

## ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL BIODIESEL DE ACEITE DE PALMA EN EL MOTOR ISUZU 4JA1 - T OHV DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS DE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Fabián Alberto Escandón Felizzola,  
Estudiante Tecnología en Mecánica Automotriz  
Julián Andrés Mesa Gil,  
Estudiante Tecnología en Mecánica Automotriz  
Tecnológico Pascual Bravo, Institución Universitaria

ASESOR, Luis Eduardo Jaramillo Cuartas, Ingeniero Mecánico

**Resumen.** En este artículo se presentan los aspectos relacionados con el desempeño mecánico y ambiental del motor diesel 4JA1-T OHV de 2.5 litros de cilindrada, turboalimentado (actualmente utilizado en la camioneta Iuv Dimax). Utilizando diversos combustibles, entre ellos el diesel convencional y Biodiesel de aceite de palma mezclado al 5, 10, 20, 30, 50 y 100% en volumen.

Los ensayos se realizaron a igualdad de energía en el cigüeñal para cada combustible, en cinco grados de carga estacionarios, representativos de las condiciones de operación del vehículo en ciudad. El rendimiento efectivo sufrió cambios estadísticamente no muy significativos, con lo cual se comprobó que la relación energía suministrada a energía obtenida en el cigüeñal no varía demasiado independiente de la mezcla del biodiesel utilizado.

Aunque las tendencias observadas dependen del tipo de aceite del que provienen los alquíferos, se puede concluir que a medida que se incrementa el porcentaje de biodiesel en las mezclas diesel - biodiesel, disminuye la potencia y aumenta el consumo de combustible. Además disminuyen el CO, HC, material particulado, hollín, y la opacidad de humos. De otro lado, los NOX aumentan dependiendo de la afinación y deterioro del motor. La potencia disminuye entre 0.5 y 10% entre B5 y B100 respectivamente. El consumo de combustible aumenta entre 0.05 - 8%, para el biodiesel y sus mezclas, debido al menor poder calorífico del biocombustible comparado con el diesel convencional.

Las emisiones de CO disminuyen de 2.5 a 50%, HC 0.6-55%, con B5 y B100 respectivamente. La opacidad

de humos disminuyen entre 0 y 30% y los SOx entre 20 y 100%, debido al escaso contenido de azufre del biodiesel. La reducción global de CO2 es de 0.6-78.4% para B5 Y B100 respectivamente. La ventaja medioambiental de tipo global del biodiesel es el cierre del ciclo de vida del CO2 (emisión nula) pues las plantas oleaginosas por medio del proceso toman este gas y lo transforman en oxígeno.

**Palabras clave:** Motores diesel, Desempeño Mecánico, Desempeño ambiental, Biodiesel, Emisiones Contaminantes

**Abstract.** In this paper appears the aspects related to the mechanical and environmental performance from diesel engines fuelled by several fuels, such as conventional diesel fuel and alternative fuels derived from vegetable oils (Biodiesel). An experimental comparison of mechanical and environmental performances obtained from turbocharged, Light duty 2.5 liters, automotive diesel engine mounted in a test bench. The engine used conventional diesel fuel and palm oil biodiesel blended at 5, 10, 30, 50, 100% by volume.

Test were carried out under the same effective pressure for each fuel, five engine loads in stationary conditions representative from city operation were tested. Although, the observed trends, strongly, depend of the type of vegetable oils used as raw material it is possible to conclude that an increase in biodiesel percent in the biodiesel - diesel blends, leads to a decrease in power and an increase in fuel consumption. Smoke opacity and emission of CO, HC, particulate matter and soot are also reduced. In regard to NOX an increase 2% or a decrease 20% could be expected depending on the tuning of the engine.

*Power diminishes between 0.5 and 10% for B5 and B100 respectively. Fuel consumption increases around 0.05 to 8% for 5 biodiesel and its blends do to the biodiesel lesser heating value.*

*Emission of CO diminish between 3, 14, 55 % for B5, B20, B100 respectively. Smoke opacity decreases between 0 to 30%. SOx emissions also diminish between 20 to 100% do to the lesser content of sulfur in the biodiesel. The global reduction of CO2 is between 0.6 to 78.4% for B5 and B100. The environmental advantage from biodiesel is the life cycle of CO2 being closed.*

*Key words: Biodiesel, Diesel Engines, Gaseous emissions, mechanical performance, environmental performance*

## INTRODUCCIÓN

Entre los motores de combustión interna, el motor diesel o de encendido por compresión (MEC), ha venido ganando terreno progresivamente por sus ventajas en cuanto a consumo de combustible. La comunidad científica internacional, que actualmente realiza actividades de investigación y desarrollo en el área de la combustión en MEC, tiene enfocados sus esfuerzos hacia mejorar cada vez más su eficiencia térmica, reducir las emisiones contaminantes especialmente las de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y de material particulado (PM), y estudiar los efectos del uso de combustibles reformulados o alternativos. La presente propuesta de investigación se enmarca dentro de los dos últimos objetivos.

En lo referente a nuevos combustibles o combustibles reformulados para MEC, el biodiesel, usado puro o mezclado en diferentes concentraciones con el diesel convencional, constituye la opción más ampliamente aceptada, dadas las ventajas técnicas, estratégicas y ambientales que ofrece este combustible derivado de la biomasa. El biodiesel, mezcla de alquilesteres de ácidos grasos<sup>1</sup>, es un combustible renovable, oxigenado, libre de azufre y compuestos aromáticos, y prácticamente biodegradable; la

presencia de oxígeno en el combustible permite una combustión más completa en el motor y su uso no requiere modificación significativa en los motores, al igual que es completamente soluble en el diesel convencional. Numerosas investigaciones han reportado reducciones considerables en las emisiones de varios tipos de contaminantes atmosféricos, cuando se reemplaza el combustible diesel convencional derivado del petróleo por biodiesel. Sin embargo, con la utilización de diferentes tipos de biodiesel a nivel comercial, se ha detectado un aumento, de una parte, en las emisiones de  $\text{NO}_x$  con respecto al diesel convencional que puede llegar a ser del orden de un 10% o mayor cuando se usa biodiesel puro, y de otra parte en emisiones fotoquímicas como algunos aldehídos. Adicionalmente, dado que el biodiesel posee propiedades físicas y químicas diferentes al diesel derivado del petróleo, es de esperar que el desempeño mecánico del motor experimente variaciones.

En Norteamérica hay dos grupos que son líderes en la investigación en emisiones en motores diesel funcionando con biodiesel; Uno de ellos pertenece a la Universidad de Iowa y es liderado por Jon Van Gerpen. Otro, liderado por M. S. Graboski y R. L. McCormick el cual tiene vínculos con la Escuela de Minas de Colorado y ha realizado proyectos relacionados con el tema para el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) y la Agencia de Protección del Medioambiente (EPA) de los Estados Unidos. En Europa es importante destacar el trabajo del grupo de combustibles y motores de la Universidad de Castilla La Mancha liderado por Magín Lapuerta. En Malasia el Malaysian Palm Oil Board (MPOB) ha promovido la realización de diferentes ensayos en ruta con vehículos funcionando con biodiesel de aceite de palma.

En Colombia el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), ha realizado varias pruebas en banco y en vehículos en ruta para evaluar las mezclas B5 (5% biodiesel de palma-95% ACPM) con miras a implementar su uso a partir del 1 de enero del 2008.

<sup>1</sup> Probst, O. El BIODIESEL COMO ALTERNATIVA LIMPIA Y RENOVABLE PARA EL TRANSPORTE. [En línea]. MONTERREY, México. s.n. 2001 <<http://transferencia.mty.itesm.mx/56/56-III.03.html>> [Consultada: 5 de Julio de 2007].

Gracias a los aportes en investigación del ICP se pudieron evaluar las mezclas de diesel y biodiesel, así como las de gasolina con 10% de alcohol carburante. Dichos análisis incluyeron la evaluación de las viabilidades técnicas y económicas para la incorporación del biodiesel dentro de la canasta energética del país. El resultado de las investigaciones le permitió a ECOPEPETROL incursionar en el negocio de los biocombustibles, como una estrategia para obtener recursos adicionales y abrir su espectro comercial.

## METODOLOGÍA

En este proyecto experimental, se quiere comparar el comportamiento mecánico y ambiental de un motor diesel representativo, funcionando con ACPM y con diferentes mezclas de ACPM - Biodiesel de Aceite de Palma. Los ensayos se han realizado en el laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia. En las figuras 1 y 2, se muestra el motor física y esquemáticamente en el Banco de Ensayos.

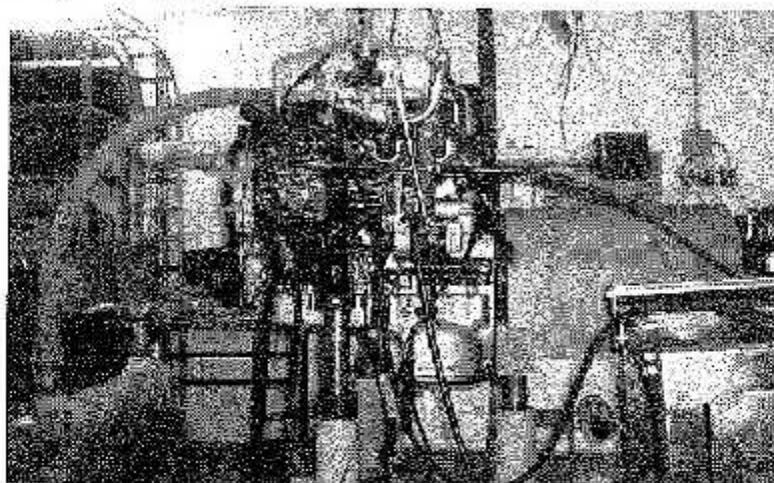


Figura 1. Motor en Banco de Ensayos.

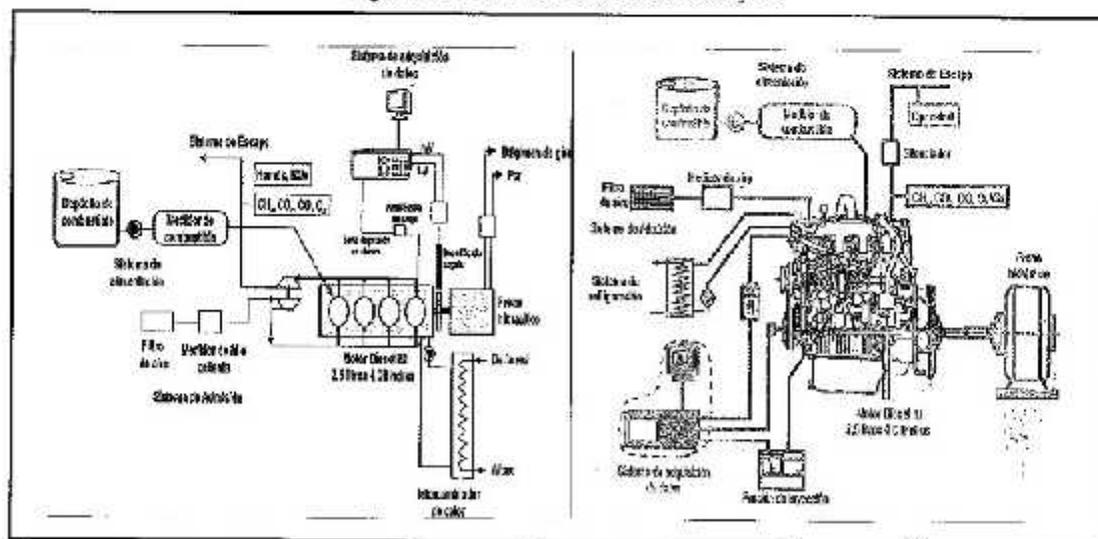


Figura 2. Esquema del Banco de Ensayos<sup>2</sup>

Las mezclas de Biodiesel con combustible tradicional se prueban en un motor diesel montado en un banco de ensayos debidamente instrumentado (figuras 1 y 2). No se realizaron modificaciones significativas sobre el motor o sobre sus sistemas auxiliares.

<sup>2</sup> Imágenes tomadas de: AGUDELO SANTAMARÍA, John y BENJUMEA HERNÁNDEZ, Pedro. Diagnóstico de la combustión de biocombustibles en motores. 1ª Edición. Colciencias. Marzo de 2007, pág 65-75. [Consultada: 25 de Enero de 2008].

Tabla 1

Características técnicas del motor de ensayos<sup>3</sup>

El motor elegido para los ensayos es un Diesel turboalimentado de inyección directa, típico del parque automotor colombiano de trabajo ligero. Las características básicas de dicho motor se presentan en la tabla 1.

Motor	Diesel Turbo Alimentado de 2,5L
Código	4JA1-T OHV
Desplazamiento (c.c.)	2499
No Cilindros	4 en línea
No Válvulas	8
Potencia Neta (HP@rpm)	79 @ 3900
Torque Neto (kg-m@rpm)	18 @ 2000
Relación Compresión	17,7
Diámetro x Carrera	93 X 92
Alimentación	Bomba de inyección Rotativa

Tabla 2

Características técnicas del equipo de análisis de gases

Especificaciones	Magnitud
Celda Electroquímica	Nox, CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , HC, otros
Precisión para O <sub>2</sub>	1% en Vol.
Precisión para otros gases	4% de la lectura
Base de medición	Seca

La medición del consumo de aire se realizó mediante un sensor de hilo caliente; La del consumo de combustible se realizó con un medidor de Flujo másico Danfoss del tipo Coriolis y las emisiones con un equipo de gases portátil marca Lancom Series II . Cuyas características técnicas se muestran en la tabla 2.

En el esquema del banco de ensayos observamos que el aire que entra al motor pasa por un filtro, luego por un medidor de hilo caliente, y finalmente entra al turbocompresor. Igualmente se observa el depósito de combustible móvil con capacidad para 10 galones, equipado con filtro y bomba de combustible y un medidor de flujo que desemboca en la bomba de inyección; El retorno de combustible procedente de los inyectores se lleva a la entrada de la bomba de inyección, de modo que se mide el consumo de combustible neto.

Las emisiones gaseosas se obtuvieron directamente del sistema de escape entre la turbina y el silenciador, a través de una toma para medir emisiones gaseosas. Después del silenciador hay otra toma para medir la opacidad de humos.

La refrigeración del motor se garantiza por medio de un intercambiador de calor que enfría el agua

que circula por el motor utilizando agua de la red hidráulica. Este intercambiador funciona automáticamente, gobernado por un termostato.

El sensor de presión en la cámara de combustión se instaló en el cilindro del extremo opuesto a la volante, en el alojamiento de la bujía de precalentamiento; Su señal es llevada a un amplificador de carga, y de éste a una de los puertos de la tarjeta de adquisición de datos; Las señales de codificación angular que tiene su sensor ubicado en el eje del cigüeñal extremo opuesto a la volante, y el sensor de presión en inyección ubica a la salida de la bomba de inyección y procedente del respectivo acondicionador de señal, también se encuentran conectados a la tarjeta de adquisición de datos.

Esta tarjeta se instaló en un computador acondicionado para la medición de parámetros instantáneos y se controla usando un programa

<sup>3</sup> Manual de servicio - ISUZU

informático desarrollado en LABVIEW, llamado ARAME, el cual fue desarrollado en el laboratorio de maquinas térmicas de la Universidad de Antioquia

Para medir el par se usa un sensor de presión que recibe la señal de presión de aceite proveniente de las celdas de carga del freno dinamométrico. El régimen de giro se mide usando un sensor incorporado en el alternador. La posición del acelerador se mide con un potenciómetro lineal acoplado al acelerador.

En condiciones de conducción típicas de ciudad, los vehículos están sometidos a constantes paradas y arranques. Esto hace que gran parte del ciclo normal de conducción sea en estado transitorio y que pocas veces se alcancen condiciones de plena carga; en muchas carreteras y ciudades de nuestro país hay pendientes por lo cual se debe establecer un criterio definido, por un valor de par y régimen de giro del motor. Todas las señales de las variables medidas se llevan al sistema de adquisición de datos y se visualizan en tiempo real con el programa ARAME.

### RESULTADOS

Para B100	la pérdida de potencia y torque es del orden de 10%
B50	la pérdida de potencia y torque es del orden de 5%
B20	la pérdida de potencia y torque es del orden de 2%
B10	la pérdida de potencia y torque es del orden de 1%
B5	la pérdida de potencia y torque es del orden de 0.5%

Es de Esperar que el menor poder calorífico del biodiesel implique una menor potencia desarrollada por el motor y el torque también disminuya, al igual que el consumo de combustible aumenta en proporción al menor poder calorífico del biodiesel, incrementándose para B100 en un 8% y 0.5%, 1% y 2% para las mezclas B5, B10 y B20 respectivamente. De igual forma varía la autonomía o rendimiento en (km/galón). También observamos una tendencia lineal entre la relación mezcla - pérdida de potencia y torque.

El biodiesel, no obstante al tener menor poder calorífico y necesitar, por tanto, consumir más combustible para generar la misma potencia que el diesel, no afecta el rendimiento efectivo del motor; por el contrario, los resultados muestran un ligero incremento del rendimiento del motor al usar B20, que podría justificarse con el aporte extra de oxígeno molecular.

Se observa que el dosado relativo o relación combustible/aire respecto de la estequiométrica tiende a permanecer aproximadamente constante, esto se debe a que el dosado estequiométrico del biodiesel es poco mayor. El índice de emisión másico cuantifica la masa de CO<sub>2</sub> emitida al quemar una unidad de masa de combustible, se ha expresado en kgCO<sub>2</sub>/kgcomb y se estimó directamente de la

fórmula química del combustible a partir del número de moles de CO<sub>2</sub>.

La validez de este método radica en que el rendimiento de la combustión de los motores diesel es cercano a la unidad y las emisiones de CO y HC son muy pequeñas frente a las de CO<sub>2</sub>. Este índice se reduce en 0.6%, 1.4% y 2.7% con B5, B10 y B20 respectivamente. Mientras que el diesel convencional emite 3.13 kgCO<sub>2</sub>/kgcomb, las mezclas B5, B10 y B20 emiten 3.1%, 3.01% y 3.06% kgCO<sub>2</sub>/kgcomb respectivamente

los resultados obtenidos para los diferentes combustibles en función del grado de carga. Tanto las emisiones específicas como el índice de emisión de CO tienden a disminuir con el uso de biodiesel. Las emisiones específicas de CO disminuyen entre 3% y 14% al usar B5 y B20 respectivamente en el modo de funcionamiento 1 a (pme = 0.85 bar); esta diferencia se atenúa a medida que incrementa el grado de carga del motor debido a la exigencia en las condiciones de operación.

Aunque es de esperarse una reducción en las emisiones de HC, debido al oxígeno molecular y al menor punto final de ebullición del biodiesel, se debe tener cuidado en la interpretación de las mediciones con los equipos comúnmente

empleados para su determinación. En este trabajo se utilizó un sensor de celda electroquímica, que no es el más idóneo para hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados (TCH). El equipo más aceptado para su determinación es el denominado FID o detector de ionización de llama, que cuenta con una línea calorifugada que se calienta a 190°C, con el fin de evitar que los hidrocarburos presentes en los gases de escape se condensen y sean absorbidos en el material particulado. Otro factor que puede afectar su medición es el contenido de oxígeno molecular del biodiesel; pues es sabido que este parámetro afecta la sensibilidad de estos equipos de medición.

Existe consenso en la literatura técnica en que se produce un incremento en las emisiones de NOx al usar biodiesel, y que además este incremento depende del tipo de biodiesel, obteniéndose menores emisiones entre más compuestos saturados tenga. Sus argumentos para explicar esta tendencia se basan en que el biodiesel, por su mayor avance de la inyección y más rápido inicio de la combustión, produce una temperatura pico más elevada durante la fase de combustión por difusión. Otro argumento se basa en que hay mayor disponibilidad de oxígeno en la cámara de combustión para combinarse con el nitrógeno del aire y formar los NOx. Este par de efectos parece sobreponerse al mayor número de cetano del biodiesel. Quienes han obtenido reducciones en las emisiones de NOx argumentan que es el contenido de oxígeno extra del biodiesel<sup>4</sup>.

### CONCLUSIONES

- En términos generales, las pruebas dinamométricas permitieron corroborar el efecto benéfico desde el punto de vista ambiental del biodiesel empleado en forma pura y en mezcla con diesel.
- Disminuyen el CO, HC, material particulado, hollín y la opacidad de humos.
- A medida que se incrementa el porcentaje de biodiesel en las mezclas biodiesel - diesel disminuye la potencia, y aumenta el consumo de combustible.
- La potencia disminuye entre 3 y 10% para B30 Y B100 respectivamente.
- Las emisiones de CO, disminuyen del 10 al 50% y de HC del 12 - 55% con B30 Y B100 respectivamente.
- Las emisiones de SOx disminuyen entre 20 y 100%, debido al escaso contenido de azufre del biodiesel.
- La reducción de CO2 es del 16- 78.4% para B20 y B100 respectivamente.
- Los resultados de las pruebas demuestran al comparar mezclas diesel - biodiesel Vs Diesel que la opacidad disminuye apreciablemente alcanzando hasta un 17% de reducción con el uso de Biodiesel puro.
- Se mejora el proceso de combustión como resultado de una combustión más completa del combustible.
- Se obtuvo un incremento en el consumo específico de combustible respecto al diesel corriente en torno a 0,5, 1, 1,7 que se aproxima a 2% al usar B5, B10, y B20 respectivamente.
- Las emisiones específicas de THC(gTIIC/kWh) disminuyeron aproximadamente en la mitad del contenido de biodiesel en la mezcla(2.5, 5, y 10%) para B5, B10, B20 respectivamente.
- Las emisiones específicas de NOx incrementaron ligeramente, y alcanzaron un máximo para la mezcla B20 en torno al 3% respecto al Diesel corriente. Se presentan los índices de emisión en términos de masa de contaminante por unidad de combustible quemado.
- El biodiesel presenta ciertas desventajas respecto al diesel fósil como son la disminución en el torque y la potencia generada, además de un incremento en el consumo de combustible.
- Dentro de las ventajas del biodiesel están que es un combustible obtenido de cultivos

<sup>4</sup> Entrevista: BENJUMEA, Pedro. Profesor Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 21 de Junio de 2007.

renovables, alta viscosidad que lubrica y protege las paredes internas del motor y su baja contaminación además de generar empleo y crecimiento para el sector agrícola en el país.

- El tratamiento estadístico de los datos experimentales mostró que el intervalo de confianza es del 95%, tanto en el análisis de parámetros mecánicos como ambientales, con excepción en algunos casos de las mezclas B20; debido probablemente a inexactitudes en la experimentación o a que las diferencias de las mediciones estaban dentro del rango de precisión de los equipos de medida.
- El rendimiento efectivo del motor no se vio afectado con el uso de biodiesel, por el contrario, se apreció un ligero incremento (1%) con el uso de B20, probablemente debido a la aportación de oxígeno molecular.
- Las emisiones específicas de CO disminuyen entre 3 y 14% al usar B5 y B20 respectivamente respecto al diesel corriente, a bajos grados de carga ( $p_{me} = 0.85$  bar); esta diferencia se hace menor a medida que incrementa el grado de carga del motor, debido a que mejoran las condiciones de operación.
- Desde el punto de vista mecánico del motor, el consumo adicional de combustible apenas se ve ligeramente incrementado. Estos resultados son válidos para el motor de ensayos utilizado y para una altitud sobre el nivel del mar de 1500m (Medellín).

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTIN M, Tomás. Definición del problema a investigar y de los objetivos de investigación. [En línea]. TEMUCO, Chile. 2004  
<<http://www.angelfire.com/emo/tomaustin/Met/guidadosproblema.HTM>> [Consultada: 2 de Julio de 2007]
- PADRÓN, J. Publicaciones del Decanato de Postgrado de la USR. Que es un problema de investigación. [En línea]. Caracas: s.n. 1996.  
<[http://www.geocities.com/josepadron.geo/Que\\_es\\_un\\_problema.htm](http://www.geocities.com/josepadron.geo/Que_es_un_problema.htm)> [Consultada: 2 de Julio de 2007]
- ICP, 22 Años desarrollando tecnología. [En línea]. BUCARAMANGA, Colombia. s.n. 2007.  
<<http://www.ecoptrol.com.co/contenido.aspx?conID=40190&catID=200>> [Consultada: 9 de Julio de 2007]
- Entrevista. BENJUMEA, Pedro. Profesor Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 21 de Junio de 2007.
- L.RY 939 DE 2004. Bogota: Legis, 2005. Art. 4.
- SUÁREZ PÉREZ, S y Mejía, L. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Minas y Energía. [En línea]. Bogotá. s.n. 2005.  
<[http://www.minambiente.gov.co/juridica\\_normatividad/normatividad/viceministerio\\_ambiente/ambiental/combustibles/res\\_1289\\_070905.pdf](http://www.minambiente.gov.co/juridica_normatividad/normatividad/viceministerio_ambiente/ambiental/combustibles/res_1289_070905.pdf)> [Consultada: 4 de Julio de 2007]
- Probst, O. EL BIODIESEL COMO ALTERNATIVA LIMPIA Y RENOVABLE PARA EL TRANSPORTE. [En línea]. MONTERREY, México. s.n. 2001  
<<http://transferencia.mty.itesm.mx/56/56-III.03.html>> [Consultada: 5 de Julio de 2007]
- DÍAZ, H. Técnicas de estudio. [En línea]. MARACAY, Venezuela. s.n. 2003. <<http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpZFyFZZpHdRSUHY.php>> [Consultada: 6 de Julio de 2007]
- Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología -CORPOBID-. Proyecto para la producción de biodiesel a partir de la palma africana en Colombia.  
<<http://galeon.com/separacionfrutos/pbiodiesel.pdf>> [Consultada: 23 de Septiembre de 2007]
- AGUDELO SANTAMARÍA, John y BENJUMEA HERNÁNDEZ, Pedro. Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano. 1ra Edición. Universidad de Antioquia. Octubre de 2004. pág 1-21. [Consultada: 17 de Octubre de 2007]
- AGUDELO SANTAMARÍA, John y BENJUMEA HERNÁNDEZ, Pedro. Diagnóstico de la combustión de biocombustibles en motores. 1ra Edición. Colciencias. Marzo de 2007. pág 65-75. [Consultada: 25 de Enero de 2008]