sin el apoyo de los cuales no hubiera sido posible la realización de este trabajo. ☀

## Bibliografía

1. Fedepalma. «Palmas». XIV conferencia internacional sobre palma de aceite Volumen 25 No. Especial Tomo I. 2004.
2. Tickell, Joshua. «From the fryer to the fuel tank». Tercera edición, 2003.
3. Aragón, Alfredo. «El motor diésel y sus pruebas de laboratorio». Tesis de grado. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente. 1996.
4. Perry H., Robert. «Manual del Ingeniero Químico». Tomo VI. Sexta edición. México. McGraw-Hill, 1996.