

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE CRUDO DE PALMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio experimental llevado a cabo con el objetivo de optimizar la obtención de biodiesel mediante la metanólisis básica del aceite crudo de palma Colombiano. Las variables analizadas fueron la relación molar metanol/aceite (RMA) y la cantidad de catalizador utilizada (CC). Utilizando NaOH como catalizador, se realizó un diseño factorial de experimentos 3^2 con dos réplicas para cada fase del aceite: oleína, estearina y aceite crudo. Las condiciones óptimas para lograr la máxima conversión de la reacción se obtuvieron cuando se usó como materia prima el aceite crudo, una RMA de 12 y una CC de 0.6%. El biodiesel obtenido cumple con la mayoría de especificaciones técnicas estipuladas en las normas internacionales para combustibles diesel.

PALABRAS CLAVES: Biodiesel, Transesterificación, Aceite de Palma.

ABSTRACT

In this paper, an experimental study focussed on the optimization of biodiesel production by transesterification of Colombian crude palm oil was carried out. The main variables taken into account were the molar ratio of methanol to vegetable oil (RMA) and the quantity of catalyst (CC). Using NaOH as a catalyst, a factorial experimental design 3^2 with two replies was conducted for each oil phase: olein, stearin and crude oil. The optimum conditions for achieving a maximum reaction yield were a RMA of 12 and a CC of 0.6%, using crude oil as a raw material. A good quality of biodiesel was obtained. The biofuel complies with the majority of technical specifications for diesel fuels established by international standard s.

KEY WORDS: Biodiesel, Transesterification, Palm Oil.

1. INTRODUCCIÓN

El término biodiesel se utiliza hoy en día para describir un combustible compuesto por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas animales, y que se emplea en motores de ignición por compresión o motores Diesel [1].

En general, una reacción de transesterificación consiste en la transformación de un tipo de éster en otro. Cuando el éster original reacciona con un alcohol, la reacción de transesterificación se denomina alcoholólisis [2]. En el caso de la alcoholólisis de un aceite o grasa, las moléculas de triglicérido se combinan con un alcohol alifático de bajo peso molecular en presencia de un catalizador. Los productos de la reacción química son alquilésteres de los ácidos grasos del aceite o grasa y glicerol. Los alquilésteres una vez purificados mediante procesos de lavado y secado constituyen el biodiesel. El glicerol se puede beneficiar para obtener glicerina de alta pureza.

Las principales variables que influyen en el rendimiento, conversión y cinética de la reacción de transesterificación son la calidad de la materia prima, el tipo y cantidad de catalizador, el tipo de alcohol, la

relación molar alcohol/aceite y las condiciones de reacción como temperatura, presión y agitación [3-5].

Con respecto al estado actual de la tecnología para la producción de biodiesel, se puede decir que se trata de una tecnología probada, relativamente madura, en período de diseminación, capaz de aprovechar diversas materias primas y que ha alcanzado nivel comercial en varios países. La mayor parte del biodiesel producido en la actualidad se elabora mediante metanólisis en medio básico [6].

El reto para cualquier país o región consiste en la implementación de procesos basados en materias primas autóctonas, los cuales se deben optimizar para obtener un biodiesel con un costo de producción bajo que lo haga competitivo, pero que cumpla con las especificaciones internacionales de calidad para su uso como combustible en motores diesel.

Para Colombia, la materia prima con mayor potencial con miras a implementar un programa de biodiesel, lo constituye el aceite de palma. El país tiene un enorme potencial de siembra de Palma Africana y en la actualidad de este cultivo se obtiene aproximadamente el 87% de la producción nacional de aceites y grasas [7].

PEDRO N. BENJUMEA H.

Ingeniero de petróleos, MSc
Profesor asistente
Universidad Nacional de Colombia
sede Medellín
Instituto de Energía
pbenjume@unalmed.edu.co

JOHN R. AGUDELO S.

Ingeniero Mecánico, PhD
Profesor asistente
Universidad de Antioquia
Grupo GASURE
jragude@udea.edu.co

GABRIEL JAIME CANO

Ingeniero Químico
Universidad Nacional de Colombia
sede Medellín
gjcano@unalmed.edu.co

En este artículo se presenta un estudio experimental a escala de laboratorio, orientado a la optimización de la producción de biodiesel a partir de la metanólisis básica del aceite crudo de palma Colombiano.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1 Materias primas

El aceite crudo de palma, ACP, fue comprado a la empresa Gravetal S.A. Como consecuencia de su naturaleza química, El ACP a temperatura ambiente puede experimentar, de forma natural, una separación en dos fases denominadas oleína y estearina. La composición química del aceite crudo y sus fases, expresada como contenido de metilésteres de ácidos grasos, fue determinada mediante su derivatización con tetrametil amonio hidróxido al 30% en metanol. La cuantificación de los metilésteres fue realizada mediante la técnica del patrón externo usando un cromatógrafo Varian 3800 GC equipado con un detector de Ionización de llama y una columna DB-WAX de silica fundida con una fase estacionaria de polietilenglicol. La acidez del ACP y sus fases se determinó mediante titulación ácido-base, mediante un procedimiento utilizado por Cenipalma, en el cual se expresa la acidez del aceite como porcentaje en peso de ácido palmítico [8]. El peso molecular del ACP se determinó en forma indirecta a partir del Número de Saponificación [9]. En la tabla 1 se presentan las principales propiedades del ACP.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Acidez	3.8	% por peso
Número de Saponificación	194.5	mg KOH por g aceite
Número de Yodo	57.5	g Yodo por 100 g aceite
Humedad Karl Fisher	0.27	% por peso
Viscosidad Cinemática ASTM D-445	42.5	mm ² /s
Punto de Fusión AOCS	38	°C

Tabla 1. Propiedades del Aceite Crudo de Palma

El metanol y los hidróxidos de sodio y potasio utilizados como catalizadores fueron facilitados por Interquim S.A. Se utilizó un metanol con un 99.93% de pureza.

2.2 Montaje experimental

La figura 2 ilustra el montaje experimental implementado para llevar a cabo la reacción de transesterificación del ACP. Se utilizó un reactor discontinuo de acero inoxidable, forma cilíndrica, fondo cóncavo y una capacidad instalada de 3 litros. En la tapa del reactor se dispone de tres bocas con las siguientes funciones; acople del agitador, colocación del condensador y toma de muestras. La función del agitador es facilitar el mezclado de los reactivos. Lo

ideal es que el flujo de fluidos tenga lugar en régimen turbulento para que las condiciones se aproximen a mezcla perfecta. Adicionalmente, se requiere de un condensador para evitar los escapes de alcohol por evaporación.

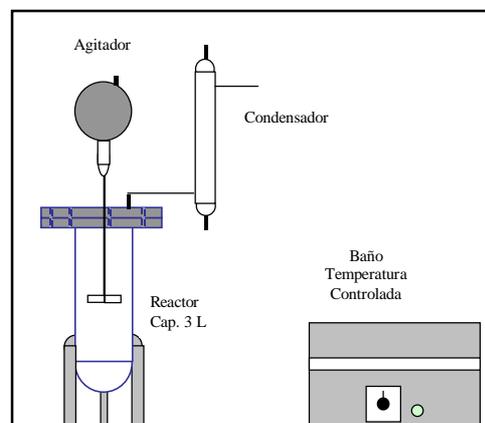


Figura 1. Montaje Experimental Reacción de Transesterificación

El lavado del biodiesel se realizó adicionándole una cantidad de agua equivalente a un 30% en volumen y promoviendo el contacto entre los fluidos mediante burbujeo con aire. Para el secado se utilizó un erlenmeyer sumergido en un baño de agua colocado en una plancha con agitación magnética. El desprendimiento lateral del erlenmeyer se conectó a una línea de vacío para facilitar la evaporación del agua [10].

2.3 Planificación de los experimentos

La experimentación de laboratorio se planificó de acuerdo con las técnicas del diseño factorial de experimentos. Entre los diferentes tipos de diseños se seleccionaron los denominados factoriales puros o completos, en los cuales se consideran todas las posibles combinaciones entre los niveles de los factores.

2.3.1 Selección de Variables o Factores

El objetivo de este estudio experimental es la optimización de la metanólisis básica del aceite de palma Colombiano. A continuación se identifican las variables que fueron bloqueadas y aquellas cuyo efecto individual y combinado se quiere analizar.

Las condiciones de reacción fueron tomadas constantes para todos los experimentos. La temperatura de reacción se fijó en un valor de 60°C, valor por debajo del punto de ebullición del metanol a la presión atmosférica media del Valle de Aburrá. Además a dicha temperatura el ACP se comporta como una fase homogénea. Todos los experimentos se realizaron a presión atmosférica. El tiempo de reacción se fijó en 90 minutos, de acuerdo con lo afirmado por varios

investigadores, quienes sostienen, que la en metanólisis básica del aceite de palma refinado, el avance de la reacción es prácticamente nulo para tiempos mayores al mencionado. La velocidad de agitación se mantuvo en 120 rpm [11-12].

En cuanto a la variable calidad de la materia prima, se desea analizar el efecto de usar las fases oleina y estearina y la mezcla natural de ellas constituida por el aceite crudo.

El metanol es el alcohol preferido en la producción de biodiesel por razones técnicas y económicas [13]. Una vez fijado el tipo de alcohol, la variable de interés es la cantidad de este reactivo a utilizar, la cual se expresa como relación molar metanol/aceite, RMA. Tal relación indica el exceso de alcohol a utilizar en la reacción. Para las condiciones estequiométricas, cero exceso de alcohol, el valor de dicha variable es tres.

Para este estudio experimental se seleccionó como catalizador principal el hidróxido de sodio, NaOH, por ser el más económico y el más utilizado a nivel industrial. Sin embargo, también se llevaron a cabo experimentos adicionales con hidróxido de potasio, KOH. Teniendo fijo el tipo de catalizador, la variable de análisis más relevante es la cantidad utilizada de éste, CC. Tal cantidad se expresa comúnmente como porcentaje por peso con respecto a la masa de aceite utilizada. Cuando se usa una materia prima con alto contenido de ácidos grasos libres, AGLs, como es el caso del aceite crudo de palma, en el cálculo de la CC que efectivamente se debe utilizar, se debe tener en cuenta la cantidad adicional de base fuerte que se puede consumir en la neutralización de los AGLs.

Como variable respuesta, útil como criterio de optimización de la reacción de metanólisis, se seleccionó la conversión lograda, la cual se puede expresar como la relación entre las moles de alquilésteres obtenidas y las moles de triglicéridos originales. Si se tiene en cuenta el proceso completo de obtención de biodiesel, el criterio de optimización más adecuado sería el rendimiento final de metilésteres, el cual se puede expresar como la relación entre la masa de biodiesel purificado obtenida y la masa de aceite original.

2.3.2 Experimentos con Hidróxido de Sodio

Para el estudio experimental con NaOH se seleccionó un diseño factorial 3^2 , o sea, un diseño de dos factores y tres niveles. El número de experimentos correspondientes al diseño indicado es de 9 por cada fase de aceite (oleina, estearina y aceite crudo) y al tener en cuenta que se realizaron dos réplicas se tendrá un número total de experimentos igual a 81.

Los valores para los niveles de los factores en estudio, CC y RMA, fueron inicialmente seleccionados de acuerdo con las referencias bibliográficas más

significativas [4,5,10,11,12]. Con dichos valores se procedió a realizar una serie de preensayos con el fin de constatar la viabilidad de la reacción bajo tales condiciones. En varios de los preensayos se presentó la aparición de una masa con apariencia semisólida y gelatinosa que impedía la separación de las fases metilésteres y glicerol. En la tabla 2 se presentan los valores de los niveles de los factores definitivamente recomendados para el diseño de experimentos.

FACTOR	NIVEL INFERIOR	NIVEL MEDIO	NIVEL SUPERIOR
CC (% por peso)	0.2	0.4	0.6
RMA (mole/mole)	10	12	14

Tabla 2 Diseño de Experimentos con NaOH para cada Fase de Aceite

2.3.2 Experimentos con Hidróxido de Potasio

Con el KOH se decidió hacer un estudio restringido al aceite crudo. En este caso, también se seleccionó un diseño factorial 3^2 , pero con una sola réplica, para un total de 18 experimentos. La tabla 3 muestra los valores seleccionados para los niveles de los factores en estudio.

FACTOR	NIVEL INFERIOR	NIVEL MEDIO	NIVEL SUPERIOR
CC (% por peso)	0.9	1.0	1.1
RMA (mole/mole)	5	6	7

Tabla 3 Diseño de Experimentos con KOH para el ACP.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Experimentos con NaOH

En la tabla 4 se presenta un resumen del análisis estadístico de los resultados del diseño de experimentos para cada fase de aceite. En cada caso se hicieron tres tipos de análisis: varianza, medias y superficie de respuesta, utilizando el software *statgraphics 4.0*.

Las herramientas estadísticas permiten definir que el punto óptimo corresponde a la fase aceite crudo con unos valores de CC y RMA aproximadamente iguales a 0.6% y a 12 mole/mole, respectivamente. Para dichos valores se obtiene una conversión del 98.38%. Si se utilizará un valor de CC=0.2% en vez de 0.6%, de acuerdo con el análisis de varianza, el valor de la variable respuesta se debería afectar apreciablemente, pues la cantidad de catalizador es un factor estadísticamente significativo. En efecto para la combinación de variables CC=0.2% - RMA=12, la conversión experimental en promedio es del 97.74%. De acuerdo con lo expuesto, al disminuir la CC de 0.6% a 0.2% se tendría una pérdida de conversión de un 0.64%, la cual puede ser estadísticamente significativa, pero de poca relevancia en la práctica.

Para el punto óptimo obtenido se efectuó un análisis del rendimiento del proceso de obtención, incluyendo

el lavado y secado del biodiesel, obteniéndose un valor promedio de 86.6%.

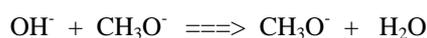
TIPO DE ANÁLISIS	FASE		
	ESTEARINA	ACEITE CRUDO	OLEINA
ANÁLISIS DE VARIANZA	No existen factores, ni interacciones que sean estadísticamente significantes.	El factor cantidad de catalizador presenta significancia.	La interacción entre los factores CC y RMA es significativa.
ANÁLISIS DE MEDIAS	La media más alta se presenta para los factores CC=0.2 y RMA=12	La media más alta se presenta para el valor de CC=0.6	La media más alta se presenta para la interacción CC-RMA (0.2-14).
PUNTO ÓPTIMO (superficie de respuesta)	CC = 0.2 RMA = 11.92 Conversión = 98.0	CC = 0.548 RMA = 11.496 Conversión = 98.38	CC = 0.2 RMA = 14.0 Conversión = 98.0889

Tabla 4. Resumen Análisis Estadístico Diseño con NaOH

3.2 Experimentos con KOH

Para los experimentos realizados con ACP utilizando KOH como catalizador se encontró un punto óptimo correspondiente a una CC=1.1% y una RMA=7. Para tal combinación de variables el valor predicho de conversión es del 87.6%, valor muy bajo comparado con los obtenidos para las diferentes fases con NaOH. El análisis estadístico indica que para obtener niveles de conversión similares con los dos tipos de catalizadores básicos utilizados en este estudio, se requiere usar mayores cantidades de KOH. Lo anterior se puede explicar con base en las diferencias en el peso molecular de tales catalizadores, cuyos valores son 39.0983 y 22.9897 para el KOH y el NaOH, respectivamente. Consecuentemente, para aportar el mismo número de moles o equivalentes gramo de catalizador a la reacción se requiere utilizar más masa de KOH.

En teoría, el desarrollo de la reacción de metanolisis debería ser independiente del tipo de base fuerte utilizada, siempre y cuando se agreguen los mismos equivalentes gramo de catalizador. De acuerdo con Eckey [12], la metanolisis básica inicia con un ataque del ión metóxido (CH_3O^-) al átomo de carbono carbonilo de la molécula de triglicérido. Cuando se usan bases fuertes que disocian el ión hidroxilo (OH^-), el grupo metóxido se forma por disolución del catalizador en metanol, mediante la siguiente reacción:



De acuerdo con lo expuesto arriba se puede explicar el bajo nivel de conversión obtenido en los experimentos con hidróxido de potasio. Pues una cantidad de KOH de 1.1% equivale a una cantidad de NaOH de 0.65% y dadas las bajas relaciones molares metanol/aceite utilizadas con el KOH es de esperar una caída en la conversión de la reacción con respecto a las obtenidas en el diseño con NaOH.

3.3 Calidad del biodiesel obtenido

Al biodiesel obtenido de acuerdo con el punto óptimo encontrado para la metanolisis con NaOH (fase: aceite crudo, CC=0.6% y RMA=12), se le realizó una caracterización como combustible en el laboratorio de Crudos y Derivados de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. En la tabla 5 se presentan los valores de las principales propiedades del biodiesel de ACP, comparándolos con las especificaciones ASTM para el combustible Diesel corriente y con las norma ASTM para el biodiesel.

Los datos de destilación indican que el intervalo de ebullición es mucho más reducido para el biodiesel que para el diesel corriente. Tal comportamiento refleja el hecho de que los metilésteres producidos a partir de los diferentes ácidos grasos presentes en los triglicéridos no son muy diferentes unos de otros, en oposición a la amplia variedad de hidrocarburos presentes en el diesel de origen fósil (hidrocarburos alcanos normales y ramificados, cicloalcanos y aromáticos simples y condensados), los cuales pueden poseer volatilidades muy diferentes. En lo referente a las especificaciones contempladas en la norma para diesel corriente, se puede observar que el biodiesel en general, cumple con el valor de temperatura exigido para el 90% de destilado y con el del punto final de ebullición. Caso contrario se presenta con el valor de temperatura exigido para el 50% de destilado.

El alto valor de la temperatura del punto inicial de ebullición es un indicativo de que el biodiesel obtenido posee una pureza aceptable, al no contener cantidades apreciables de metanol ni de agua. Adicionalmente, la obtención de un punto final de ebullición a presión atmosférica es un indicativo de la ausencia en el biodiesel de moléculas de gran tamaño como los mono, di y triglicéridos.

PROPIEDAD	UNIDAD	NORMA	VALOR	NORMA DIESEL CORRIENTE ASTM D 975	NORMA BIODIESEL ASTM D 6571
DENSIDAD a 15°C	Kg/m ³	ASTM D 4052	872.9	Reportar	Reportar
DESTILACIÓN					
<i>Punto inicial de ebullición</i>	°C	ASTM D 86	306.9	-	-
50% recobrado			329.3	Máximo 300	-
90% recobrado			337.4	Máximo 360	Máximo 360
<i>Punto Final de ebullición</i>			351.6	Máximo 390	
ÍNDICE DE CETANO	---	ASTM D 976	56.0	-	-
ÍNDICE DE YODO	---		55.4	-	-
PUNTO DE INFLAMACIÓN (PENSKY – MARTENS)	°C	ASTM D 93	162.3	Mínimo 52	Mínimo 130
PODER CALORÍFICO	BTU/lb	ASTM D 240	17279.0	-	-
PODER CALORÍFICO POR VOLUMEN	MJ/m ³		35.1	-	-
CONTENIDO DE AZUFRE	ppmm	ASTM D 129/4294	0.0	Máximo 4500	Máximo 500
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 40°C	cSt	ASTM D 445	5.4	1.3 – 4.1	1.9 – 6.0
CORROSIÓN LÁMINA DE COBRE 3 horas a 100°C		ASTM D 130	1 ^a	Máximo No.3	Máximo No.3
CONTENIDO DE CENIZAS	% p/p	ASTM D 482	Trazas	Máximo 0.01	-
CONTENIDO DE AGUA	% V/V	ASTM D 2709	0.027	Máximo 0.05	Máximo 0.05
PUNTO DE NUBE	°C	ASTM D 94	18	-	Reportar

Tabla 5 Principales Propiedades del Biodiesel de Aceite Crudo de Palma

Aunque las normativas para diesel corriente y para el biodiesel no especifican valores a cumplir para el poder calorífico, el resultado de esta propiedad para el biodiesel de ACP, indica una diferencia apreciable respecto a los valores típicos del diesel corriente colombiano (entre 18500 y 19000 BTU/lbm), y una similitud con los valores típicos para diferentes tipos de biodiesel reportados por la literatura (aproximadamente 17000 BTU/lbm) [15]. La diferencia indicada en el poder calorífico, expresado en unidades de energía por unidad de masa, se suaviza un poco cuando se expresa en unidades de energía por unidad de volumen, dada la mayor densidad del biodiesel.

El alto índice de cetano del biodiesel de ACP es un indicativo de la excelente calidad de ignición reportada ampliamente para este tipo de biocombustible.

La propiedad más desfavorable para el biodiesel de ACP es su alto punto de nube alrededor de 18°C. El punto de nube es la temperatura a la cual se empiezan a formar cristales. Tal propiedad está asociada directamente con la naturaleza química de los ácidos grasos esterificados, que en el caso del aceite de palma y de sus metilésteres derivados son en gran proporción saturados. Las deficientes propiedades de flujo en frío del biodiesel de ACP limitan su utilización como combustible puro en

lugares sometidos a bajas temperaturas. Una opción práctica es no usarlo puro, sino mezclado con el diesel convencional en proporciones adecuadas, de modo que la mezcla cumpla con la especificación de punto de nube [16].

Otra posibilidad es utilizar aditivos depresores de punto de fluidez comúnmente utilizados en la industria del petróleo para aceites lubricantes y combustibles diesel con alto contenido de hidrocarburos saturados [17].

Una opción más radical sería tratar de fraccionar el biodiesel utilizando un proceso similar a la winterización de aceites crudos.

4. CONCLUSIONES

Con base en un diseño factorial de experimentos 3² con dos réplicas, utilizando hidróxido de sodio como catalizador, se puede concluir que la máxima conversión de la reacción de metanólisis básica se alcanza cuando se usa aceite crudo de palma, una relación molar metanol/aceite de 12 y un porcentaje de catalizador de 0.6%. bajo esas condiciones se obtiene un valor de conversión de 98.38%. Sin embargo, si se reduce la cantidad de catalizador hasta un 0.2% la conversión solo se disminuye en un 0.64%.

Es posible obtener niveles altos de conversión de la reacción de metanólisis básica del ACP con una acidez

relativamente alta, siempre y cuando se agregue una cantidad adicional de catalizador que garantice la neutralización de los ácidos grasos libres. De otra parte, el rendimiento de la reacción si se ve significativamente afectado por la acidez, pues se presenta la reacción secundaria de neutralización que conduce a la formación de jabones, los cuales en la etapa de purificación forman una interfase entre los metilésteres y el agua de lavado.

La mejor opción para el desarrollo de una industria de biodiesel en Colombia es utilizar como materia prima básica el aceite crudo de palma sin separación de fases y sin someterlo a procesos previos de reducción de ácidos grasos libres.

La viabilidad económica de un programa de biodiesel implica la valoración de la glicerina y demás subproductos. Lo anterior constituye una oportunidad para el desarrollo de la industria oleoquímica nacional.

El biodiesel de aceite de palma Colombiano cumple con la mayoría de especificaciones técnicas que deben cumplir los combustibles diesel de acuerdo con las normas nacionales e internacionales. La deficiencia de calidad más significativa para el biocombustible en cuestión es su alto punto de nube. Tal propiedad inherente al biodiesel de aceite de palma por su naturaleza química afecta su desempeño como fluido bajo condiciones de climas fríos.

Con esta investigación se ha logrado producir a nivel de laboratorio un biodiesel de muy buenas calidades como combustible diesel dado su excelente valor del índice de cetano. Aunque los costos de producción pueden resultar demasiado altos comparados con los del combustible diesel tradicional, se trata de una situación normal para cualquier fuente de energía alternativa en sus etapas previas de introducción al mercado.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a COLCIENCIAS y a Interquim S.A por su cofinanciación a este proyecto de investigación (proyecto 1115-06-12252).

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] VICENTE, G., *et al.* "Biodiesel: Una Alternativa Real al Gasóleo Mineral" En *Ingeniería Química*, Marzo de 2001. pp 1167-1172.
- [2] SCHUCHARDT, *et al.* "Transesterification of Vegetable Oils: A Review. En *J Braz. Chem. Soc.*, Vol. 9, No. 29. 1998. pp 1999-210.
- [3] BENJUMEA, Pedro N., Agudelo, J.R., Zapata, Paula y Mendoza, Raúl, "Biodiesel: Una revisión del proceso de obtención mediante la transesterificación de aceites vegetales". En *Revista Energética*. No. 29. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. Julio 2003. pp 9-18.
- [4] FREEDMAN *et al.*, "Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils". En *JAOCs*, Vol. 61, No. 10. 1984. pp 1638-1643.
- [5] Ma, F, and Hanna, M. "Biodiesel Production: A Review". En *Bioresource Technology*, No. 70. 1999. pp 1-15.
- [6] LOPEZ, G. "Biodiesel: Una Perspectiva Iberoamericana". Jornadas Iberoamericanas sobre Biocombustibles. Subprograma IV CYTED. 2002.
- [7] AGUDELO, J.R., Benjumea, P., y Corredor, L., "Biodiesel de Aceite de Palma: una Alternativa para el desarrollo del País y para la Autosuficiencia Energética Nacional. En *Revista Facultad de Ingeniería*, No. 28. Universidad de Antioquia. Colombia. Julio 2003. pp 9-18.
- [8] CENIPALMA. "Manual de Laboratorio Plantas de beneficio Primario para Fruto de Palma de Aceite. 1999.
- [9] BADUI, S. "Química de los Alimentos" Editorial Person. México. 1999. pp 213-277.
- [10] ZAPATA, P. y MENDOZA, R. "Obtención de un Biocombustible mediante la Transesterificación del Aceite de Palma con Metanol". Trabajo de Grado (Ingeniero Químico) Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de Minas. 2003. 136p
- [11] DARNOKO, D., and MUNIR, C., "Continuous Production of Palm Methyl Esters". En *JAOCs*, Vol. 77, No. 12. 2000. pp 1269-1272.
- [12] DARNOKO, D. and MUNIR, C., "Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor". En *JAOCs*, Vol. 77, No. 12. 2000. pp 1263-1267.
- [13] NIMCEVIC *et al.*, "Preparation of Rapeseed Oil Esters of Lower Aliphatic Alcohols". En *JAOCs*, 2000. pp 1638-1643.
- [14] ECKEY, E. "Esterification and Interesterification" En *JAOCs*, Vol. 33, 1956. pp 575-579.
- [15] GRABOSKY, M., and McCORMICK, R. "Combustion of Fat and Vegetable Oils Derived Fuels in Diesel Engines". En *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 24. 1998. pp 125-164.
- [16] HUANG, C., and WILSON, D. "Improving the Cold Flow Properties of Biodiesel". 91st AOCs Annual Meeting. 2000.
- [17] Diesel Fuels Technical Review. Chevron Products Company. 1998.