

**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN  
DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA (*Ricinus Communis*) Y  
ACEITE DE PALMA MIL PESOS (*Oenocarpus bataua*)**

**NATALIA PÉREZ MUÑOZ  
JACQUELINE URIBE MORÓN  
Grupo de investigación DDP**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLIN  
2008**

**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN  
DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA (*Ricinus Communis*) Y  
ACEITE DE PALMA MIL PESOS (*Oenocarpus bataua*)**

**NATALIA PÉREZ MUÑOZ  
JACQUELINE URIBE MORÓN**

**Proyecto de Grado para optar al título de  
Ingeniera de Procesos**

**Asesor**

**Diego A. Acosta M., Ph.D**

**Coasesora**

**Paula A. Zapata C., I.P**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLIN  
2008**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

**Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Medellín, octubre de 2008**

A Dios por permitirnos estar presentes en el sitio y el tiempo adecuado.

Al esfuerzo y la dedicación de nuestros padres.

Nuestros asesores por su compromiso y confianza en nosotras y a los amigos por su compañerismo y apoyo.

A hermanas y hermanos por acompañarnos y apoyarnos incondicionalmente toda la vida.

## AGRADECIMIENTOS

Las autoras de este trabajo agradecen a:

El departamento de Investigación y docencia de la Universidad EAFIT a través del proyecto interno de código 45-00037, Biodiesel, glicerina y poligliceroles derivados de la Higuera.

**Diego Acosta**, Ingeniero Químico, Universidad Pontificia Bolivariana. PhD (University of Oklahoma). Coordinador del Grupo de Investigación DDP Desarrollo y Diseño de Procesos (DDP). Oleoquímica y Diseño de Procesos.

**Marcela Mora V**, Ingeniera química, Universidad Industrial de Santander y Magíster de la misma universidad. Coordinadora de la Especialización en Diseño de Procesos Químicos y Biotecnológicos. Diseño y Simulación de Procesos. Jefe de carrera Ingeniería de Procesos Universidad EAFIT.

**Paula Zapata**, Ingeniera de Procesos Universidad EAFIT.

**Paulina Cogollo**, estudiante de Ingeniería de Procesos de la Universidad EAFIT.

Personal del Laboratorio de Ingeniería de Procesos, **Édgar Arbeláez y Jhon Estrada**.

Personal del Laboratorio de Crudos y Derivados de Ingeniería de Petróleo, **Alirio Benavides**.

## CONTENIDO

<b>1. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 ANTECEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES VEGETALES</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL</b> .....	<b>18</b>
2.2.1 Aceite Vegetal .....	18
2.2.2 Alcohol .....	20
2.2.3 Catalizador .....	20
<b>2.3 RUTAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL</b> .....	<b>22</b>
2.3.1 Transesterificación .....	22
2.3.2 Pirólisis:.....	23
2.3.3 Producción en condiciones supercríticas.....	23
<b>2.4 BIODIESEL EN COLOMBIA</b> .....	<b>23</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 MATERIALES</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2 MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
3.2.1 Refinación del aceite: .....	26
3.2.2. Resultados de la refinación de aceites .....	27
3.2.3 Proceso de transesterificación.....	28

<b>3.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....</b>	<b>31</b>
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....</b>	<b>34</b>
4.1.1 Resultado caracterización del Biodiesel de higuera ..... 36	36
4.1.2 Resultados caracterización biodiesel de Palma Milpesos..... 50	50
<b>4.2 MCOMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES OBTENIDAS CON OTROS TRABAJOS REALIZADOS: .....</b>	<b>60</b>
<b>5. MARGEN DE CONTRIBUCIÓN .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1 ANÁLISIS MARGEN DE CONTRIBUCIÓN 2008.....</b>	<b>63</b>
<b>5.2 ANÁLISIS MARGEN DE CONTRIBUCIÓN A 2010 .....</b>	<b>67</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>68</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO. CARACTERIZACIONES DEL BIODIESEL DE HIGUERILLA Y DE PALMA MIL PESOS .....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización Aceite de Higuierilla.....	27
Tabla 2. Caracterización Aceite de Palma Mil pesos .....	28
Tabla 3. Diseño de experimentos .....	32
Tabla 4. Normas de calidad que pide la legislación colombiana para Biodiesel ....	33
Tabla 5. Codificación de los factores y los niveles .....	34
Tabla 6. Signos algebraicos para calcular los efectos del diseño $2^3$ .....	35
Tabla 7. Tabla respuesta del diseño de experimentos para Biodiesel de Higuierilla (BH) .....	36
Tabla 8. Codificación de los factores y los niveles .....	50
Tabla 9. Tabla respuesta del diseño de experimentos para Biodiesel de Palma Mil pesos (BPMP) .....	51
Tabla 10. Comparación de propiedades obtenidas experimentalmente vs. Teórica .....	61
Tabla 11. Comparación de propiedades obtenidas del BPMP .....	62
Tabla 12. Costos de las materias primas para la producción de biodiesel .....	63
Tabla 13. Propiedades de las materias primas .....	64
Tabla 14. Costo y cantidad de materias primas por litro de biodiesel.....	65
Tabla 15. Margen de Contribución para 1 kg de biodiesel .....	66
Tabla 16. Región optimizada para la producción de Biodiesel por transesterificación alcalina.....	69
Tabla 17. Efectos estimados de los factores bajo estudio para la viscosidad del BH.....	77
Tabla 18. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el índice de cetano del BH.....	77
Tabla 19. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de inflamación del BH.....	78

Tabla 20. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de nube del BH.....	80
Tabla 21. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de fluidez del BH .....	80
Tabla 22. Efectos estimados de los factores bajo estudio para la cantidad de agua del BH.....	81
Tabla 23. Efectos estimados de los factores bajo estudio para la viscosidad del BPMP .....	82
Tabla 24. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el índice de cetano del BPMP .....	83
Tabla 25. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de inflamación del BPMP.....	84
Tabla 26. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de nube del BPMP.....	85
Tabla 27. Efectos de los factores bajo estudio para el Punto de fluidez del BPMP .....	86
Tabla 28. Efectos estimados de los factores bajo estudio para la cantidad de agua del BPMP.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reacciones de la transesterificación.....	22
Figura 2. Montaje del reactor a 60 °C .....	28
Figura 3. Montaje del reactor a 25°C .....	29
Figura 4. Separación de fases .....	30
Figura 5. Lavado inicial.....	30
Figura 6. Agua clara después del lavado .....	31
Figura 7. Reacción de transesterificación .....	39
Figura 8. Representación gráfica del diseño de experimentos.....	47
Figura 9. Representación gráfica del diseño de experimentos.....	58

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Costo fiscal del subsidio al precio de la gasolina .....	24
Gráfico 2. Probabilidad normal para los efectos sobre la viscosidad del Biodiesel de Higuierilla .....	37
Gráfico 3. Principales efectos sobre la viscosidad del Biodiesel de Higuierilla.....	38
Gráfico 4. Principales efectos sobre el índice de cetano del Biodiesel de Higuierilla .....	40
Gráfico 5. Principales efectos sobre el índice de cetano del Biodiesel de Higuierilla .....	40
Gráfico 6. Principales efectos sobre el punto de inflamación del Biodiesel de Higuierilla .....	42
Gráfico 7. Principales efectos sobre el punto de nube del Biodiesel de Higuierilla.	43
Gráfico 8. Principales efectos sobre el punto de fluidez del Biodiesel de Higuierilla .....	44
Gráfico 9. Principales efectos sobre la cantidad de agua del Biodiesel de Higuierilla .....	45
Gráfico 10. Curva de destilación para el biodiesel a partir de aceite de higuierilla .	48
Gráfico 11. Comparación curva de destilación Biodiesel de Higuierilla y Valor de referencia .....	49
Gráfico 12. Probabilidad normal para los efectos sobre la viscosidad del BPMP ..	52
Gráfico 13. Principales efectos sobre el índice de cetano del BPMP .....	53
Gráfico 14. Principales efectos sobre el índice de cetano del BPMP .....	53
Gráfico 15. Principales efectos sobre el punto de inflamación del BPMP.....	54
Gráfico 16. Principales efectos sobre el punto de nube del BPMP.....	55
Gráfico 17. Principales efectos sobre el punto de fluidez del BPMP .....	56
Gráfico 18. Principales efectos sobre la cantidad de agua del BPMP .....	57
Gráfico 19. Curva de destilación BPMP .....	59
Gráfico 20. Promedio de la curva de destilación para BPMP .....	60

Gráfico 21. Pareto de los efectos sobre el índice de cetano del BH.....	78
Gráfico 22. Principales efectos sobre el punto de inflamación del Biodiesel de Higuierilla .....	79
Gráfico 23. Pareto de los efectos sobre el punto de inflamación del Biodiesel de Higuierilla .....	79
Gráfico 24. Pareto de los efectos sobre el punto de nube del Biodiesel de Higuierilla .....	80
Gráfico 25. Principales efectos sobre la cantidad de agua para el biodiesel de Higuierilla .....	81
Gráfico 26. Pareto de los efectos sobre la cantidad de agua para el Biodiesel de Higuierilla .....	82
Gráfico 27. Principales efectos sobre la viscosidad del BPMP.....	82
Gráfico 28. Pareto de los efectos sobre la viscosidad del BPMP .....	83
Gráfico 29. Principales efectos de las interacciones sobre el índice de cetano del BPMP .....	83
Gráfico 30. Pareto de los efectos sobre el índice de cetano del BPMP .....	84
Gráfico 31. Principales efectos sobre el punto de inflamación del BPMP.....	85
Gráfica 32. Pareto de los efectos sobre el punto de inflamación del BPMP .....	85

## RESUMEN

Se desarrolla un diseño de experimentos de tres factores y dos niveles con una sola réplica para la producción de Biodiesel a escala de laboratorio a partir de dos fuentes de triglicéridos: Aceite de Higuierilla (*Ricinus Communis*) y aceite de Palma mil pesos (*Oenocarpus bataua*). La producción de Biodiesel se lleva a cabo a partir de la reacción de transesterificación alcalina usando como catalizador hidróxido de sodio con metanol para obtener finalmente el biodiesel y la glicerina como subproducto.

El diseño de experimentos busca obtener condiciones óptimas de operación para la producción de biodiesel que cumpla con la norma ASTM pertinente, usando como variables la Temperatura de reacción, la relación molar alcohol/aceite y la relación másica catalizador/aceite.

Los resultados muestran que el aceite de higuierilla no cumplió con la norma respecto a la viscosidad ni el índice de cetano. Los resultados de alta viscosidad en el biodiesel de higuierilla son consistentes con la literatura. Para el índice de cetano se considera necesario optimizar otras variables de proceso como el secado del aceite, condiciones de agitación y refinación del aceite para aumentar su valor. La palma mil pesos produjo un biodiesel de muy buena calidad que cumple con toda la norma colombiana vigente. A partir de esta fuente no se tienen precedentes de producción de biodiesel con el cual se pueda realizar una comparación, de esta manera se analiza con respecto a los datos obtenidos para aceite de palma africana y se obtienen mejores resultados con *Oenocarpus bataua*.

Finalmente, se realiza el cálculo del margen de contribución como primera etapa para determinar la viabilidad económica de este proyecto.

## ABSTRACT

This project develops a  $2^k$  design of experiments for Biodiesel's production to laboratory scale from two sources of triglycerides: Higuierilla's oil (*Ricinus Communis*) and Palma Mil pesos' oil (*Oenocarpus bataua*).

Biodiesel's production is carried out from the alkaline transesterification reaction using hydroxide of sodium as catalyst with methanol to obtain biodiesel and glycerine as by-product.

The experimental design is developed to obtain the best operation conditions for the production of biodiesel that expires with the ASTM norm, using as variables the Temperature of reaction, the molar relation alcohol/oil and the mass relation catalyst/oil.

The results show that castor oil didn't fulfill the requirements of the norm regarding neither viscosity nor cetane number. High viscosity results of castor oil biodiesel are consistent with the literature. For cetane index it is necessary to optimize other process variables such as biodiesel drying, agitation conditions, and refination of feedstock to increase its value. *Oenocarpus Bataua* oil showed problems with its biodiesel viscosity as well. However, there are no precedents of biodiesel production from this triglyceride source to the best of our knowledge. Comparison with palm oil biodiesel shows that *Oenocarpus Bataua* biodiesel is better.

Finally, a calculation is made of the profit margin as the first stage to find the viability of this project.

## INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles de origen petroquímico ha despertado preocupaciones debido al incremento de la cantidad de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera. Es por esto que se sugiere utilizar otro tipo de combustibles de origen vegetal (Biodiesel), que ayudan a la disminución de la cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Al haber combustión de un producto que se degrada más rápidamente ya que es de origen natural y se demora menos en volver a la tierra, que el liberado por combustibles fósiles que se demoran cientos de siglos en formarse.

No obstante, uno de los más grandes inconvenientes de introducir Biodiesel como fuente de energía es su alto costo, debido al precio de las materias primas, representado mayormente en aceites vegetales. Esta dificultad posiblemente se verá mitigada por políticas ambientales del gobierno de Colombia, en las cuales se estima que el consumo de biodiesel aumentará en los próximos años con el uso de mezclas de biodiesel y diesel.

Este proyecto busca plantear un sistema de producción de biodiesel a partir de dos fuentes de triglicéridos: aceite de Palma mil pesos (*Oenocarpus bataua*) y aceite de Higuera (*Ricinus Communis*) con metanol, mediante el proceso de transesterificación alcalina. La innovación en este proyecto consiste en realizar un diseño de experimentos que tenga en cuenta once pruebas de calidad, que exige la norma ASTM, que determinarán algunas condiciones de operación óptimas a partir de un diseño de experimentos de 2 niveles y 3 variables (Temperatura, Relación molar alcohol/aceite, Relación peso catalizador/ peso aceite) y el uso de una nueva fuente de triglicérido como la palma mil pesos (*Oenocarpus bataua*).

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar condiciones óptimas de proceso para producir biodiesel por transesterificación alcalina de aceite de higuera y aceite de palma mil pesos, con el fin de obtener un combustible que cumpla con los parámetros de la norma ASTM pertinente.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer el procedimiento para producir Biodiesel a escala de laboratorio a partir de un diseño de experimentos.
- Realizar pruebas de laboratorio para caracterizar el biocombustible obtenido con base en la norma ASTM pertinente.
- Contrastar los resultados obtenidos bajo las condiciones de proceso para producir Biodiesel a partir de aceite de higuera y aceite de palma mil pesos.
- Calcular el margen de contribución para el proceso de producción del Biodiesel a partir de aceite de Higuera y aceite de Palma Mil pesos.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 ANTECEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES VEGETALES

En 1853 los científicos E. Duffy y J. Patrick trabajaron en la transesterificación de aceites vegetales. La producción de diesel a partir de aceites vegetales y grasas animales fue investigada antes de la crisis energética de 1870, por el científico Rudolf Diesel (1858–1913). Su idea era encontrar una fuente de energía mucho más eficiente que la máquina de vapor, que sólo convierte entre el 6–10% del calor disponible en trabajo. En 1900, la compañía francesa Otto presentó un prototipo de motor diesel que trabajaba con aceite mineral. Esta máquina también fue probada con un aceite vegetal dando los mismos resultados sin alterar el diseño del motor. (Knothe, 2001)

Las primeras investigaciones sobre el biodiesel son reportadas en la Universidad de Bruselas, quienes patentaron su producción con aceite de palma (Chavanne, 1937). La primera experiencia conocida de utilización de biodiesel en transporte público data de 1938 en un ómnibus de la línea Bruselas-Lovaina en Bélgica. Los aceites vegetales fueron usados como combustibles de emergencia durante la segunda guerra mundial (1939–1945). En esa época, India desarrolló investigaciones con diez clases de aceites vegetales para usarlos como combustibles domésticos. (Knothe, 2001). Las recientes preocupaciones por la preservación del medio ambiente y los compromisos asumidos por muchos países en el Protocolo de Kyoto, han provocado un resurgimiento del interés por este combustible en diferentes partes del planeta.

## **2.2 MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL**

Para la producción de Biodiesel se requiere, además del Aceite vegetal un alcohol y un catalizador para convertir los aceites y grasas en ésteres alquílicos. Los alcoholes más usados son el metanol y el etanol, debido a su alta reactividad pero en casos como la transesterificación enzimática se usa butanol. En cuanto a los catalizadores se encuentran los ácidos y los básicos, en la transesterificación alcalina, los catalizadores usados son hidróxido ó metóxido de sodio o potasio y catalizadores enzimáticos o heterogéneos.

### **2.2.1 Aceite Vegetal**

Según el Ministerio de Agricultura la canasta de oleaginosas en Colombia la componen principalmente nueve cultivos: Palma, Cocotero, Higuierilla, Aguacate, Jatropha, Colza, Maní, Soya y Girasol. La producción de Biodiesel a partir de estas fuentes agrícolas, garantiza la generación de empleos sin afectar la seguridad alimentaria debido a la gran cantidad de tierras disponibles, 6.5 millones de hectáreas para la producción de biocombustibles. (Arias, 2007).

**2.2.1.1 Aceite de higuierilla.** El aceite de higuierilla está formado por monoglicéridos, cada uno de 18 carbonos hidrolizado y un doble enlace. Esto representa varias ventajas en comparación a otros aceites, como una alta viscosidad, solubilidad parcial en alcohol, estabilidad a altas y bajas temperaturas y una solubilidad parcial en solventes alifáticos derivados del petróleo lo que permite mezclas de diesel y biodiesel. (Nagib, 2007).

Adicional a esto, el aceite de higuierilla contiene aproximadamente un 90% de ácido ricinoleico (Ácido 1,2-hidroxilinoico), convirtiéndolo en un producto con un

número de cetano alto<sup>1</sup>. Además el aceite no es tóxico, es biodegradable y es una fuente de energía renovable. (Gerpen, 2004).

En Colombia se han desarrollado diferentes trabajos para producir Biodiesel a partir de Aceite de Higuierilla: La Universidad Nacional de Colombia a través del grupo de investigación de Combustibles Alternativos en su sede de Medellín, realizó un estudio para la producción de Biodiesel a partir de Aceite de Higuierilla y se hicieron mezclas con el Diesel para determinar su rendimiento. Se encontraron las condiciones que permiten obtener los mayores rendimientos de biodiesel de aceite de higuierilla mediante un diseño de Experimentos de tres variables y tres niveles, sin realizar todas las pruebas de calidad requeridas por la norma así: temperatura ambiente (25 °C), una relación metanol/aceite de 9 y un porcentaje de 0.8% en peso de NaOH. El hecho de que la reacción transcurra a temperatura ambiente es muy ventajoso ya que implica una reducción importante en los costos de producción (Benavides, 2007)

**2.2.1.2 Aceite de Palma mil pesos.** La Palma mil pesos es una planta de la selva tropical, que se encuentra en la Costa Pacífica colombiana, en el Amazonas y a orillas del río Magdalena. Es una especie con muchas alternativas de uso y comercialización entre las palmas americanas, tanto por sus frutos como por su capacidad de crecer en suelos pobres. El aceite extraído por evaporación con solvente posee las siguientes propiedades: Índice de acidez de 0,58, índice de peróxido de 3,7 e índice de yodo de 97,68, estos valores son bajos comparados con otros aceites comerciales. En cuanto a su composición química el aceite es insaturado en un 82%, su mayor componente es el ácido oleico y sus moléculas están unidas en forma trioleína en un 45%. (Ríos, 1997)

---

<sup>1</sup>El Número de Cetano es el resultado numérico de una prueba de motor diseñada para evaluar el retardo a la ignición, (Marrón, 2002)

El aceite de Palma Mil pesos es reconocido por su calidad nutricional y medicinal. Es usado en regiones no interconectadas como combustible aunque su principal uso es como alimento (Ríos, 1997). A nuestro mejor entender no se han realizado investigaciones para utilizar este aceite como materia prima para la producción de Biodiesel.

### **2.2.2 Alcohol**

Para producir Biodiesel se consume alrededor de 10-15% de alcoholes como metanol, etanol y el propanol. Normalmente el alcohol se usa en exceso para aumentar la eficiencia de la reacción, al desplazar el equilibrio de la reacción hacia los productos (Demirbas, 2006)

El metanol es el más usado debido a su bajo costo y bajo peso molecular. Al ser el más corto de todos los alcoholes puede reaccionar rápidamente con triglicéridos y al tener un grupo hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) puede disolver fácilmente catalizadores alcalinos. Este alcohol no posee azeótropo como en el caso del etanol y por lo tanto se puede usar con una alta pureza, disminuyendo la formación de jabones debido a la presencia de agua (Castillo, 2007). La principal desventaja del Metanol es que se obtiene del gas natural que es una fuente no renovable, por lo que el biodiesel obtenido no sería totalmente una fuente renovable (Demirbas, 2006).

### **2.2.3 Catalizador**

**2.2.3.1 Catalizadores ácidos.** Estos catalizadores se usan comúnmente para la esterificación de ácidos grasos libres. Entre los catalizadores más usados están el ácido sulfúrico y el ácido fosfórico. El catalizador ácido es mezclado con el metanol y se adiciona al aceite produciendo Biodiesel. Este proceso se caracteriza por ser lento y costoso al requerir altas cantidades de alcohol de una relación

mayor que 20:1 (alcohol:aceite), aunque se obtienen rendimientos del orden del 99% (Gerpen, 2004).

**2.2.3.2 Catalizadores básicos.** Este tipo de catalizador es el más común para la producción de biodiesel, debido a que la reacción es más rápida, se utilizan temperaturas bajas y se alcanzan rendimientos del orden de 98% (Meher, 2004)

Los hidróxidos de sodio y de potasio, son más baratos pero menos activos que el metóxido de sodio. Sin embargo, son una buena alternativa ya que se pueden obtener rendimientos del orden del 98% si se emplean en una concentración de 0,8 a 2% (Arbelaez, 2007).

Para la transesterificación alcalina, se usan reactivos anhidros, porque el agua favorece la saponificación de los ésteres en medio alcalino, produciendo jabones. Estos jabones, dificultan la separación de la glicerina del biodiesel, debido a la formación de emulsiones y por lo tanto se debe minimizar (Zhang, 2003).

**2.2.3.3 Catalizadores enzimáticos.** El Biodiesel se produce industrialmente por medio de catalizadores químicos usando bases fuertes como catalizadores. Los procesos con bases fuertes tienen varias desventajas como son la dificultad para recuperar la glicerina, remover el catalizador básico de los productos y el tratamiento de los hidróxidos de las aguas residuales. La utilización de lipasas para producir Biodiesel ha solucionado este tipo de inconvenientes, pero el proceso es mucho más caro que usando un catalizador químico, aunque la estabilidad de la enzima hace que sea posible reutilizarla (Tamalampudi, 2007).

**2.2.3.4. Catalizadores heterogéneos.** Actualmente, se ha incrementado el desarrollo de catalizadores heterogéneos para la producción de Biodiesel, debido a que su uso en la reacción de transesterificación simplifica y disminuye costos en el tratamiento posterior de los productos. Además, el uso de catalizadores

heterogéneos no produce jabones pero requiere condiciones extremas de reacción y el tiempo de reacción comparado con el uso de catalizadores básicos es desfavorable (Gemma y Martínez, 2004).

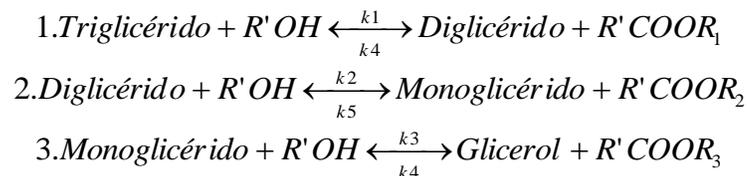
## 2.3 RUTAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

La producción de biodiesel a partir de aceites vegetales se efectúa utilizando diferentes tecnologías, como transesterificación alcalina, transesterificación ácida, cracking catalítico, hidrotratamiento, transesterificación *in situ*, transesterificación enzimática, etc. La más común de todas es la transesterificación alcalina, debido a que es el proceso más económico para transformar largas cadenas de aceites vegetales a moléculas del tipo del diesel tradicional (Gerpen, 2005).

### 2.3.1 Transesterificación

La transesterificación consiste en una serie de reacciones consecutivas reversibles, que transforman triglicéridos paso a paso en diglicéridos, monoglicéridos y finalmente en glicerol, produciendo en cada etapa alquil ésteres que se les conoce como Biodiesel. Ver figura 1: (Gerpen, 2005).

#### Figura 1. Reacciones de la transesterificación



Estas reacciones se aceleran usando catalizadores ácidos o básicos. Los beneficios de trabajar con catalizadores alcalinos es que permiten una mayor conversión, la reacción es mucho más rápida y el glicerol obtenido es de mayor pureza que con catalizadores ácidos (Ma y Hanna, 1999).

### **2.3.2 Pirólisis:**

Este proceso consiste en convertir una sustancia con calor y la adición de un catalizador. Este proceso involucra ausencia de aire u oxígeno que rompe los enlaces químicos para producir pequeñas moléculas. La desventaja de este proceso es que se obtiene un producto que no es uniforme porque se pueden desencadenar reacciones diferentes a la deseada (Ma y Hanna, 1999).

### **2.3.3 Producción en condiciones supercríticas**

Un proceso sencillo de producción de biodiesel ha sido desarrollado por el método de metanol supercrítico no catalítico y comparado con otros procesos catalíticos bajo presión barométrica, el proceso de metanol supercrítico no requiere catalizador, la purificación de los productos es mucho más simple y el tiempo de reacción es más corto, la desventaja en esta ruta de producción es el consumo de energía para generar las altas temperaturas que requiere este proceso (Demirbas, 2007).

## **2.4 BIODIESEL EN COLOMBIA**

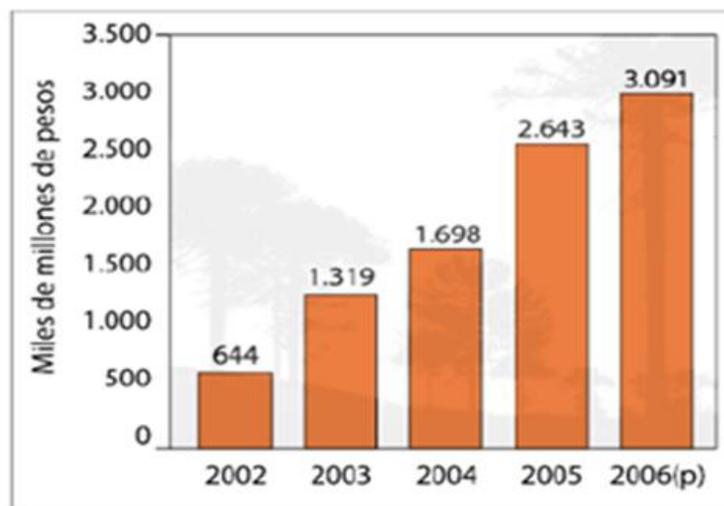
Los estudios para la producción de biodiesel en Colombia han permitido que la legislación del país se interese por proyectos que promuevan la conservación del medio ambiente. Es por esto que la ley 939 de 2004 estimula la producción y

comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en motores diesel. En Colombia la gasolina y el diesel son combustibles que representan casi un 80% del total de los combustibles derivados del petróleo que se consumen anualmente en el país.

El biodiesel es una propuesta que ha ganado aceptación dentro del consumo total debido a varios factores:

- Disminución del consumo de diesel derivado del petróleo y el contrabando de combustibles.
- El desmonte gradual de subsidios al precio de la gasolina que se extenderá hasta junio del 2010, de esa manera el precio del biocombustible será más competitivo en relación al precio real del Diesel (Minminas, 2008).

**Gráfico 1. Costo fiscal del subsidio al precio de la gasolina.**<sup>2</sup>



<sup>2</sup> Fuente: Ministerio de Hacienda y crédito público. Citado por Andrés Felipe Arias Leiva, Ministro de agricultura y desarrollo rural, Santa Marta. Julio 7 de 2007.

- La capacidad de producción de las refinerías colombianas es limitada y se ve obligada a importar combustible diesel para atender la demanda importando actualmente entre 4.000 y 8.000 de barriles diarios de diesel (Contraloría General de la República, Sector Minas y energía, 2005).
- Los incentivos económicos para la producción de Biodiesel: Exención del IVA y de la Sobretasa Global al biocombustible destinado para mezcla con combustibles fósiles (Ley 939 de 2004) y el incentivo de exención de impuesto de renta por cultivos de tardío rendimiento.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 MATERIALES**

El aceite de palma mil pesos fue adquirido de la Fundación ESPAVE, Chocó. El aceite de higuera fue suministrado por INCORP. El metanol anhidro y el Hidróxido de Sodio (NaOH) fueron suministrados por ENKA. La arcilla fue donada por la Dra. Gloria Sierra del departamento de Geología de la Universidad EAFIT, la cal y el ácido fosfórico fueron suministrados por el laboratorio de Ingeniería de procesos de la misma universidad.

#### **3.2 MÉTODOS**

##### **3.2.1 Refinación del aceite:**

Para la obtención del biodiesel fue necesaria la refinación del aceite y así disminuir la cantidad de ácidos grasos libres y poder mejorar la eficiencia de la reacción, por esto se utilizó cal en una relación del 0,1% y 0,2% (Cal/aceite) para el aceite de palma y el aceite de higuera respectivamente. También se realizó un blanqueamiento en una relación de 0,1% (arcilla/aceite) en ambos aceites. Al aceite de palma mil pesos se le retiró su alto contenido de gomas con una solución de ácido Fosfórico ( $H_3PO_4$ ) al 0.2% p/p, en una relación aceite/solvente de 1:1, calentando a baja agitación por 30 minutos a 60 °C.

En el proceso de refinación los factores que se evaluaron para determinar los cambios obtenidos en este proceso fueron el índice de acidez y el índice de

saponificación. El índice de acidez se define como el número de miligramos de KOH que se requieren para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en 1 g. de grasa y el índice de saponificación es el número de miligramos de hidróxido de potasio, requeridos para saponificar 1 g de sustancia grasa. Estos índices son importantes porque pueden interferir con la reacción de transesterificación, un índice de acidez alto disminuye la eficiencia de la reacción y un índice de saponificación alto disminuye la cantidad de jabones obtenidos aumentando la cantidad de biodiesel. Cabe aclarar que estas condiciones de refinación no se tuvieron en cuenta dentro del diseño de experimentos realizado.

### 3.2.2. Resultados de la refinación de aceites

Las muestras obtenidas después del proceso de refinación del aceite se muestran en las tablas 1 y 2.

**Tabla 1. Caracterización Aceite de Higuera**

ANÁLISIS FISICOQUÍMICO	RESULTADO	VALOR DE COMPARACION (Benavides, 2007)	MÉTODO
Índice de acidez	3,05	2,1	USP 29/ Norma técnica Colombiana 218
Índice de saponificación	184,75	187,4	USP 29/ AOAC 920, 160 Ed. 15

**Tabla 2. Caracterización Aceite de Palma Mil pesos**

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	RESULTADO	VALOR DE COMPARACION (Agudelo, 2004)	MÉTODO
Índice de acidez	0,44	Máx. 5	USP 29/Norma técnica Colombiana 218
Índice de saponificación	193,55	195-205	USP 29/ AOAC 920, 160 Ed. 15

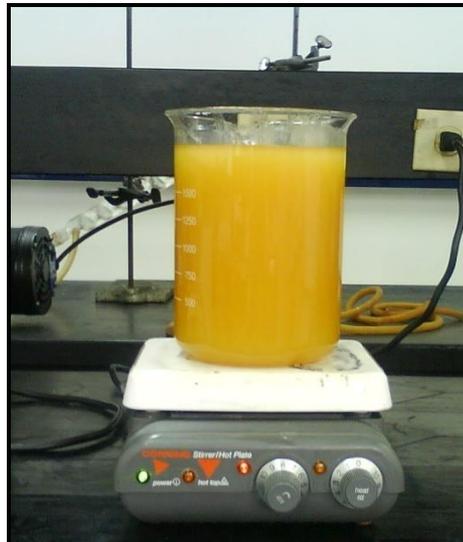
### 3.2.3 Proceso de transesterificación

Para la reacción de transesterificación se utilizó un reactor tipo batch de vidrio con salidas para monitorear la temperatura y un condensador para recircular el metanol. Esta reacción se llevó a cabo con agitación constante. (Fig. 2 y 3)

**Figura 2. Montaje del reactor a 60 °C**



**Figura 3. Montaje del reactor a 25°C**



Inicialmente, se agregó el aceite al reactor para llevarlo a la temperatura deseada, que depende del tratamiento aplicado; simultáneamente se preparó el metóxido de sodio mezclando el hidróxido de sodio con el metanol, teniendo precaución con el aumento de temperatura en esta reacción. Cuando el aceite alcanzaba la temperatura deseada se adicionaba el metóxido y se continuaba agitando por 30 minutos. Esta reacción se llevó a cabo a presión atmosférica.

Posteriormente el producto de la reacción se llevó a un decantador para separar las dos fases: Los metilésteres y la glicerina (Fig. 4). Los metilésteres se sometieron a un proceso de lavado con agua caliente en una relación 1:1 en volumen (Fig. 5) hasta que el agua agregada saliera transparente (Fig. 6), y finalmente el biodiesel fue secado en un horno a 110 °C hasta observar una disminución en el número de burbujas por un tiempo aproximado de 2 horas. Las condiciones de secado del biodiesel no se tuvieron en cuenta para la formulación del diseño de experimentos.

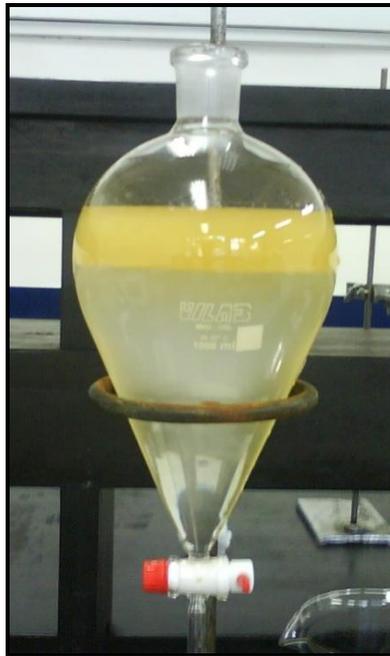
**Figura 4. Separación de fases**



**Figura. 5. Lavado inicial**



**Figura 6. Agua clara después del lavado**



El biodiesel obtenido se caracterizó bajo la norma ASTM 6751 en el Laboratorio de Crudos y Derivados de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

### **3.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

El diseño de experimentos seleccionado es de 2 niveles y 3 variables como se muestra a continuación:

**Tabla 3. Diseño de experimentos**

<b>Experimento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Relación másica Catalizador/Aceite</b>	<b>Relación molar Metanol/aceite</b>
1 <sup>3</sup>	25	0,8	12
2	25	0,8	6
3	25	1,0	12
4	25	1,0	6
5	60	0,8	12
6	60	0,8	6
7	60	1,0	12
8 <sup>4</sup>	60	1,0	6

Para el diseño de experimentos se tuvo en cuenta las normas de calidad que pide la legislación colombiana para Biodiesel presentadas en la tabla 4 (Resolución 182087 del 2007):

---

<sup>3</sup> Los valores de Temperatura, relación másica catalizador/aceite y la relación molar metanol/aceite fueron obtenidos del trabajo de Benavides, 2007

<sup>4</sup> Los valores de Temperatura, relación másica catalizador/aceite y la relación molar metanol/aceite fueron obtenidos del trabajo de Gerpen, 2005.

**Tabla 4. Normas de calidad que pide la legislación colombiana para Biodiesel**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>ESPECIFICACIÓN Vigencia (Febrero 1º de 2007)</b>	<b>MÉTODOS DE ENSAYO</b>
Densidad a 15 °C	Kg/m <sup>3</sup>	860 – 900	ASTM D 4052 ISO 3675
Número de cetano	Cetanos	47 mínimo	ASTM D 613 ISO 5165
Viscosidad (cinemática a 40°C)	mm <sup>2</sup> /s	1,9 – 6,0	ASTM D 445 ISO 3104
Contenido de agua	mg/kg	500 máximo	ASTM E 203 ISO 12937
Punto de inflamación	°C	93 mínimo	ASTM D 93 ; ISO 2719
Corrosión lámina de cobre	Unidad	1	ASTM D 130 ISO 2160
Destilación (PFE)	°C	max 360	ASTM D 86 ISO 3405
Punto de nube/ enturbiamiento	°C	Reportar (4)	ASTM D 2500 ISO 3015
Punto de fluidez	°C	Reportar (4)	ASTM D 97

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para el análisis estadístico se empleó el software STATGRAPHICS Plus 5.1. Las condiciones para este análisis son:

- Factores: Temperatura, Relación molar Alcohol/Aceite y Relación másica Catalizador/Aceite.
- Niveles del factor: Mostradas en la tabla 5

**Tabla 5. Codificación de los factores y los niveles**

Factores		-1	1
Temperatura (°C)	A	25	60
Relación molar Alcohol/Aceite	B	6	12
Relación másica Catalizador/Aceite	C	0.8	1

- Variables respuesta:
  - Y1: Agua por destilación
  - Y2: Gravedad API
  - Y3: Índice de cetano

- Y4: Punto de inflamación
  - Y5: Punto de fluidez
  - Y6: Poder calorífico
  - Y7: Punto de nube
  - Y8: Viscosidad
- Nivel de confianza: 95%

El diseño de experimentos seleccionado es un diseño factorial  $2^3$ , tres factores y dos niveles (Representados con signos “- y +” para los niveles menor y mayor). Esta combinación genera ocho tratamientos que pueden ser representados como un cubo. Este diseño presentado en la tabla 6, tiene siete grados de libertad entre las ocho combinaciones de los tratamientos: tres grados asociados con los principales efectos de A, B y C; y cuatro grados de libertad asociados a la interacción de los efectos AB, AC, BC y ABC. (Montgomery, 2001)

**Tabla 6. Signos algebraicos para calcular los efectos del diseño  $2^3$**

Tratamientos	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	1	-1	-1	-1
3	1	-1	1	-1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1
5	-1	1	1	-1	-1	1	-1
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1
8	-1	-1	-1	1	1	1	-1

El diseño utilizado es de una sola réplica debido a los altos costos de las caracterizaciones del Biodiesel. Trabajar con una sola réplica genera un riesgo de

tener un modelo con ruido. Para mitigar este impacto utilizamos la desviación de los métodos de caracterización del biodiesel y se trabajó con distancias significativas entre los dos niveles de cada factor para eliminar el ruido en la estimación de los efectos de los factores.

Para analizar este tipo de diseños con una sola réplica se utilizó el método de Daniel (1959), donde se sugiere examinar la gráfica de la probabilidad normal para estimar los efectos. Los efectos son insignificantes cuando se distribuyen normalmente y los efectos significativos están por fuera de la línea normal (Montgomery, 2001).

#### 4.1.1 Resultado caracterización del Biodiesel de higuera

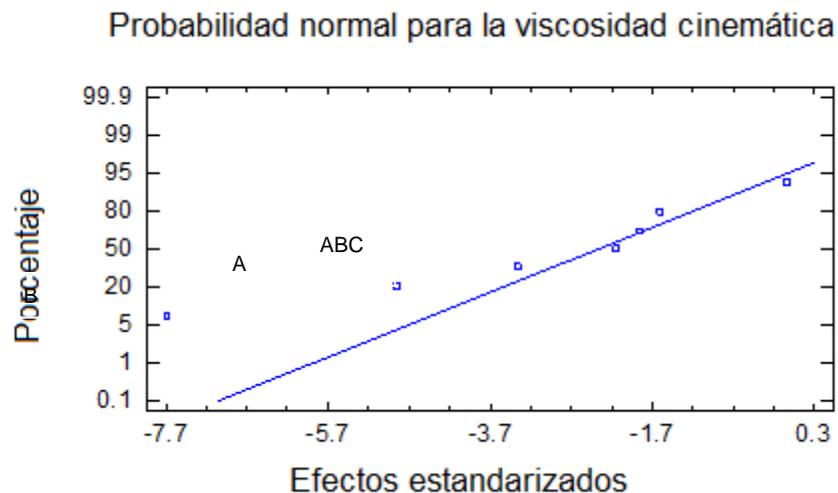
A continuación se presenta la tabla de respuesta del diseño de experimentos para el Biodiesel de higuera, donde se incluye la norma aplicable (los datos señalados con gris son los que cumplen la norma).

**Tabla 7. Tabla respuesta del diseño de experimentos para Biodiesel de Higuera (BH)**

Tratamiento	A	B	C	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8
1	1	1	1	2.4	20.9	35.8	97	-6	15734	2	4.148
2	1	1	-1	0.2	21.2	35.4	69	-27	16052	4	11.3
3	1	-1	1	1	20.7	35.58	76	-21	15928	-1	18.65
4	1	-1	-1	1.2	20.2	32.88	72	-24	15976	8	15.87
5	-1	1	1	0	21.2	35.74	84	-18	16140	15	14.26
6	-1	1	-1	0.6	21.2	36.3	80	-3	16015	3	14.6
7	-1	-1	1	0	20.9	35.33	67.5	-18	16041	8	18.33
8	-1	-1	-1	0	21	35.38	110	-15	16129	7	22.19
Norma Colombiana				0.5	-	47	93	-	-	-	1.9-6.0

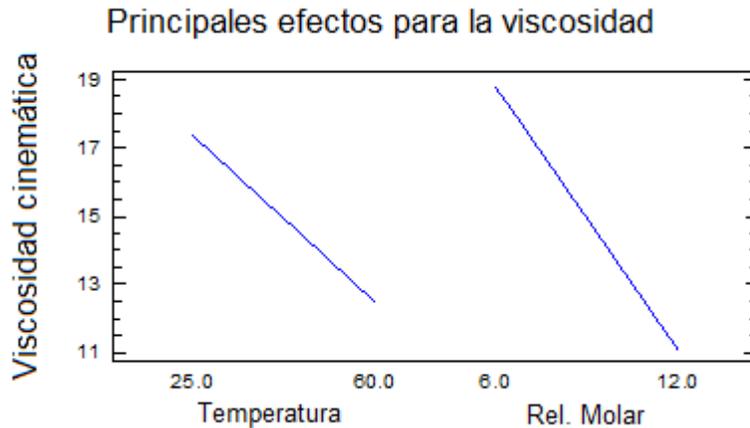
**4.1.1.1 Viscosidad.** La viscosidad es una propiedad que indica la resistencia a fluir de un líquido debido a la fricción interna de una parte del líquido en movimiento sobre otra. Entre mayor sea la viscosidad más serán los problemas causados al motor (Gerpen, 2004). El gráfico 2. Indica los efectos de los tratamientos sobre la viscosidad del biodiesel de higuera siendo importantes la temperatura y la relación molar alcohol aceite (A y B).

**Gráfico 2. Probabilidad normal para los efectos sobre la viscosidad del Biodiesel de Higuera**



En el gráfico 3 se relacionan los factores que afectan la variable de estudio, de esta manera trabajar en la temperatura superior y una mayor relación molar alcohol/aceite se obtiene menor viscosidad que es lo que se busca.

**Gráfico 3. Principales efectos sobre la viscosidad del Biodiesel de Higuierilla**

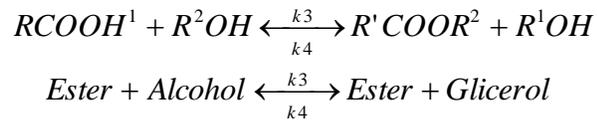


En el gráfico 3 se puede apreciar como el factor B (Relación molar de Alcohol/aceite) tiene mayor efecto sobre la viscosidad del biodiesel. Entre mayor es la relación Alcohol/Aceite la disminución de la viscosidad del biodiesel es mayor, esta propiedad está relacionada con el Principio de Le Châtelier: *si un sistema en equilibrio es perturbado, el sistema evoluciona para contrarrestar dicha perturbación, llegando a un nuevo estado de equilibrio.*

Normalmente el alcohol se usa en exceso para aumentar la eficiencia de la reacción, al desplazar el equilibrio de la reacción hacia los productos (Dermibas, 2006).

Al producir mayor cantidad de biodiesel estamos reduciendo la viscosidad del aceite al disminuir la cantidad de mono, di y triglicéridos que aumentan la viscosidad del biodiesel, como se muestra en la figura 7.

### Figura 7. Reacción de transesterificación



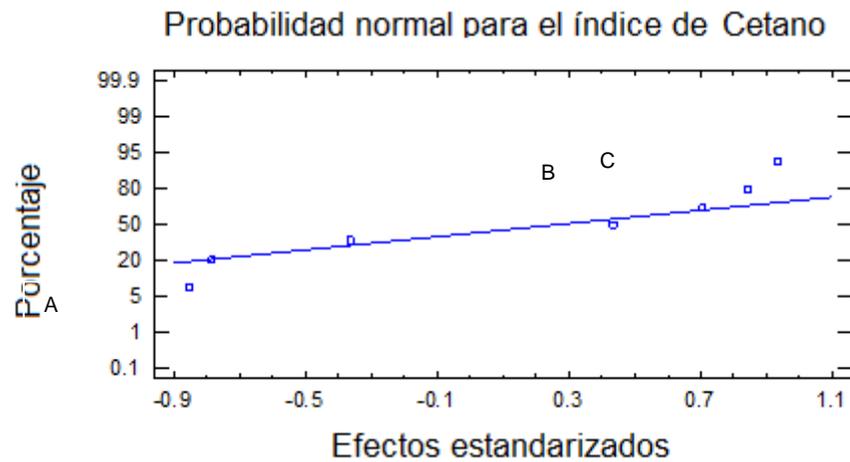
La temperatura también favorece la reacción de transesterificación, al ser una reacción endotérmica, por lo tanto es otro factor significativo para la reducción de la viscosidad del producto final.

La viscosidad del biodiesel obtenido en este trabajo reportó un valor mínimo de 11.3 cSt y un valor promedio de 16.45 cSt. Se retiró la muestra 1/1/1 (60/12/1) debido a que el valor de la viscosidad es atípico con relación al resto de datos.

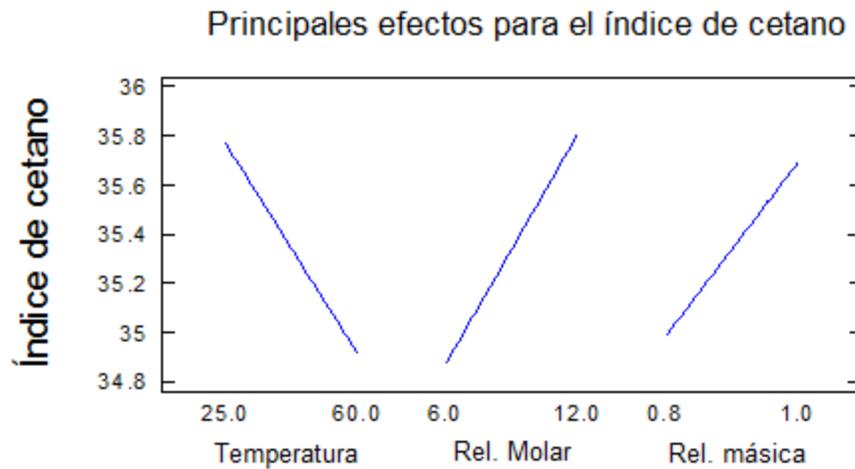
Los datos son consistentes con lo hallado en la literatura donde se observa que el aceite de higuera produce biodiesel de muy alta viscosidad, Esto es debido a la naturaleza del triglicérido del mismo. El biodiesel de higuera posee un alto contenido de metilesteres del ácido ricinoléico, el cual es de carácter insaturado, además, posee un grupo hidroxílico en su estructura que le confiere alta viscosidad (Benavides, 2007).

**4.1.1.2 Índice de cetano.** La calidad de la ignición del combustible está expresada en escala de cetano (análogo a la escala de octano para la gasolina), esta propiedad proporciona la información sobre que tan parecido es el biocombustible con respecto al diesel derivado del petróleo. Un índice de Cetano alto tendrá una ignición corta y con una pequeña cantidad de premezclado haciendo la combustión más eficiente (Gerpen, 2004). En los gráficos 4 y 5 se presentan los principales efectos de esta propiedad en el biodiesel de higuera, siendo importantes a nivel estadístico pero se ha comprobado experimentalmente que estos efectos representan ruido para esta propiedad.

**Gráfico 4. Principales efectos sobre el índice de cetano del Biodiesel de Higuera**



**Gráfico 5. Principales efectos sobre el índice de cetano del Biodiesel de Higuera**

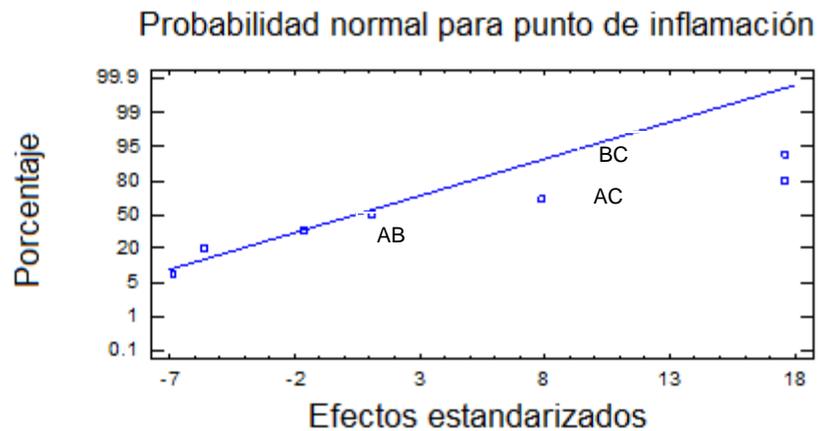


Para esta propiedad el 100% de los resultados incumplen la norma, ninguna prueba reporta un índice de cetano mayor a 47. Esta propiedad está directamente relacionada con la estructura del aceite, entre más saturado esté el aceite tendrá un índice de cetano mayor (Castillo, 2007). En el caso de la higuierilla al tener varios enlaces dobles y grupos hidroxilos, aumenta la viscosidad del aceite disminuyendo el índice de cetano. El valor promedio de los tratamientos fue de 35.30 que es comparable con otros trabajos que reportan un índice de cetano de 38 (Benavides, 2007).

Un índice de cetano bajo indica una baja calidad de ignición del combustible, por lo tanto se recomienda que el biodiesel de higuierilla no sea utilizado al 100% sino que se realicen mezclas de este combustible con diesel (B15 y B5) para aumentar esta propiedad (Benavides, 2007).

**4.1.1.3 Punto de inflamación.** El punto de inflamación está definido como la temperatura a la cual el combustible dará suficiente vapor para producir una mezcla inflamable, estos valores varían entre 52 – 66 °C para diesel y por debajo de -40 °C para gasolina, un mayor punto de inflamación indica menor riesgo de inflamación (Gerpen, 2004). En los gráficos 6 y 7 se presentan los principales efectos de esta propiedad en el biodiesel de higuierilla, donde los significativos son las interacciones BC y AC.

**Gráfico 6. Principales efectos sobre el punto de inflamación del Biodiesel de Higuierilla**

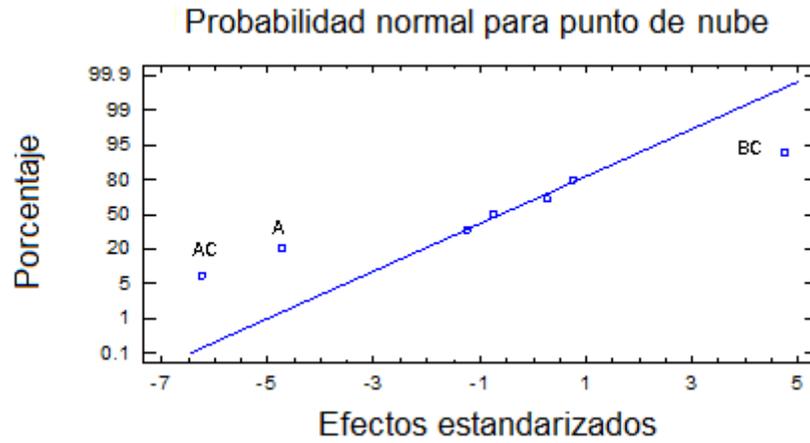


El punto de inflamación está directamente relacionado con la cantidad de metanol en la muestra que se debe eliminar en el proceso de secado de biodiesel (Castillo, 2007).

El comportamiento de los efectos de los factores representando ruido en el análisis estadístico debido a que experimentalmente se observó que se debía mejorar el proceso de secado debido a que las primeras muestras presentaban muy bajos puntos de inflamación, por lo tanto, se procedió a aumentar el tiempo de secado y la temperatura, logrando mejores resultados de esta propiedad.

**4.1.1.4 Punto de Nube.** Es la temperatura a la cual algunas de las cadenas pequeñas de carbono contenidas (cera) en el combustible comienzan a aglomerarse y a precipitarse formando cristales, normalmente esta en el rango normal de operación del diesel (Gerpen, 2004). En los gráficos 7 y 8 se presentan los efectos en el punto de nube con los tratamientos trabajados, de los cuales el más significativo es la temperatura.

**Gráfico 7. Principales efectos sobre el punto de nube del Biodiesel de Higuierilla**

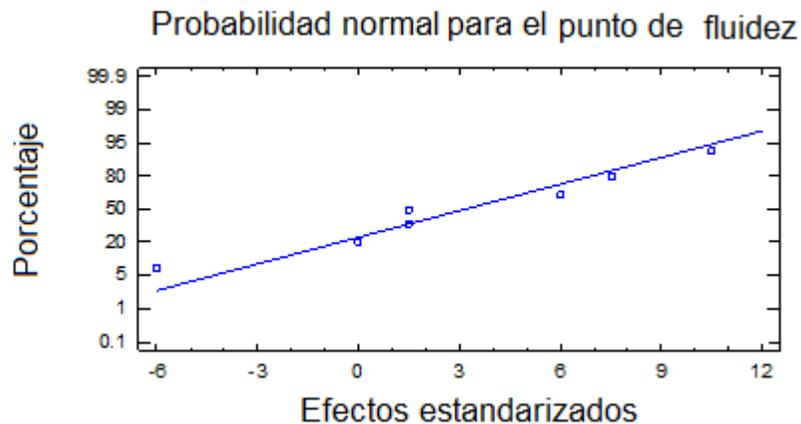


El punto de nube es una propiedad que se ve afectada por la calidad de la refinación del aceite. Una buena refinación del aceite elimina mayor cantidad de compuestos coloreados y material particulado que podría aumentar el punto de nube. En este trabajo se realizó un blanqueamiento del aceite con arcilla que permitió tener muy buenos resultados en esta propiedad. El uso de biodiesel en mezclas con diesel de petróleo también favorece la disminución de esta propiedad, pero se debe tener cuidado con estas prácticas con el fin de no disminuir el poder calorífico y el índice de cetano (Bhale, 2008). El punto de nube también puede disminuir dependiendo del tipo de triglicérido, es por esto que cadenas largas de la fuente oleaginosa produce un punto de nube menor que aquel que tiene triglicéridos de cadenas cortas de carbono, que precipitan a mayores temperaturas, generando así un punto de nube mayor (Gerpen, 2004).

**4.1.1.5 Punto de fluidez.** Es una propiedad extrema del punto de nube pues se trata de la temperatura más baja a la cual el combustible es capaz de ser vaciado del recipiente (Gerpen, 2004). El gráfico 8 presenta los principales efectos del

punto de fluidez para el biodiesel de higuera bajo los tratamientos trabajados, ningún es significativo para esta propiedad.

**Gráfico 8. Principales efectos sobre el punto de fluidez del Biodiesel de Higuera**



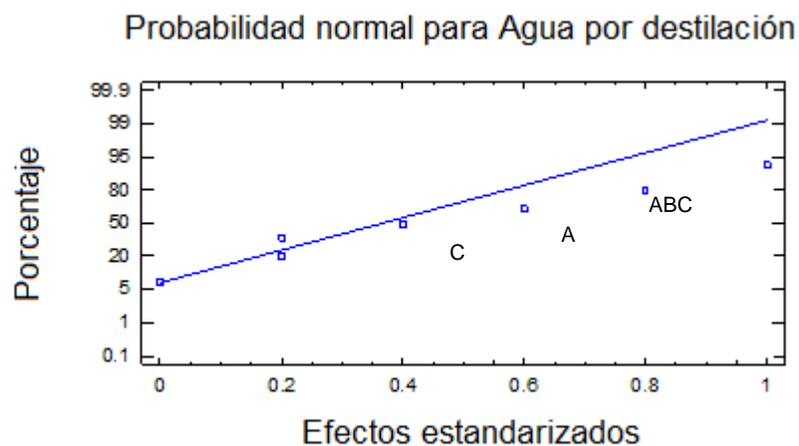
No hay interacciones significativas sobre el punto de fluidez, todos los efectos siguen una distribución normal. El comportamiento de esta propiedad es análogo al punto de nube, por lo tanto dependerá principalmente del proceso de refinación del aceite.

El punto de fluidez es la temperatura a la cual el crecimiento y la posterior aglomeración de los cristales son tales que se impide el libre flujo del combustible cuando el recipiente que lo contiene se coloca en plano horizontal, es por eso que se desea tener un biodiesel con bajo punto de fluidez.

**4.1.1.6 Agua por destilación.** El contenido de agua en el combustible puede afectar la estabilidad del mismo, el agua libre está asociada a la corrosión (Gerpen, 2004).

El gráfico 9 presenta los efectos individuales de los tratamientos y las interacciones entre ellos para la cantidad de agua por destilación en el biodiesel de higuera, donde estadísticamente se observan tres efectos significativos sobre esta propiedad A, C y ABC, sin embargo experimentalmente se encontraron otras causas.

**Gráfico 9. Principales efectos sobre la cantidad de agua del Biodiesel de Higuera**



El agua resultado de este proceso se debe principalmente al lavado del biodiesel y al almacenamiento del mismo. El biodiesel al ser higroscópico puede absorber agua si se pone en contacto con aire húmedo y por lo tanto es recomendable almacenarlo bajo una atmosfera inerte como nitrógeno. El efecto de los factores y de las interacciones son significativos estadísticamente para la cantidad de agua en la muestra, pero experimentalmente se encontró que esta propiedad varía principalmente por la calidad del proceso de secado, este comportamiento de las variables representa ruido en el diseño.

**4.1.1.7 Poder calorífico.** La cantidad de energía no puede ser controlada durante la producción, esta propiedad está dada por el tipo de refinación que se le hace. El poder calorífico se ve incrementado por la presencia de anillos aromáticos en la

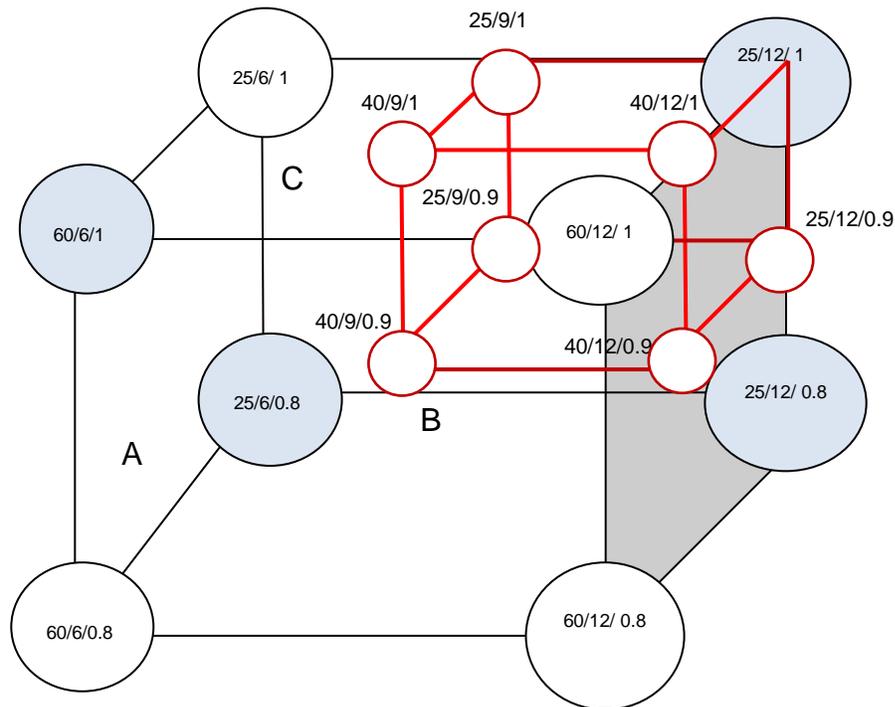
gasolina, sin embargo, el biodiesel aunque no presenta aromáticos contiene metil ésteres con diferentes niveles de saturación. Los ésteres insaturados generan bajo contenido de energía, con respecto a su peso, pero debido a su densidad contienen altas cantidades de energía por unidad de volumen (Gerpen, 2004).

Todas las muestras cumplen con el intervalo de poder calorífico reportado en la literatura (15700 y 16100) Btu/lb (Benjumea, 2006).

**4.1.1.8 Optimización del diseño para BH.** El diseño factorial  $2^3$  está conformado por ocho tratamientos que puede ser representado como un cubo. En este tipo de diseño se asume que la respuesta es aproximadamente lineal a través del rango de cada factor (Montgomery, 2001). Por este motivo es posible predecir el comportamiento de la variable respuesta a lo largo de la región del cubo y formar una región optimizada donde el cumplimiento de la normativa para el Biodiesel sea la principal característica de esta región.

La figura 8 ilustra los resultados del diseño de experimentos. El cuadro rojo indica la región donde se obtiene mejores resultados en las propiedades del biodiesel. Los círculos azules son los puntos donde se obtuvieron los mejores resultados para las propiedades analizadas, a partir de estos puntos se seleccionó la región optimizada.

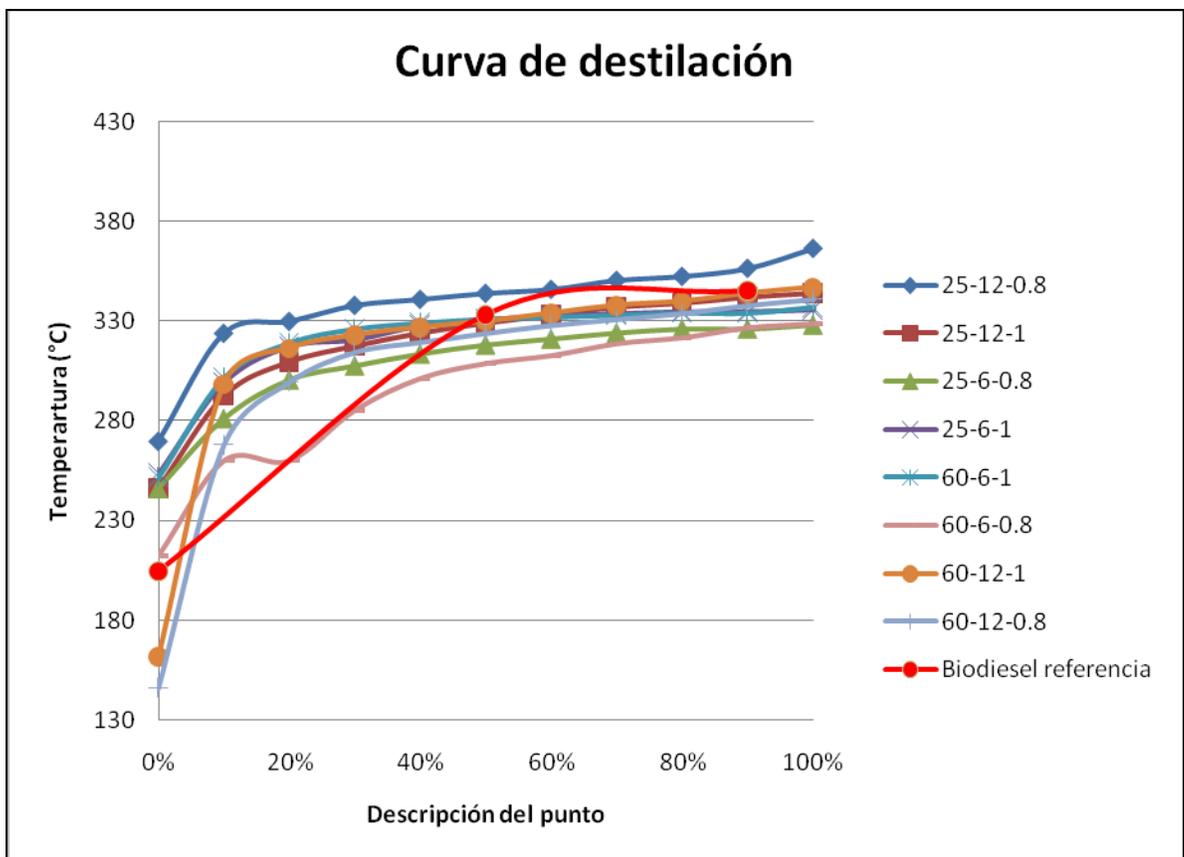
**Figura 8. Representación gráfica del diseño de experimentos**



La región optimizada indica que se debe usar mayor cantidad de catalizador y de metanol para aumentar el rendimiento de la reacción y por lo tanto aumentar las propiedades finales del biodiesel obtenido (como índice de cetano, viscosidad, punto de nube). Además se encontró que el efecto de la temperatura aunque puede modificar las propiedades no es tan significativo como el efecto de la cantidad de alcohol o de catalizador y para disminuir costos operativos se sugiere trabajar a temperaturas mas bajas.

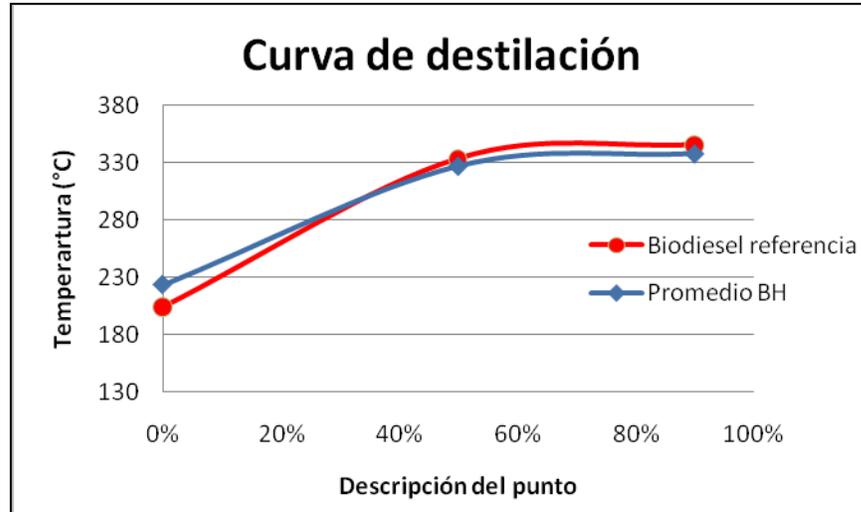
**4.1.1.9 Destilación del Biodiesel de Higuierilla.** La destilación es una prueba cuantitativa que permite determinar en cierto porcentaje la calidad del biodiesel producido. Esta prueba se realizó para cada una de las muestras producidas y los resultados se presentan en el gráfico 10.

**Gráfico 10. Curva de destilación para el biodiesel a partir de aceite de higuierilla**



Se hizo un promedio de todos los tratamientos para comparar con el valor reportado en la literatura y se muestra en el gráfico 11:

**Gráfico 11. Comparación curva de destilación Biodiesel de Higuierilla y Valor de referencia**



Las curvas generadas por la prueba cualitativa de destilación muestran una tendencia similar a la de referencia (Benavides, 2007), un punto de ebullición inicial al de referencia es generado por el tratamiento 60-6-0.8. En un 50% de destilación los tratamientos arrojan temperaturas de  $333 \pm 2$  °C y en un 90% de destilado la desviación de todos los tratamientos tiende a disminuir. Los valores de punto inicial de ebullición que se encuentran por debajo de la referencia, podría deberse al contenido de agua y sedimentos en el biodiesel.

Los valores de temperatura son inferiores a los reportados normalmente por el diesel de petróleo, esto indica que los metilésteres producidos que componen el biodiesel no son muy diferentes entre sí, a diferencia del diesel, que contiene muchas variedades de hidrocarburos lo que amplía su rango de ebullición (Benjumea, 2004).

#### 4.1.2 Resultados caracterización biodiesel de Palma Milpesos

Para el análisis estadístico se empleó el software STATGRAPHICS Plus 5.1. Las condiciones para este análisis:

- Factores: Temperatura, Concentración molar Alcohol/Aceite y Concentración másica Catalizador/Aceite.
- Niveles del factor: En la tabla 8 se muestran la codificación de los factores

**Tabla 8. Codificación de los factores y los niveles**

Factores		-1	1
Temperatura	A	25	60
Concentración molar Alcohol/Aceite	B	6	12
Concentración másica Catalizador/Aceite	C	0.8	1

- Variables respuesta:
  - Y1: Agua por destilación
  - Y2: Gravedad API
  - Y3: Índice de cetano
  - Y4: Punto de inflamación
  - Y5: Punto de fluidez

- Y6: Poder calorífico
- Y7: Punto de nube
- Y8: Viscosidad
- Nivel de confianza: 95%

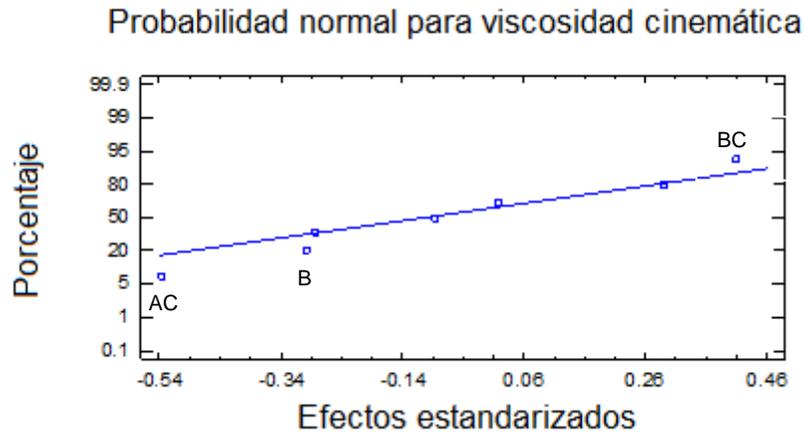
En la tabla 9 los resultados del diseño de experimentos para el Biodiesel de Aceite de Palma Mil pesos (BPMP), donde se incluye la norma aplicable (los datos señalados con rojo son los que cumplen la norma).

**Tabla 9. Tabla respuesta del diseño de experimentos para Biodiesel de Palma Mil pesos (BPMP)**

Tratamiento	A	B	C	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8
1	1	1	1	0.4	33.1	52.84	53	-12	16659	5	4.532
2	1	1	-1	0	29.8	47.71	88	-3	16724	12	4.726
3	1	-1	1	0.2	29.7	47.80	94	-6	16836	3	4.113
4	1	-1	-1	0.2	29.2	46.8	74	-3	17174	5	5.162
5	-1	1	1	0.4	31.2	50.07	90	-21	17167	6	5.042
6	-1	1	-1	0.4	35	55.80	76	-9	17171	8	4.200
7	-1	-1	1	0.2	29.2	47.06	112	-18	17167	7	5.238
8	-1	-1	-1	0	29.5	47.22	70	-9	17012	5	5.182
Norma Colombiana				0.5		47	93				1.9-6.0

**4.1.2.1 Viscosidad.** El efecto de los factores y de las interacciones en la viscosidad del Biodiesel de aceite de Palma Mil Pesos se presenta en el gráfico 12 como una distribución normal, siendo significativos B y las interacciones AC y BC.

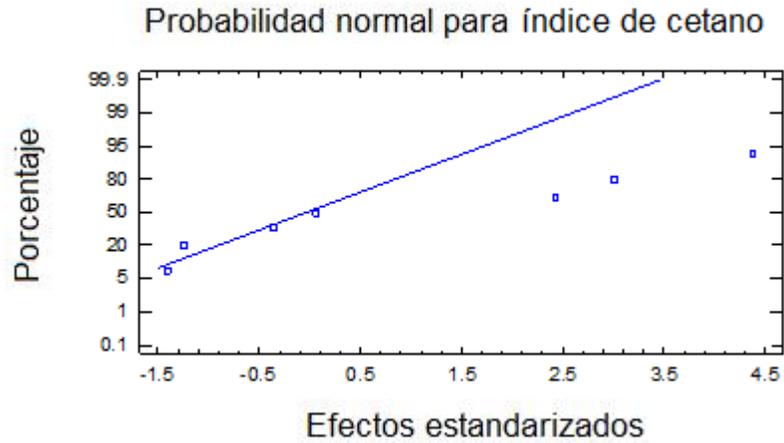
**Gráfico 12. Probabilidad normal para los efectos sobre la viscosidad del BPMP**



En el gráfico 13 se puede observar que para el BPMP el efecto de la interacción AC, BC y B son significativos para reducir la viscosidad. Debido a que este aceite es menos viscoso que el aceite de higuera, la presencia de metanol en el nivel más alto para favorecer la producción de biodiesel, no es necesaria. Podemos concluir que la viscosidad del Biodiesel depende principalmente de la fuente de triglicérido y no de las condiciones de operación del proceso.

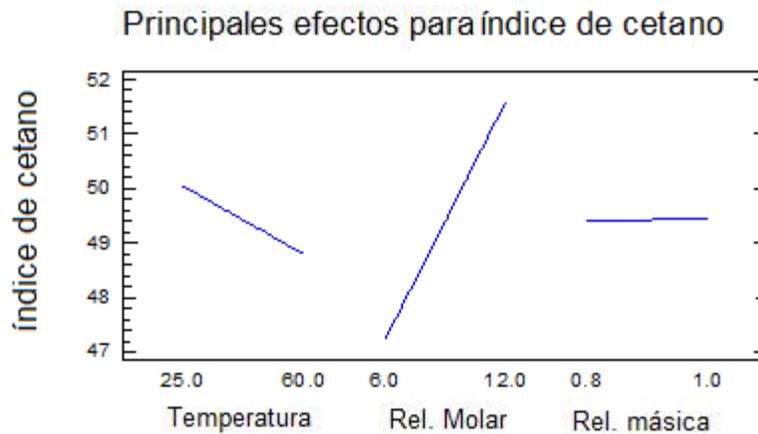
**4.1.2.2 Índice de cetano.** El efecto de los factores y de las interacciones en el índice de cetano del Biodiesel de aceite de Palma Mil Pesos se presenta en el gráfica 15 como una distribución normal:

**Gráfico 13. Principales efectos sobre el índice de cetano del BPMP**



El gráfico 14 presenta los efectos individuales de los tratamientos y las interacciones entre ellos para el índice de cetano en el biodiesel de Palma mil pesos (BPMP), de esta forma se requiere mayor cantidad de alcohol para lograr un índice de cetano bajo.

**Gráfico 14. Principales efectos sobre el índice de cetano del BPMP**

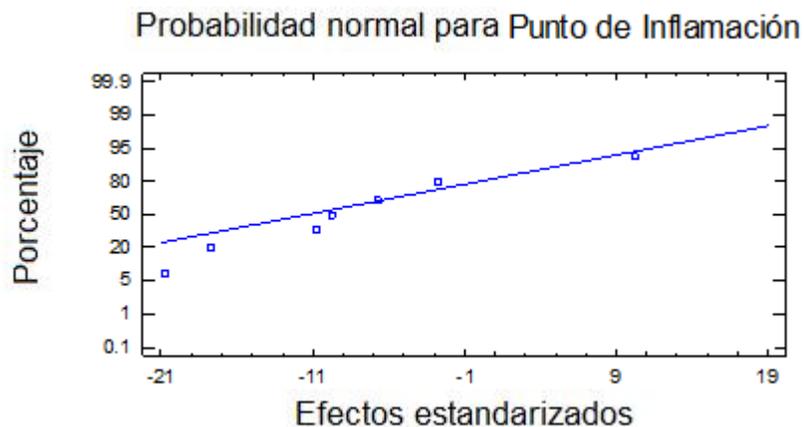


En el gráfico 14 podemos observar que para el BPMP el índice de cetano depende principalmente de la concentración molar de Alcohol/aceite. En el gráfico 16 se muestra como a mayor cantidad de alcohol en la reacción, el índice de cetano aumenta de forma significativa, este comportamiento se relaciona con el equilibrio de la reacción, a mayor metanol se producirá mayor cantidad de biodiesel lo que a su vez aumenta el número de cetano.

Además del efecto de la cantidad de alcohol en la muestra, el tipo de fuente de triglicérido aumenta el efecto sobre el índice de cetano. El aceite de palma mil pesos está compuesto principalmente por ácido oleico (Briceño, 2005), este ácido graso al tener menor número de insaturaciones que el aceite de higuera, permitirá obtener un biodiesel con mayor número de cetano (49.41). (Castillo, 2007).

**4.1.2.3 Punto de inflamación** En el gráfico 15 se presenta la distribución normal de los tratamientos relacionados con el punto de inflamación para el BPMP:

**Gráfico 15. Principales efectos sobre el punto de inflamación del BPMP**

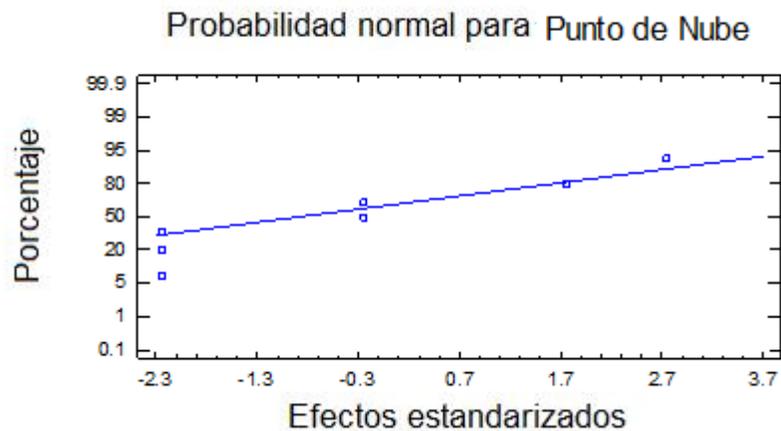


El comportamiento del punto de inflamación para el biodiesel de Palma mil pesos es análogo al comportamiento del Biodiesel de Higuierilla. El aumento del punto de inflamación se ve afectado principalmente por el proceso de secado y el efecto de los factores representa ruido en el análisis estadístico.

Las muestras que arrojaron puntos de inflamación mayores tendrán menos posibilidad de presentar problemas de seguridad en el transporte, en el manejo ni en el almacenamiento.

**4.1.2.4 Punto de Nube.** En el gráfico 16 se presenta la distribución normal de los factores bajo estudio para la variable respuesta punto de nube:

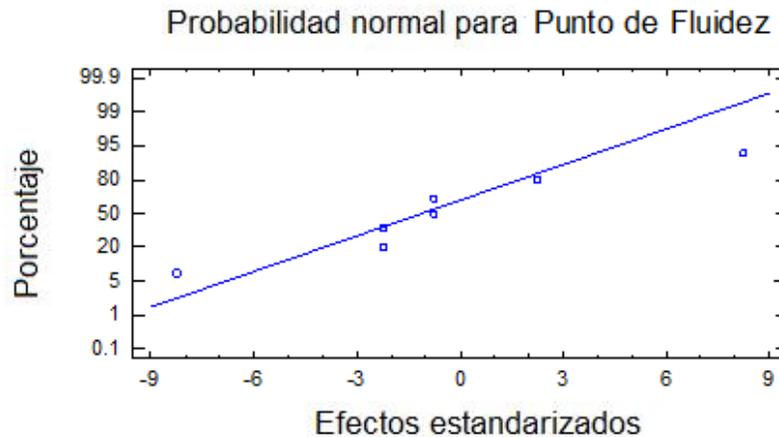
**Gráfico 16. Principales efectos sobre el punto de nube del BPMP**



En el gráfico 18 se observa que los factores no tienen un efecto significativo sobre la variable respuesta. Análogo al proceso con Biodiesel de Higuierilla se presume que el comportamiento del punto de nube se ve afectado principalmente por el proceso de refinación del aceite.

**4.1.2.5 Punto de fluidez.** En el gráfico 17 se presentan los principales efectos sobre el punto de fluidez del BPMP:

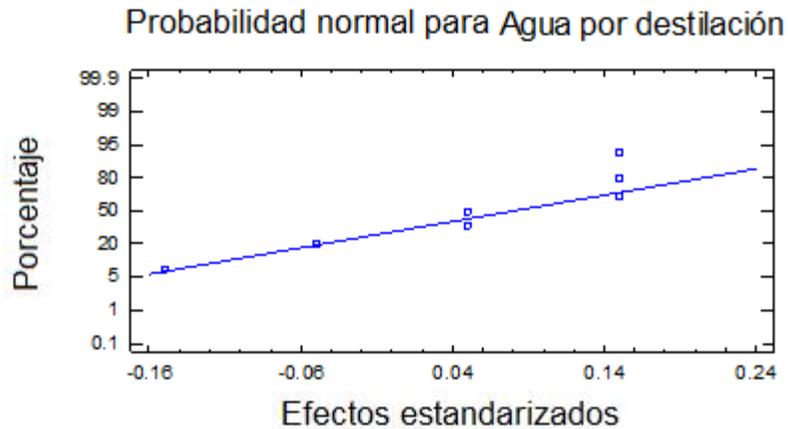
**Gráfico 17. Principales efectos sobre el punto de fluidez del BPMP**



El punto de fluidez del BPMP tiene un comportamiento similar al punto de nube. Aunque se ve un efecto de la cantidad de catalizador en la muestra no es el efecto que tiene mayor incidencia sobre esta propiedad.

**4.1.2.6 Agua por destilación.** En la gráfico 18 se presentan los principales efectos sobre la cantidad de agua en el BPMP.

**Gráfico 18. Principales efectos sobre la cantidad de agua del BPMP**



La cantidad de agua se ve afectada por las condiciones de secado del biodiesel y por la exposición a alta humedad durante el almacenamiento del biodiesel. Durante las pruebas experimentales en algunas ocasiones el biodiesel se dejaba expuesto a la humedad del ambiente mientras se dejaba enfriando la muestra después del proceso de secado, esta condición aumentó el porcentaje de agua en el biodiesel, por lo tanto se recomienda para próximos trabajos disminuir la exposición a la humedad del producto final y así mejorar la calidad del mismo.

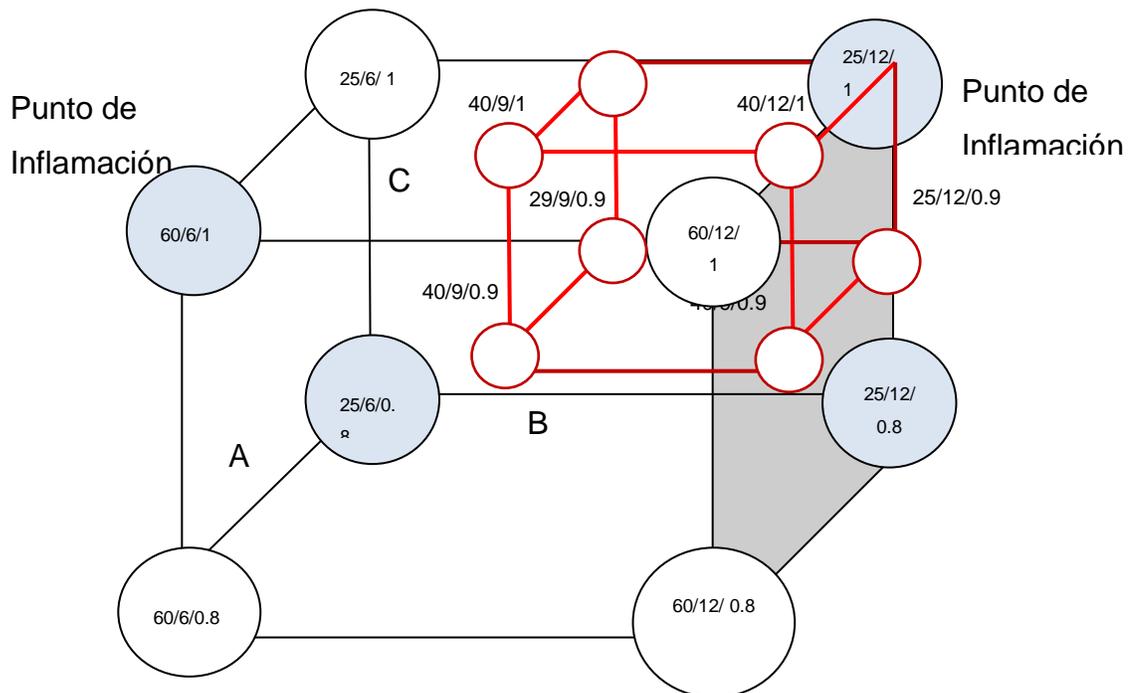
Eliminar el exceso de agua es fundamental para evitar problemas de corrosión en el motor, el crecimiento microbiano que provoca obstrucciones en los filtros y evitar reacciones de hidrólisis que dan lugar a la aparición de ácidos grasos libres. (Benavides, 2007)

**4.1.2.7 Poder calorífico.** Todas las muestras cumplen con el intervalo de poder calorífico reportado en la literatura (15700 y 16100) Btu/lb. (Benjumea, 2006)

**4.1.2.8 Optimización del diseño del BPMP.** La figura 8 ilustra los resultados del diseño de experimentos. El cuadro rojo indica la región en donde se obtiene

mejores resultados en las propiedades del biodiesel. Los círculos azules son los puntos en donde se obtuvieron los mejores resultados para las propiedades analizadas, a partir de estos puntos se seleccionó la región optimizada.

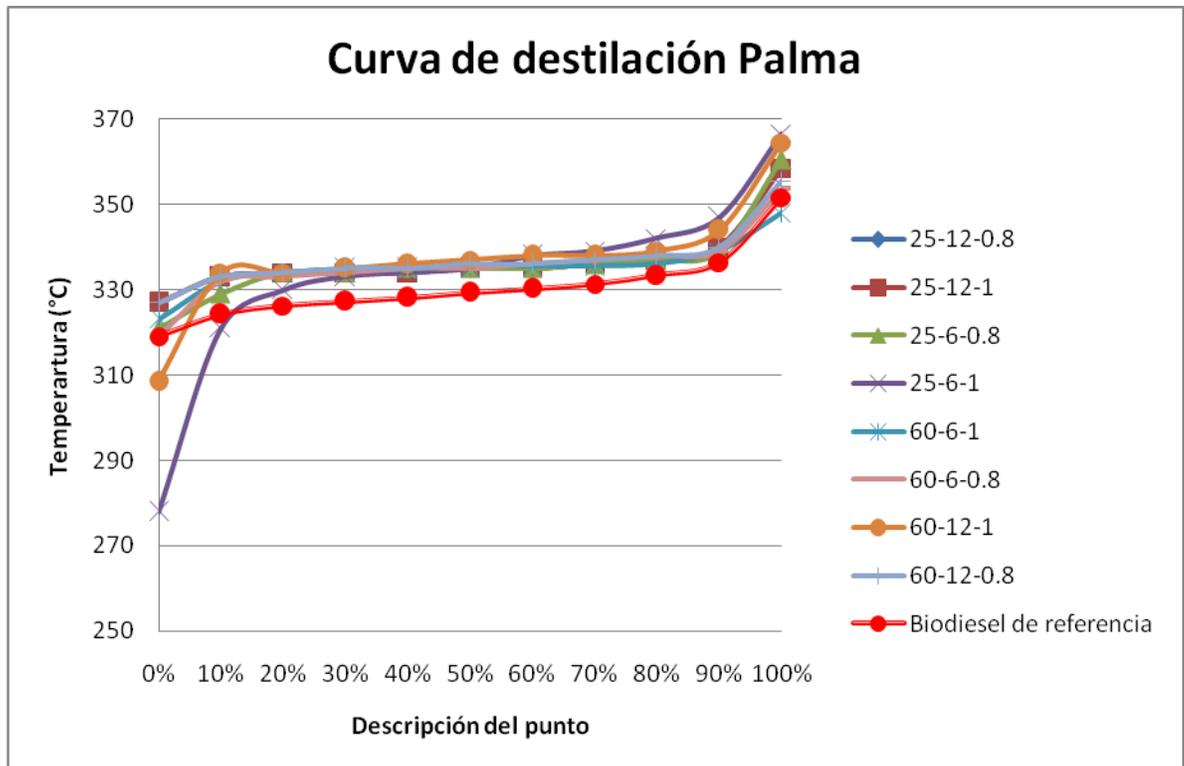
**Figura 9. Representación gráfica del diseño de experimentos**



Igual que para el Biodiesel de higuerrilla, el Biodiesel de Palma Mil pesos tiene una región optimizada que sugiere trabajar con mayor cantidad de catalizador y de metanol para aumentar el rendimiento de la reacción y por lo tanto aumentar las propiedades finales del biodiesel obtenido, y a temperaturas bajas para reducir costos operativos.

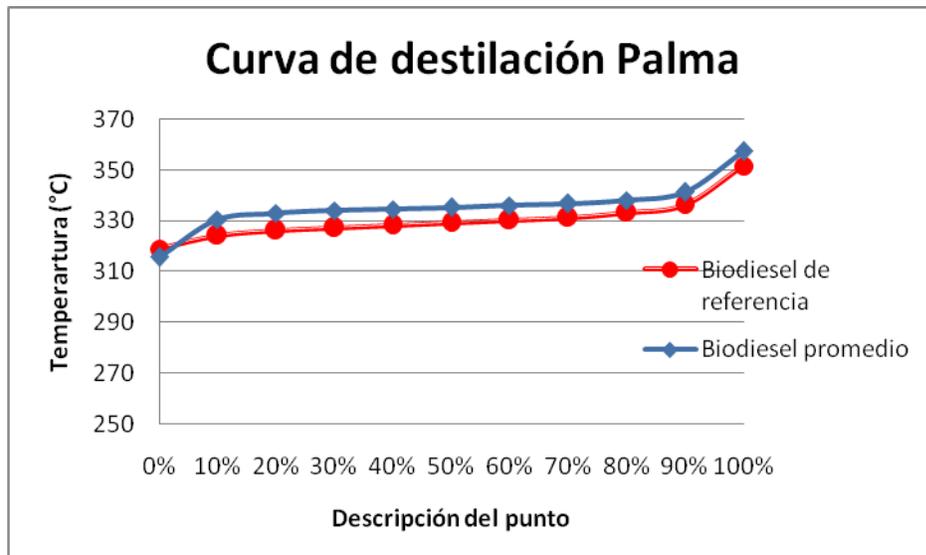
**4.1.2.9 Curva de destilación BPMP.** En el gráfico 19 se muestra los resultados de la destilación del Biodiesel de Palma Mil pesos para todos los tratamientos del diseño de experimento.

**Gráfico 19. Curva de destilación BPMP**



Con los datos obtenidos se realizó un promedio con las temperaturas de destilación para comparar con un valor de referencia, el resultado se muestra en la gráfico 20.

**Gráfico 20. Promedio de la curva de destilación para BPMP**



La tendencia de las curvas de destilación se ajusta a la curva de referencia. (Agudelo, 2004) Solo dos de los tratamientos inician su punto de ebullición por debajo del biodiesel de referencia y son los denominados 60-12-1 y 25-6-1, se puede observar que logran alcanzar la temperatura normal al 10% de destilado y reproduciendo así la tendencia de la curva de referencia, siempre con temperaturas por encima de la misma.

#### **4.2 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES OBTENIDAS CON OTROS TRABAJOS REALIZADOS:**

A continuación se realiza una comparación de las propiedades obtenidas con otros resultados reportados en la literatura:

**Tabla 10. Comparación de propiedades obtenidas experimentalmente vs. Teórica**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>RESULTADO BH</b>	<b>BIODIESEL HIGUERILLA (Benavides, 2007)</b>	<b>NORMA ASTM PERTINENTE</b>
Número de cetano	Cetanos	35.35	38	>47
Viscosidad (cinemática a 40 °C)	mm <sup>2</sup> /s	16.46	14.89	1.9 – 6.0
Contenido de agua	mg/kg	0.8	0.8	0.5
Punto de inflamación	°C	82	84.3	93
Punto de nube/ enturbiamiento	°C	5.6	8	N/A

Las propiedades del biodiesel obtenido en este trabajo son similares a otros estudios realizados, lo que indica que la transesterificación alcalina no ha podido mejorar las propiedades finales del biodiesel de higuierilla. De esta manera se sugiere trabajar con otro tipo de catalizadores o con otras fuentes de triglicéridos, debido a que las propiedades del aceite de higuierilla como viscosidad e índice de acidez influyen negativamente en las propiedades finales del biodiesel como índice de cetano y viscosidad y que pueden ser más favorables para otros usos como lo es la lubricación.

**Tabla 11. Comparación de propiedades obtenidas del BPMP**

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO BPMP	BIODIESEL PALMA AFRICANA (Arbelaez,2007)	NORMA ASTM PERTINENTE
Número de cetano	Cetanos	47,06	46.42	>47
Viscosidad (cinemática a 40 °C)	mm <sup>2</sup> /s	5,24	4.72	1.9 – 6.0
Contenido de agua	mg/kg	0.2	0.2	0.5
Punto de inflamación	°C	112	39	93
Punto de nube/enturbiamiento	°C	47,06	15	N/A

El biodiesel de palma mil pesos obtenido en este trabajo cumple con las normas ASTM y tiene mejores resultados que otros trabajos realizados, lo que indica que esta fuente de triglicérido es atractiva para la producción de biodiesel y puede ser una solución para el problema de energía en zonas no interconectadas del Chocó.

## 5. MARGEN DE CONTRIBUCIÓN

### 5.1 ANÁLISIS MARGEN DE CONTRIBUCIÓN 2008

El margen de contribución se calcula con el precio de venta del biocombustible y los costos de la materia prima, así: (Turton, 2003)

$$\text{Profit\_Margin} = \text{PV}_{\text{Biodiesel}} - (\text{costo}_{\text{aceite}} + \text{costo}_{\text{Metanol}} + \text{costo}_{\text{NaOH}})$$

Los costos de las materias primas son presentados en las tablas 12 y 13.

**Tabla 12. Costos de las materias primas para la producción de biodiesel**

Materia Prima	Unidad	Costo Unitario (\$/unid)
Aceite de higuera <sup>5</sup>	Kg	4300
Aceite de Palma Mil Pesos <sup>6</sup>	Kg	5000
Metanol <sup>7</sup>	Kg	3090
Hidróxido de Sodio <sup>3</sup>	Kg	2080

Para obtener la cantidad de materia prima utilizada para cada nivel del factor fueron necesarios los siguientes datos:

<sup>5</sup> Cotización INCORP, 20 de Junio de 2008

<sup>6</sup> Cotización FUNDACIÓN ESPAVÉ del 01 de Julio de 2008

<sup>7</sup> Cotización PROTOQUÍMICA del 25 de septiembre de 2008

**Tabla 13. Propiedades de las materias primas**

Materia Prima	Propiedad	Unidad	Valor
Aceite de Higuera <sup>8</sup>	Peso Molecular (W)	g/mol	932
	Densidad (δ)	g/ml	0.956 – 0.963 <sup>9</sup>
Aceite de Palma Mil pesos <sup>5</sup>	Peso Molecular	g/mol	884
	Densidad	g/ml	0.907 – 0.917
Metanol	%Pureza	%P/P	95
	Peso Molecular	g/mol	32

Para calcular la cantidad necesaria de cada materia prima se tuvo en cuenta los tres factores del diseño de experimentos: Relación molar Alcohol/aceite (R1), relación másica catalizador/aceite (R2):

$$\text{Aceite(Kg)}=A$$

$$\text{Metanol (Kg)}=R1 \left( \frac{\text{mol}_{\text{metanol}}}{\text{mol}_{\text{aceite}}} \right) * \frac{A(\text{Kg}_{\text{aceite}})}{W_{\text{aceite}} \left( \frac{\text{Kg}_{\text{aceite}}}{\text{mol}_{\text{aceite}}} \right)} * W_{\text{metanol}} \left( \frac{\text{Kg}_{\text{metanol}}}{\text{mol}_{\text{metanol}}} \right)$$

$$\text{Catalizador (Kg)}=R2 \left( \frac{\text{Kg}_{\text{catalizador}}}{\text{Kg}_{\text{aceite}}} \right) * A(\text{Kg}_{\text{aceite}})$$

En la región optimizada la cantidad y el costo de materias primas necesarias para producir 1 kilo de biodiesel, suponiendo un rendimiento del 98% (Benjumea, 2007) son presentas en la tabla 14.

<sup>8</sup> Ogunniyi, 2006

<sup>5</sup> Briceño, 2005

**Tabla 14. Costo y cantidad de materias primas por litro de biodiesel**

	<b>Diseño (T°, R1, R2)</b>	<b>Metanol (g)</b>	<b>Catalizador (g)</b>	<b>Costo (\$/Kg<sub>biodiesel</sub>)</b>
<b>ACEITE DE PALMA MIL PESOS (1020 g)</b>	25, 12, 1	466.14	10.20	13980.86
	25, 9, 1	349.61	10.20	13451.47
	40, 9, 1	349.61	10.20	13451.47
	40, 9, 0.9	349.61	9.18	13448.34
	25, 12, 0.9	466.14	9.18	13977.73
	25, 9, 0.9	349.61	9.18	13448.34
	40, 12, 1	466.14	10.20	13980.86
	40, 12, 0.9	466.14	9.18	13977.73
<b>ACEITE DE HIGUERILLA (1020 g)</b>	25, 12, 1	442.38	10.20	5773.81
	25, 9, 1	331.78	10.20	5432.17
	40, 9, 1	331.78	10.20	5432.17
	40, 9, 0.9	331.78	9.18	5430.04
	25, 12, 0.9	442.38	9.18	5771.68
	25, 9, 0.9	331.78	9.18	5430.04
	40, 12, 1	442.38	10.20	5773.81
	40, 12, 0.9	442.38	9.18	5771.68

El ingreso por ventas para 1 litro de biodiesel es \$1618.42/Kg<sub>biodiesel</sub>, suponiendo que el biodiesel se venderá al precio de venta del diesel que para el 25 de septiembre de 2008 es de \$6150/gal.

Por lo tanto, el Margen de contribución para 1 litro de biodiesel es:

**Tabla 15. Margen de Contribución para 1 kg de biodiesel**

	<b>Diseño (T°, R1, R2)</b>	<b>Margen de contribución (\$/Kg)</b>
<b>ACEITE DE PALMA MIL PESOS (1020 g)</b>	25, 12, 1	-12412.44
	25, 9, 1	-11883.05
	40, 9, 1	-11883.05
	40, 9, 0.9	-11879.91
	25, 12, 0.9	-12409.31
	25, 9, 0.9	-11879.91
	40, 12, 1	-12412.44
	40, 12, 0.9	-12409.31
<b>ACEITE DE HIGUERILLA (1020 g)</b>	25, 12, 1	-4205.39
	25, 9, 1	-3863.74
	40, 9, 1	-3863.74
	40, 9, 0.9	-3861.62
	25, 12, 0.9	-4203.26
	25, 9, 0.9	-3861.62
	40, 12, 1	-4205.39
	40, 12, 0.9	-4203.26

## 5.2 ANÁLISIS MARGEN DE CONTRIBUCIÓN A 2010

Según el Ministerio de Minas para el 2010 se desmontará el subsidio al precio del combustible por lo tanto el precio del combustible aumentará, haciendo más competitivo el precio del biodiesel. El precio proyectado del diesel será \$6600/gal. (Minminas, 2007).

Los altos costos de las materias primas utilizadas impiden que este proyecto sea económicamente viable, el costo del aceite de palma africana es de \$2048/kg<sup>10</sup> y es por eso que actualmente es la materia prima mas atractiva para la producción de Biodiesel además de su alto rendimiento en la reacción de transesterificación.

---

<sup>10</sup> Fedepalma.: 04 de Octubre de 2008.

## 6. CONCLUSIONES

- La producción de Biodiesel se ve afectada no sólo por los factores seleccionados, sino también por la calidad de la refinación de la materia prima, la fuente de triglicéridos y el proceso de secado del biodiesel.
- El Biodiesel de Palma Milpesos obtenido cumplió con todas las normas ASTM, en comparación al Biodiesel de Higuera. Esto se debe principalmente a las características del aceite de palma mil pesos como son el índice de acidez y la viscosidad que son menores que el aceite de higuera.
- Las interacciones entre factores para el punto de inflamación representan ruido en el diseño de experimentos. Experimentalmente se encontró que mejorando el proceso de secado se mejoran estas propiedades.
- Las propiedades obtenidas bajo las condiciones de proceso utilizadas en este trabajo para el BH y el BPMP son comparables con otros trabajos realizados de transesterificación alcalina y en algunas propiedades como el Punto de nube y el punto de fluidez se obtuvieron mejores resultados.
- La región optimizada en donde se obtiene las mejores propiedades para BPMP y el BH fue:

**Tabla 16. Región optimizada para la producción de Biodiesel por transesterificación alcalina**

	A: Temperatura	B: Relación Molar Metanol/Aceite	C: Relación másica Catalizador/aceite
Nivel bajo	25	9	0.9
Nivel alto	40	12	1

- El margen de contribución con las materias primas utilizadas para la producción de biodiesel es negativo. Para el Biodiesel de Palma mil pesos y de Higuierilla una relación molar de metanol/aceite igual a 9 y una relación másica de catalizador/aceite igual a 0.9 arroja el mejor margen de contribución menor valor negativo que es igual a -\$11879.91/Kg\_Biodiesel, en el caso del Biodiesel de Palma mil pesos y -\$3861.62/Kg\_Biodiesel para el biodiesel de higuierilla.

## 7. RECOMENDACIONES

- Evaluar a través de un diseño de experimentos factorial fraccionado el efecto de variables de proceso de la refinación y del secado del aceite en la calidad del biodiesel obtenido por transesterificación alcalina.
- Realizar un diseño de experimentos Box-Benkhem con las condiciones encontradas en la región optimizada, incluyendo replicas y ensayos de curvatura para determinar las variaciones en el proceso.
- Utilizar la metodología de este trabajo de investigación con otras fuentes de triglicéridos para establecer las causas para la depresión del punto de nube y de fluidez.
- Evaluar el uso de cal como catalizador en el proceso de transesterificación para disminuir costos de materia prima.

## BIBLIOGRAFÍA

AMSETEC LTDA. [www.amsetec.com/Biodiesel](http://www.amsetec.com/Biodiesel) [Día de acceso: 02 de febrero de 2008]

AGUDELO, John R., BENJUMEA, Pedro Nel. (2004). Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano: Aspectos de su obtención y utilización. Imprenta Universidad de Antioquia. Pág. 37.

ARIAS, Andrés Felipe. (2007). Los Biocombustibles en Colombia. En: Congreso Nacional de Biocombustibles. Conferencia Magistral. Centro de Convenciones, Cartagena de Indias.

ÁRBELAEZ, Ángela M., RIVERA, Marcela P. (2007). Diseño conceptual de un proceso para la obtención de Biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos. Medellín, Colombia. Trabajo de grado (Ingeniero de Procesos). Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Ingeniería de Procesos.

BENAVIDES, Alirio., *et al.* (2007). El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel. En: DYNA. Edición 153, Pág. 141 – 150.

BENJUMEA N., Pedro H., (2004). Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel. En: Scientia et Technica. N° 24. P 169 -173

BHALE, Purnanand., *et al.* (2008). Improving the low temperature properties of biodiesel fuel. En: Renewable Energy. P. 1-7.

BRICEÑO M. , Juan V. and NAVAS H. Petra Beatriz (2005). Comparación de las características químicas, físicas y perfil de ácidos grasos de los aceites de seje, oliva, maíz y soja. En: Revista Facultad de Agronomía. N°31. P, 109 – 119

CASTILLO, Liliana., *et al.* (2007). Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. Soluciones Prácticas. Lima, Perú. 1 ed. 171 p.

CHAVANNE, C.G. (1937) Belgian Patent 422,877, Aug. 31. Procedure for the transformation of vegetable oils for their uses as fuels.

CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Por medio de la cual se subsanan los vicios de procedimiento en que incurrió en el trámite de la Ley 818 de 2003 y se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en Motores diesel y se dictan otras disposiciones.

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA (CORPOICA). [www.corpoica.org.co](http://www.corpoica.org.co). [Día de acceso: 2 de febrero de 2008]

DEMIRBAS, Ayhan. (2006). Progress and recent trends in Biofuels. En: Progress in Energy and Combustion Science. No.33, p. 1-18.

DEMIRBAS, Ayhan. (2007). Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. En: Energy Conversion and Management. No. 49, p. 125 -130

GEMMA, Vicente y MARTÍNEZ, José. (2004). Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. En: Bioresource Technology. P 228.

GERPEN, Jon Van, *et al.* (2004). Biodiesel Production Technology. En: National Renewable Energy Laboratory. 110 p.

GERPEN, Jon Van. (2005). Biodiesel processing and production. En: Fuel Processing Technology. No.86, p. 1097-1107.

KNOTHE, Gerhard. (2001). Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels. En: Industrial Oils. Vol 12, (Nov, 2001). p. 1103 – 1107.

MA, Frangrui y HANNA, Milford A. (1999). Biodiesel Production: A review. En: Bioresource Technology. No.70, p. 1-15.

MARRÓN, Guillermo M. (2002). GASOIL, Características y Manejo a campo. Buenos Aires, Argentina. Trabajo de Investigación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce. Ingeniería agrónoma.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, (2007). El programa de biodiesel en Colombia, un verdadero programa con visión de futuro. Colombia. Fedepalma. Bogotá, Colombia. En: [http://www.fedepalma.org/document/2007/Biodiesel\\_MinMinas.pdf](http://www.fedepalma.org/document/2007/Biodiesel_MinMinas.pdf). (Consulta: 20 de agosto de 2007).

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 18 2087 de 2007. Por la cual se modifican los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diesel como componente de la mezcla con el combustible diesel de origen fósil en procesos de combustión.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 182087 de 2007. Por la cual se modifican los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores

diesel como componente de la mezcla con el combustible diesel de origen fósil en procesos de combustión

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. (2007). Política del Subsector hidrocarburos. En:

[http://www.minminas.gov.co/minminas/sectores.nsf/2a84e89f4d73f130052567be0052c75a/598f95f20ca495bb052573d800733ce1/\\$FILE/OBJETIVOS\\_METAS\\_HIDROCARBUROS\\_2006-%202010.pdf](http://www.minminas.gov.co/minminas/sectores.nsf/2a84e89f4d73f130052567be0052c75a/598f95f20ca495bb052573d800733ce1/$FILE/OBJETIVOS_METAS_HIDROCARBUROS_2006-%202010.pdf). (consulta: 29 de septiembre de 2008)

MEHER, *et al.* (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification – a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 10. pag 248 – 268.

MONTGOMERY, Douglas C. Design and Analysis of Experiments. Quinta edición: 2001. Arizona State University. Ed.: John Wiley and Sons, INC. p:258 - 270.

NAGIB, Já Carlos. (2007). Métodos de producción de biodiesel. En: Primer Congreso Internacional Del Cultivo, Procesamiento Y Aplicaciones De La Higuera. Conferencia Magistral. Universidad EAFIT. Medellín.

OGUNNIYI, D.S. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. En: Bioresource Technology. N°97. Pag, 1086–1091

POSADA, Cristian M.. (2007). Determinación de las condiciones óptimas de la reacción de transesterificación del aceite de ricino para la obtención de ésteres etílicos (Biodiesel). Medellín, Colombia. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

TAMALAMPUDI, *et al.* (2007). Enzymatic production of biodiesel from Jatropha oil: A comparative study of immobilized-whole cell and commercial lipases as a biocatalyst. En: Biochemical Engineering Journal.

TURTON, R. *et al.* Analysis, síntesis, and desing of Chemicals process. Segunda edición: 2003. New Yersey. Ed.: Prentice hall PTR. p:154.

ROYON, D., *et al.* Enzymatic production of biodiesel from cotton seed oil using t-butanol as a solvent. En: Bioresource Technology. Vol 98. p 648 – 653.

RIOS, *et al.* (1997). Proceso de germinación, transplante y características del fruto de la palma milpesos *Jessenia batua*. Quibdo, Choco. Trabajo de Investigación. Universidad Tecnológica del Chocó D.L.C. Vicerrectoría de Investigaciones.

ZHANG, Y., *et al.* (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: Process design and technological assessment. En: Bioresource Technology. No.89, p. 1-16

**ANEXO. CARACTERIZACIONES DEL BIODIESEL DE HIGUERILLA Y DE  
PALMA MIL PESOS**

**ANEXO. TABLAS Y GRAFICOS ADICIONALES DEL ANALISIS DE LOS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES DEL BIODIESEL FINAL A PARTIR DE AMBAS FUENTES DE TRIGLICERIDOS**

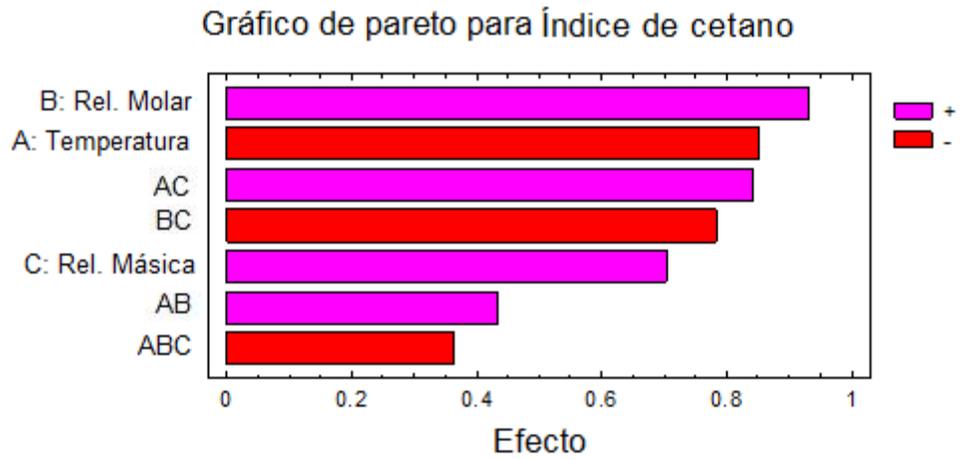
**Tabla 17. Efectos estimados de los factores bajo estudio para la viscosidad del BH**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-4.853	-7.683	-2.143	-1.853	-0.043	-1.603	-3.363
Suma de Cuadrados	47.1032	118.057	9.1849	6.86722	0.003698	5.13922	22.6195

**Tabla 18. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el índice de cetano del BH**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-0.855	0.935	0.705	0.435	0.845	-0.785	-0.365
Suma de Cuadrados	1.46205	1.74845	0.99405	0.37845	1.42805	1.23245	0.26645

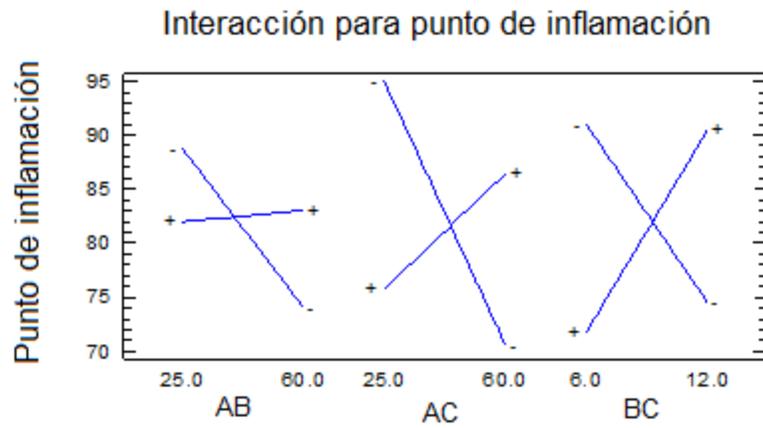
**Gráfico 21. Pareto de los efectos sobre el índice de cetano del BH**



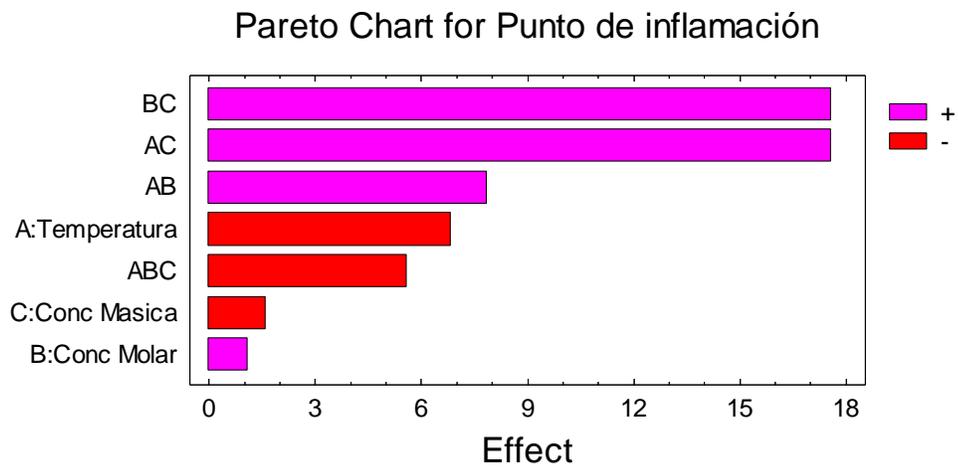
**Tabla 19. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de inflamación del BH**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-6.875	1.125	-1.625	7.875	17.625	17.625	-5.625
Suma de Cuadrados	94.5313	2.53125	5.28125	124.031	621.281	621.281	63.2813

**Gráfico 22. Principales efectos sobre el punto de inflamación del Biodiesel de Higuierilla**



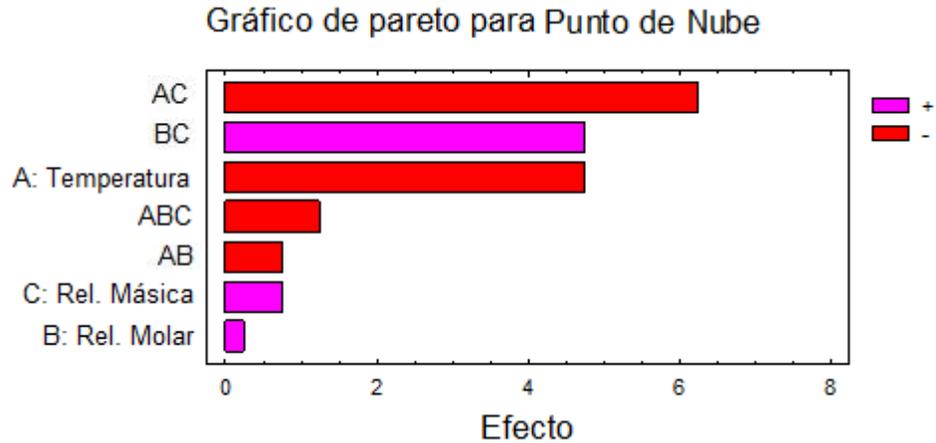
**Gráfico 23. Pareto de los efectos sobre el punto de inflamación del Biodiesel de Higuierilla**



**Tabla 20. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de nube del BH**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-4.75	0.25	0.75	-0.75	-6.25	4.75	-1.25
Suma de Cuadrados	45.125	0.125	1.125	1.125	78.125	45.125	3.125

**Gráfico 24. Pareto de los efectos sobre el punto de nube del Biodiesel de Higuierilla**



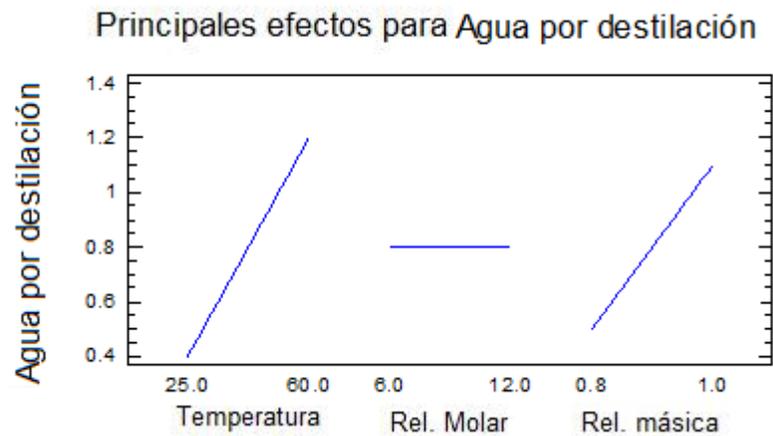
**Tabla 21. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de fluidez del BH**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-6.0	6.0	1.5	0.0	10.5	1.5	7.5
Suma de Cuadrados	72	72	4.5	0.0	220.5	4.5	112.5

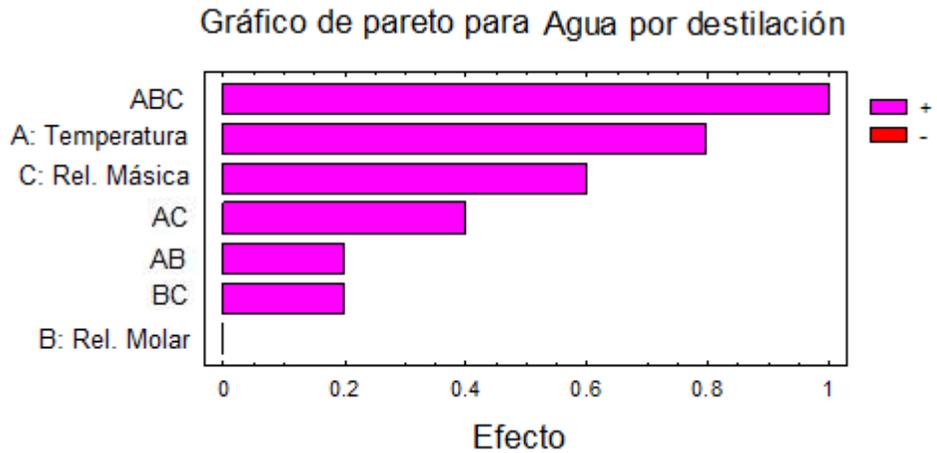
**Tabla 22. Efectos estimados de los factores bajo estudio para la cantidad de agua del BH**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	0.8	0.0	0.6	0.2	0.4	0.2	1.0
Suma de Cuadrados	1.28	0.0	0.72	0.08	0.32	0.08	2.0

**Gráfico 25. Principales efectos sobre la cantidad de agua para el biodiesel de Higuierilla**



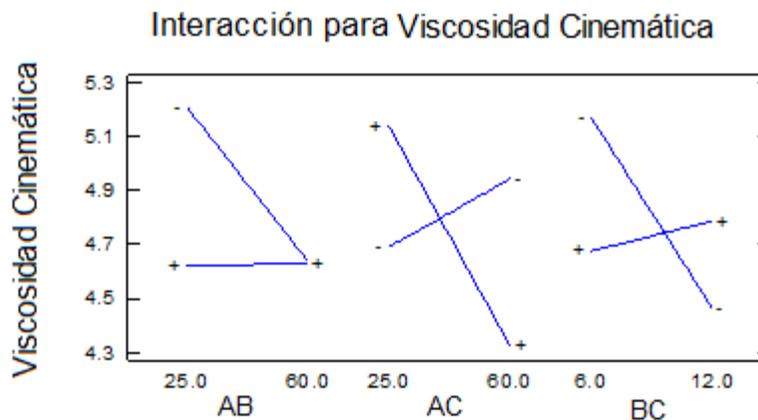
**Gráfico 26. Pareto de los efectos sobre la cantidad de agua para el Biodiesel de Higuierilla**



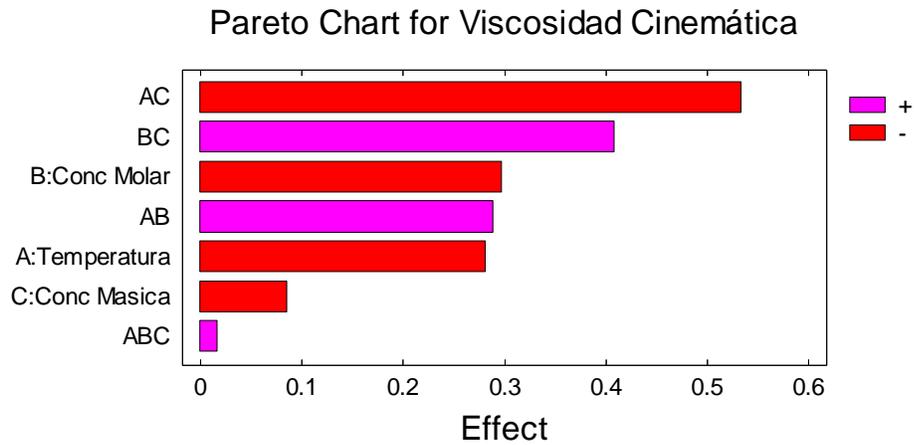
**Tabla 23. Efectos estimados de los factores bajo estudio para la viscosidad del BPMP**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-0.2822	- 0.29875	-0.08625	0.2902 5	-0.5352	0.4102 5	0.01725
Suma de Cuadrados	0.1593 3	0.17850 3	0.014878 1	0.1684 9	0.57298 5	0.3366 1	0.00059 5

**Gráfico 27. Principales efectos sobre la viscosidad del BPMP**



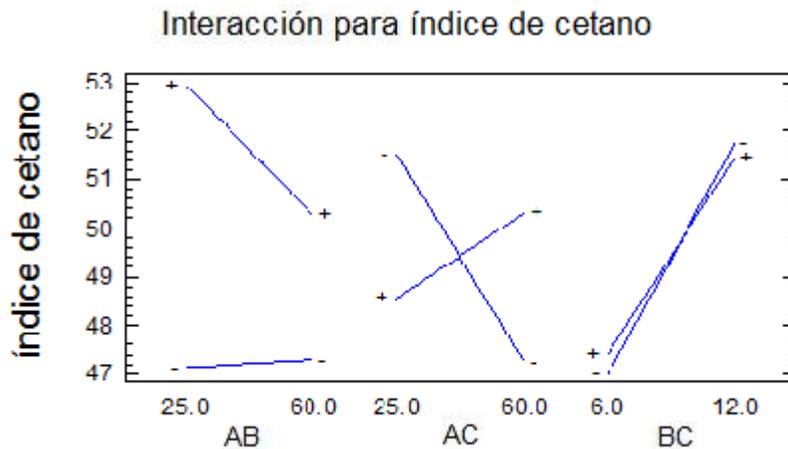
**Gráfico 28. Pareto de los efectos sobre la viscosidad del BPMP**



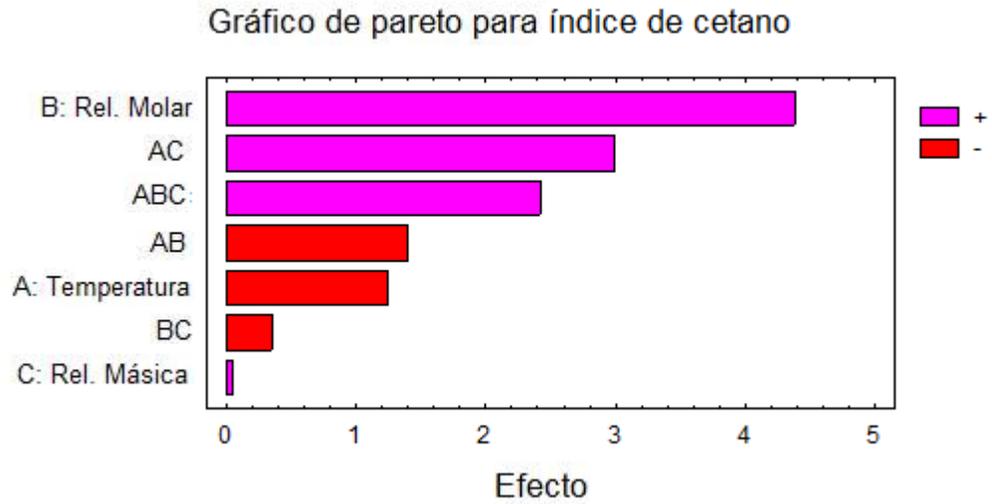
**Tabla 24. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el índice de cetano del BPMP**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-1.25	4.385	0.06	-1.41	3.005	-0.36	2.425
Suma de Cuadrados	3.125	38.4565	0.0072	3.9762	18.06	0.2592	11.7613

**Gráfico 29. Principales efectos de las interacciones sobre el índice de cetano del BPMP**



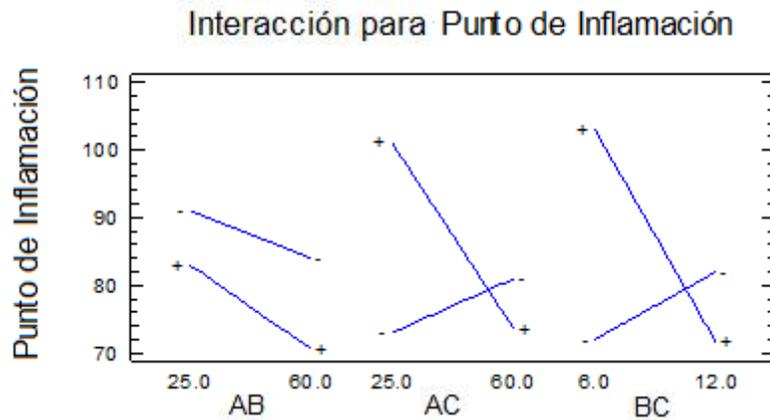
**Gráfico 30. Pareto de los efectos sobre el índice de cetano del BPMP**



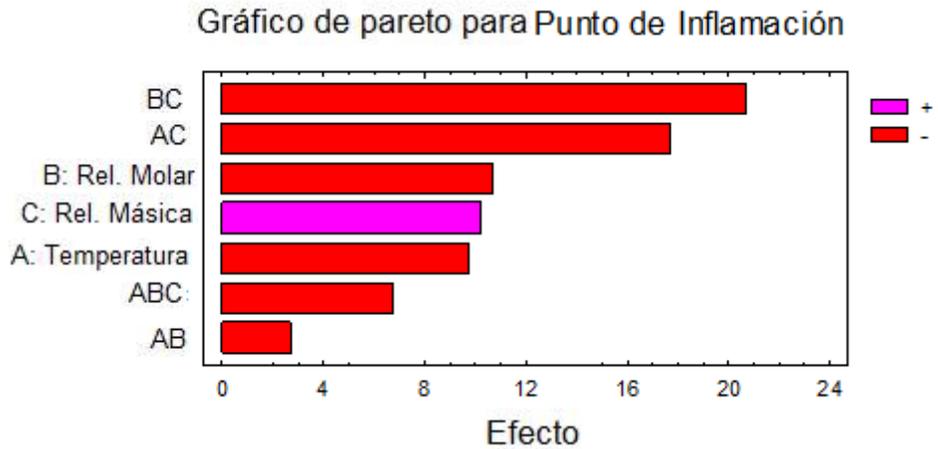
**Tabla 25. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de inflamación del BPMP**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-9.75	-10.75	10.25	-2.75	-17.75	-20.75	-6.75
Suma de Cuadrados	190.12 5	231.125	210.125	15.125	630.125	861.12 5	91.125

**Gráfico 31. Principales efectos sobre el punto de inflamación del BPMP**



**Gráfica 32. Pareto de los efectos sobre el punto de inflamación del BPMP**



**Tabla 26. Efectos estimados de los factores bajo estudio para el Punto de nube del BPMP**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-0.25	2.75	-2.25	1.75	-2.25	-2.25	-0.25
Suma de Cuadrados	0.125	15.125	10.125	6.125	10.125	10.125	0.125

**Tabla 27. Efectos de los factores bajo estudio para el Punto de fluidez del BPMP**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	8.25	-2.25	-8.25	-0.75	2.25	-2.25	-0.75
Suma de Cuadrados	136.125	10.125	136.125	1.125	10.125	10.125	1.125

**Tabla 28. Efectos estimados de los factores bajo estudio para la cantidad de agua del BPMP**

Factor	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-0.05	0.15	0.15	-0.15	0.05	0.05	0.15
Suma de Cuadrados	0.005	0.045	0.045	0.045	0.005	0.005	0.045