



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Maestría en Gestión Industrial**

**“EVALUACIÓN ECONÓMICA DE DOS MÉTODOS PARA LA PURIFICACIÓN DE  
BIODIESEL”**

**Clara Patricia Ramírez De León**

**Guatemala, Mayo de 2009**



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Maestría en Gestión Industrial**

**“EVALUACIÓN ECONÓMICA DE DOS MÉTODOS PARA LA PURIFICACIÓN DE  
BIODIESEL”**

Informe final de Tesis

Presentado al comité de la Maestría en Gestión Industrial

por

Clara Patricia Ramírez De León

Licenciada en Química

Asesorada por

M.Sc. Pedro Alejandro Ordoñez Cruz

Al conferírsele el título de  
Maestra en Ciencias en Gestión Industrial

Guatemala, junio de 2009



## Índice General

<b>INDICE DE CUADROS .....</b>	<b>V</b>
<b>INDICE DE GRÁFICAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>PERSPECTIVAS PARA EL BIODIESEL EN GUATEMALA.....</i>	<i>1</i>
1.1.2. <i>El uso agrícola de las tierras .....</i>	<i>2</i>
1.1.3. <i>Matriz energética y mercado de hidrocarburos .....</i>	<i>3</i>
1.1.4. <i>La producción de biodiesel hoy .....</i>	<i>7</i>
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>9</b>
2.1 HISTORIA DE LOS MOTORES DIESEL .....	9
2.2 BIODIESEL .....	10
2.3 USOS DEL BIODIESEL.....	14
2.4 BENEFICIOS DE LA UTILIZACIÓN DE BIODIESEL .....	14
2.5 QUÍMICA DEL BIODIESEL .....	16
2.6 ACEITE DE PALMA .....	18
2.7 PRESENCIA DE AGUA EN BIODIESEL.....	19
2.8 CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL Y LIBRE EN BIODIESEL .....	20
2.9 MINERALES ADSORBENTES .....	20
2.9.1 <i>Arcillas .....</i>	<i>20</i>
2.9.2 <i>Zeolitas .....</i>	<i>22</i>
2.9.3. <i>Características más importantes de las zeolitas .....</i>	<i>24</i>
2.9.4. <i>Magnesol® .....</i>	<i>26</i>
2.10 METODOS DE EVALUACION DE PROYECTOS INDUSTRIALES.....	26
2.10.1 <i>Valor presente o actual neto ( VPN ) y Tasa Interna de Retorno (TIR).....</i>	<i>26</i>
2.11 INDICADORES FINANCIEROS .....	27
2.11.1 <i>EBIT.....</i>	<i>27</i>
2.11.2 <i>ROIC.....</i>	<i>28</i>
2.11.4 <i>EVA.....</i>	<i>28</i>

2.11.5 FREE CASH FLOW.....	30
2.11.6 NOPAT .....	30
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>31</b>
UNIVERSO DE TRABAJO.....	31
MATERIALES .....	31
REACTIVOS .....	31
MÉTODOS .....	32
PROCEDIMIENTO .....	32
<i>Síntesis de Biodiesel</i> .....	32
<i>Determinación de humedad (agua) y sedimentos en Biodiesel</i> .....	33
<i>Determinación de glicerina total y libre en Biodiesel (Método AOCS Ca 14-56)</i> .....	33
DISEÑO EXPERIMENTAL .....	34
RENTABILIDAD FINANCIERA.....	35
<b>4. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>37</b>
<b>5. OBJETIVOS .....</b>	<b>39</b>
GENERAL .....	39
ESPECÍFICOS .....	39
<b>6. HIPÓTESIS .....</b>	<b>41</b>
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
7.1. RESULTADOS CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL .....	43
7.1.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	43
7.1.2. BENTONITA .....	43
7.1.3. ZEOLITAS ANIONICAS.....	44
7.1.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	44
7.1.5. TALCO.....	44
7.1.6. MAGNESOL .....	45
7.2. RESULTADOS CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE .....	45
7.2.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	45
7.2.2. BENTONITA .....	46
7.2.3. ZEOLITAS ANIONICAS.....	46
7.2.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	47

7.2.5. TALCO.....	47
7.2.6. MAGNESOL .....	47
7.3. RESULTADOS CONTENIDO DE HUMEDAD .....	48
7.3.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	48
7.3.2. BENTONITA .....	48
7.3.3. TALCO.....	49
7.3.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	49
7.3.5. ZEOLITAS ANIONICAS.....	49
7.3.6. MAGNESOL .....	50
7.4. RESULTADOS CONTENIDO DE CATALITICO .....	51
7.4.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	51
7.4.2. BENTONITA .....	51
7.4.3. TALCO.....	52
7.4.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	52
7.4.5. ZEOLITAS ANIONICAS.....	53
7.4.6. MAGNESOL .....	53
7.5. RESULTADOS CONTENIDO DE JABONES.....	54
7.5.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	54
7.5.2. BENTONITA .....	54
7.5.3. TALCO.....	55
7.5.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	55
7.5.5. ZEOLITAS ANIONICAS.....	56
7.5.6. MAGNESOL .....	56
7.6. PORCENTAJES DE REMOCION .....	57
7.6.1. <i>Porcentajes de remoción de glicerina total</i> .....	57
7.6.2. <i>Porcentajes de remoción de glicerina libre</i> .....	57
7.6.3. <i>Porcentajes de remoción de humedad y sedimentos</i> .....	58
7.6.4. <i>Porcentajes de remoción de jabones</i> .....	58
7.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	61
7.7.1 <i>Glicerina Total</i> .....	61
7.7.2. <i>Análisis de varianza glicerina total</i> .....	61
7.7.3. <i>Glicerina Libre</i> .....	63
7.7.4. <i>Análisis de varianza glicerina libre</i> .....	64

7.7.5. <i>Humedad</i> .....	66
7.7.6. <i>Análisis de varianza humedad</i> .....	66
7.7.7. <i>Jabones</i> .....	68
7.7.8. <i>Análisis de varianza jabones</i> .....	69
<b>8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>81</b>
8.1 PRODUCCIÓN Y REFINACIÓN DE ÉSTERES DE METILO (BIODIESEL).....	81
8.2. TRATAMIENTO FINAL DE BIODIESEL CON MINERALES ADSORBENTES.....	82
8.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	85
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>91</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>95</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>99</b>
CÁLCULOS PARA DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL.....	99
CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DE GLICERINA LIBRE.....	100
CÁLCULOS PARA DETERMINAR CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS, NORMA ASTM D 2709.....	102
CÁLCULOS PARA DETERMINAR CONTENIDO DE JABONES. ....	102
CÁLCULOS PARA DETERMINAR CONTENIDO DE CATALÍTICO.....	103
FOTOGRAFÍAS .....	104

## Índice de Cuadros

CUADRO 1: INDICADORES SOCIO-ECONÓMICOS Y DE USOS DE TIERRAS .....	1
CUADRO 2: CONDICIONES DEL BALANCE COMERCIAL Y DE LA DEUDA EXTERNA DE GUATEMALA. ....	2
CUADRO 3: MAYORES EXTENSIONES DE CULTIVOS.....	3
CUADRO 4: INDICADORES ENERGÉTICOS .....	4
CUADRO 5: BALANCE DE DERIVADOS DEL PETRÓLEO .....	5
CUADRO 6: VENTAS DE COMBUSTIBLES.....	5
CUADRO 7: PRECIOS AL CONSUMIDOR DE COMBUSTIBLES .....	6
CUADRO 8: TABLA DE PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL ACEITE DE PALMA Y SUS FRACCIONES.....	18
CUADRO 9: COMPOSICIÓN DE ÁCIDOS GRASOS EN ACEITE DE PALMA Y SUS FRACCIONES. ....	19
CUADRO 10: TABLA DE COMPARACIÓN DE PROPIEDADES TÉCNICAS .....	70
CUADRO 11: MÉTODO DE LAVADO CON AGUA .....	72
CUADRO 12: MÉTODO DE TRATAMIENTO CON ZEOLITAS .....	74
CUADRO 13: COSTOS DE PRODUCCIÓN PARA EL PROCESO DE PURIFICACIÓN USANDO LAVADOS CON AGUA .....	76
CUADRO 14: COSTOS DE PRODUCCIÓN PARA EL PROCESO DE PURIFICACIÓN USANDO TRATAMIENTO CON ARCILLA.....	77
CUADRO 15: ESTIMADO DE COSTOS DE PRODUCCIÓN PARA DOS MÉTODOS DE PURIFICACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	78
CUADRO 16: VAN Y TIR .....	79

## Índice de Gráficas

<b>GRÁFICA 1:</b> EDAD DEL PARQUE VEHICULAR.....	7
<b>GRÁFICA 2:</b> COMPARACIÓN DE LA EMISIÓN NETA DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) PARA DIESEL DERIVADO DE PETRÓLEO Y MEZCLAS DE BIODIESEL.....	15
<b>GRÁFICA 3:</b> EFECTO DEL NIVEL DE MEZCLA DE BIODIESEL EN LA EMISIÓN DE CO <sub>2</sub> .....	16
<b>GRÁFICA 4:</b> REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DE UN TRIGLICÉRIDO.....	17
<b>GRÁFICA 5:</b> ESTRUCTURA DE FILOSILICATOS.....	21
<b>GRÁFICA 6:</b> ESTRUCTURA DE UNA ZEOLITA FAUJASITA. (B) REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DEL CUBOCTAEDRO (A), EN EL QUE APARECEN LOS ÁTOMOS DE OXÍGENO (O) Y LOS DE ALUMINIO O SILICIO (•). ESTOS CUBOCTAEDROS UNIDOS FORMAN A LA ZEOLITA FAUJASITA (C). .....	24
<b>GRÁFICA 7:</b> GRÁFICA QUE DEMUESTRA EL CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL EN EL BIODIESEL DESPUÉS DE HABERLO TRATADO CON LOS DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES. DE REFERENCIA SE UTILIZÓ EL CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL EN EL BIODIESEL SIN TRATAR. ....	56
<b>GRÁFICA 8:</b> GRÁFICA QUE DEMUESTRA EL CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE EN EL BIODIESEL DESPUÉS DE HABERLO TRATADO CON LOS DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES. DE REFERENCIA SE UTILIZÓ EL CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE EN EL BIODIESEL SIN TRATAR. ....	56
<b>GRÁFICA 9:</b> GRÁFICA QUE DEMUESTRA EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS EN EL BIODIESEL DESPUÉS DE HABERLO TRATADO CON LOS DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES. DE REFERENCIA SE UTILIZÓ EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y GLICERINA EN EL BIODIESEL SIN TRATAR. ....	57
<b>GRÁFICA 10:</b> GRÁFICA QUE DEMUESTRA EL CONTENIDO DE JABONES EN EL BIODIESEL DESPUÉS DE HABERLO TRATADO CON LOS DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES. DE REFERENCIA SE UTILIZÓ EL CONTENIDO DE JABONES EN EL BIODIESEL SIN TRATAR. ....	57
<b>GRÁFICA 11:</b> GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL EN BIODIESEL TRATADO. ....	62
<b>GRÁFICA 12:</b> GRÁFICA DE LÍNEAS PARA CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL EN BIODIESEL TRATADO. ....	63
<b>GRÁFICA 13:</b> GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE EN BIODIESEL TRATADO. ....	64
<b>GRÁFICA 14:</b> GRÁFICA DE LÍNEAS PARA CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE EN BIODIESEL TRATADO. ....	65
<b>GRÁFICA 15:</b> GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS EN BIODIESEL TRATADO. ....	67
<b>GRÁFICA 16:</b> GRÁFICA DE LÍNEAS PARA CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS EN BIODIESEL TRATADO. ....	68
<b>GRÁFICA 17:</b> GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE JABONES EN BIODIESEL TRATADO. ....	69
<b>GRÁFICA 18:</b> GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE JABONES EN BIODIESEL TRATADO. ....	70

<b>GRÁFICA 19:</b> COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD .....	71
<b>GRÁFICA 20:</b> VISTA DEL EQUIPO UTILIZADO PARA EL REFLUJO .....	104
QUE REQUIERE EL MÉTODO OFICIAL AOCS.....	104
CA 14-56, PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL. ....	104
<b>GRÁFICA 21:</b> LUEGO DEL REFLUJO DE 30 MINUTOS, LAS MUESTRAS DEBEN SER TRASLADADAS HACIA BALONES AFORADOS QUE CONTIENEN ÁCIDO ACÉTICO Y CLOROFORMO, LA SOLUCIÓN ACUOSA ES LA QUE SE UTILIZA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL POR MEDIO DEL MÉTODO YODOMÉTRICO AOCS CA 14-56. ....	105
<b>GRÁFICA 22:</b> VISTA DE LA CENTRÍFUGA UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS EN LAS MUESTRAS DE BIODIESEL TRATADAS Y SIN TRATAR. ....	106
<b>GRÁFICA 23:</b> VISTA DEL INTERIOR DE LA CENTRÍFUGA UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS, EL DIÁMETRO ES DE 23 PULGADAS, DICHO DIÁMETRO SIRVIÓ PARA DETERMINAR LAS REVOLUCIONES POR MINUTO (RPM) A LAS QUE SE HARÍA LA CENTRIFUGACIÓN POR 10 MINUTOS. ....	107
<b>GRÁFICA 24:</b> TUBO UTILIZADO PARA REALIZAR LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS (ASTM D 2709) POR CENTRIFUGACIÓN, SE PUEDE OBSERVAR LA GRADUACIÓN QUE POSEE EL MISMO PARA PODER REALIZAR LA LECTURA DIRECTA. ....	108





## Resumen

El Biodiesel es un combustible renovable que se obtiene mediante una reacción de transesterificación al mezclar aceites con un alcohol. Estos aceites pueden ser de diferentes fuentes, algunos de los más utilizados son: aceite de palma, soya, colza, y piñón. Dado que es un combustible amigable con el ambiente, tiene mucha aceptación en países desarrollados, sin embargo su uso en Guatemala aún es limitado debido a que nuestro mercado se inclina al consumo del Diesel de Petróleo por razones de precio, por tal motivo es necesario realizar investigaciones que permitan optimizar la toma de decisiones respecto a los procesos que sean mas rentables y permitan operar con costos mas bajos.

El proceso de producción del Biodiesel comprende pasos: transesterificación, decantación, y purificación. En la última etapa se remueven del Biodiesel las impurezas que pueden ocasionar daños a los motores, tales como: Glicerina, jabones, agua, y partículas.

El primer objetivo del presente trabajo fue evaluar el tratamiento de ésteres de metilo (biodiesel) mediante el uso de adsorbentes minerales para la remoción de humedad y glicerina (total, libre y combinada).

Los minerales que se utilizaron para el desarrollo de la investigación fueron bentonita, zeolitas aniónicas, zeolitas catiónicas, talco y magnesol, los cuales fueron aplicados por separado a muestras de biodiesel sin tratar y sin lavar. Para esto se realizaron mediciones iniciales de contenido de humedad y sedimentos, glicerina total y libre en muestras de biodiesel sin tratar.

Luego de aplicar el tratamiento se repitieron las mismas pruebas para poder establecer cuál de los minerales en cuestión sería el mejor para remover el contenido de glicerina total y libre, además del contenido de humedad y sedimentos. Se obtuvieron resultados favorables con la aplicación de las zeolitas, específicamente con las zeolitas catiónicas.

Adicionalmente se realizaron pruebas para determinar el contenido de jabones y catalítico (hidróxido de potasio), dichas pruebas se realizaron al inicio (biodiesel sin tratar) y al final del tratamiento con los minerales. Se pudo comprobar que el efecto de los minerales para la remoción del contenido de jabones es similar al que se observó para la remoción de glicerina total y libre. También fue posible establecer un orden entre los minerales estudiados, para lo cual se calcularon los porcentajes de remoción.

Existen diversos métodos para la purificación de Biodiesel, en este estudio se hizo una evaluación sobre la rentabilidad, costo y factibilidad de implementar dos de ellos. El primero consiste en lavados con agua, la cual por ser más afín a las impurezas anteriormente mencionadas las arrastra y por su mayor densidad se separa del Biodiesel formando dos fases, las cuales pueden separarse por decantación. Como inconveniente éste método deja remanente de agua en el Biodiesel, lo cual implica efectuar un calentamiento por arriba del punto de ebullición del agua, para garantizar su remoción. El segundo método evaluado, consiste en el uso de materiales adsorbentes, específicamente zeolitas (arcillas), que gracias a sus propiedades químicas, permite el intercambio iónico, lo cual resulta en un excelente material filtrante para las impurezas que contiene el Biodiesel. Se hizo el estudio con este mineral, ya que de antemano se había establecido que con estas arcillas se alcanzan las características técnicas óptimas, por lo que se hacía necesario estudiar el aspecto económico.

Cuando se tiene más de una alternativa en un proceso de producción es importante efectuar una evaluación económica de los proyectos de inversión de tal forma que se garantice que la decisión será acertada, asegurando la rentabilidad de la inversión.

Existen diferentes indicadores financieros que pueden aplicarse a la evaluación de procesos, los cuales toman en cuenta aspectos como: capital operativo, cuentas por pagar, intereses, impuestos, gastos operativos, etc. de tal forma que puede obtenerse un estimado del comportamiento que tendría una inversión en un lapso determinado. Para este estudio se analizaron los siguientes parámetros: Comparación del capital operativo, análisis del NOPAT (Ganancia Operativa después de impuestos), Análisis de Retorno de Inversión para los primeros 6 años de operaciones (ROIC), Análisis del Costo de Capital (WACC) y Análisis del EVA (Valor Económico Agregado). Basado en estos datos se obtuvo un Flujo de Caja Libre (Free Cash Flow FCF) que se tendría en los primeros 6 años para determinar en qué período se comienza a tener liquidez la empresa implementando ambos métodos. Utilizando los indicadores Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) se determinó cual de los dos procedimientos de purificación de Biodiesel es más recomendable.

En este estudio se consideró el costo de implementar una planta Artesanal, con capacidad de producir 500 galones de Biodiesel al día, 130,000 galones al año. Así mismo se consideró para la implementación de ambos métodos que el capital inicial provendría en su totalidad de un préstamo bancario a 36 meses con una tasa de interés anual del 11%.

Para la implementación del método de lavado con agua, se consideró la construcción de una planta de tratamiento de agua, el costo operativo de la planta y el costo de secado necesario para eliminar el agua remanente. Para la implementación del método de purificación con arcilla se consideró el costo de este material necesario para el proceso, no se consideraron costos operativos adicionales, ya que no los hay.

Del análisis de los diferentes indicadores económicos establecidos se determinó que es más rentable implementar el proceso de purificación de Biodiesel mediante el uso de zeolitas, ya que se requiere de un capital operativo menor, al tener similar margen de ganancia utilizando cualquiera de los métodos pero una inversión mucho mayor en el método de lavados con agua, la recuperación de la inversión es mejor con el método de arcillas.

Tanto el valor económico agregado, el Flujo de Caja libre, el Valor actual Neto y la tasa interna de retorno indican que es mas rentable la implementación del método de purificación con arcillas, por lo tanto es el método más recomendable, asegurando una inversión mas acertada. Además con el uso de arcillas se contribuye a conservar el recurso hídrico, el cual es vital para preservar el ambiente.

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, diversos factores tales como el calentamiento global y la escasez de petróleo han generado un creciente interés en fuentes alternativas de energía.

La calidad del aire y el consumo de combustibles ha sido tema de estudio y preocupación para los ambientalistas, ya que a mediados de los años noventa se hizo un estudio en el cual se determinó que el parque automotor representa un 70% de la polución al aire. El sector industrial ha empezado a hacer algunas modificaciones para proteger la calidad del aire. En el caso del parque automotor resulta difícil hacer cambios para lograr minimizar la emisión de gases contaminantes, una acción correctiva es lograr mantener la flota de vehículos lo más reciente posible, ya que los motores nuevos contaminan menos que los motores que ya rebasan los cien mil o ciento cincuenta mil kilómetros de recorrido el motor.

Una propuesta es la utilización de biocombustibles, dentro de los cuales destaca el Biodiesel, la combustión del mismo es menos contaminante que cualquier otro combustible derivado del petróleo, ya que la contaminación por  $\text{SO}_2$  disminuye en un 100%, las partículas suspendidas en el aire (TPS,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ) se ven disminuidas en un 40%. La reducción global de  $\text{CO}_2$  es de 16 a 78,4% para B20 y B100, respectivamente. La ventaja medioambiental de tipo global del Biodiesel es el cierre del ciclo de vida del  $\text{CO}_2$  (emisión nula), pues las plantas oleaginosas por medio del proceso de fotosíntesis toman este gas y lo transforman en oxígeno

El Biodiesel es un combustible producido a partir de fuentes renovables que cada vez se usa más, debido a que se puede usar en motores diesel sin modificaciones.

Guatemala no es un país productor de combustibles derivados del petróleo por lo que depende directamente de la producción internacional, el Biodiesel por tanto puede convertirse en una forma de independencia energética.

Sin embargo una de las principales causas para que el Biodiesel no se posicione en el mercado es que no tiene un precio competitivo, debido básicamente a su alto costo de producción, por lo cual se hace necesario buscar maneras de reducir dichos costos.

El Biodiesel es el resultado de una transesterificación de aceites vegetales o grasa animal, dicha transesterificación se hace con metanol en medio alcalino, como resultado se obtienen los ésteres metílicos (Biodiesel) y como subproducto se obtiene glicerina, la cual puede quedar mezclada con el Biodiesel y provocar daños en los motores. Para eliminar el exceso de glicerina existen diferentes alternativas, una de ellas es mediante lavados con agua, otra utilizando medio adsorbentes y la tercera es por métodos físicos (centrifugación). En apariencia el lavado con agua es el método más económico, ya que aprovecha la característica hidrofílica de la Glicerina, sin embargo genera un remanente de humedad en el Biodiesel, que causa serios problemas en los motores, por lo que se hace necesario un procedimiento adicional de secado, éste aunado al tratamiento posterior que debe darse a las aguas de lavado, elevan considerablemente el costo de producción.

La prueba de eliminación de agua (humedad) se realizó con minerales adsorbentes como zeolitas, bentonitas, y talco. Dichos minerales, son arcillas que poseen alta capacidad de adsorción, la cual es la característica que más interesa en este trabajo para poder eliminar el contenido de agua del Biodiesel. Se efectuó una prueba también con Magnesol®, el cual es un silicato de magnesio sintético que posee un superficie de adsorción considerablemente grande, la cual puede ser de hasta 700 metros cuadrados por gramo, dicha capacidad de adsorción es muy importante para la eliminación de humedad del Biodiesel.

La segunda alternativa consiste en la remoción de los subproductos de reacción del Biodiesel, mediante materiales adsorbentes que por sus características polares retienen selectivamente a los contaminantes no deseados. Estos materiales implican un costo directo en la producción, por lo cual con este trabajo se pretende establecer cual de los dos métodos es mas rentable para la producción de Biodiesel.





# 1. Antecedentes

## 1.1 PERSPECTIVAS PARA EL BIODIESEL EN GUATEMALA

### 1.1.1. Características socio-económicas del país

El país tiene una población de alrededor de 12,7 millones de personas, con la mitad en zonas urbanas y con una densidad de población intermedia. Los indicadores sociales muestran los grandes desafíos a superar: el PIB per cápita aún no es elevado, existe alto porcentaje de pobreza en general y en especial en la zona rural, el porcentaje de la población que vive con menos de dos dólares americanos por día es elevado y creció del 2000 al año 2002. Los gastos públicos sociales como porcentaje del PIB aún son bajos. El cuadro 1 muestra estos indicadores sociales y de uso de tierras.

**Cuadro 1:** Indicadores socio-económicos y de usos de tierras

#### GUATEMALA: INDICADORES SOCIO-ECONÓMICOS Y DE USO DE TIERRAS

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Población 1 000 personas	11 225	11 501	11 788	12 084	12 389	12 700
PIB per cápita	1 718	1 716	1 712	1 705	1 709	1 720
Población urbana %	43	ND	ND	ND	ND	50
Población rural %	57	ND	ND	ND	ND	50
%pobreza – nacional	ND	ND	60,2	ND	ND	ND
% pobreza – rural	ND	ND	68	ND	ND	ND
% población <2 US\$/día	21,74	ND	32,6	ND	ND	ND
Gasto público % PIB	5,8	6,5	6,3	6,7	6,1	ND
Superficie terrestre – 1 000 ha	10 843	10 843	10 843	10 843	10 843	10 843
Personas / ha	1,04	1,06	1,09	1,11	1,14	1,17
Superficie agrícola – 1 000 ha	4 507	4 507	4 507	4 507	4 507	4 507
Superficie arable – 1 000 ha	1 360	1 360	1 360	1 360	1 360	1 360
Área cosecha permanente - 1000 ha	545	545	545	ND	ND	ND
Área ganadera – 1 000 ha	2 602	2 602	2 602	2 602	2 602	2 602
Bovinos 1 000 cabezas	1 100	1 144	1 173	1 208	1 232	1 257
Cabezas / ha	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48
Área de bosques – 1 000 ha	4 208	ND	ND	ND	ND	3938
Proporción de bosques	38,8	ND	ND	ND	ND	36,3

Fuente: CEPALSTAT: Siagro y Badeinso.

La ocupación de la tierra muestra que gran parte del suelo está formado por bosques y forestas (36,3%) en áreas protegidas; la superficie restante es usada en áreas de cosecha permanente (5% del total), otras superficies arables (12,5%) y uso para ganadería extensiva (24%) con pocas cabezas de bovinos por hectárea.

El cuadro 2 presenta las condiciones del balance comercial y de la deuda externa del país.

**Cuadro 2:** Condiciones del balance comercial y de la deuda externa de Guatemala.

GUATEMALA: BALANCE COMERCIAL TOTAL Y DEUDA EXTERNA

Deuda externa	2000	2001	2002	2003	2004	2005
(Millones de US\$)	2 165	2 549	2 773	3 150	3 609	3 508
(% PIB)	11,2	12,4	11,9	12,8	12,9	10,9
Balance Comercial total	2000	2001	2002	2003	2004	2005
(Millones de US\$)	-1 707,9	-2 165,3	-2 892,7	-3 183,3	-3 875,0	-4 466,3

Fuente: CEPALSTAT.

El balance comercial es negativo y creciente en todo el período presentado. El saldo de la deuda externa creció hasta el 2004 y se redujo un poco en el último año (2005). Así, el saldo de la deuda externa como fracción del PIB también se redujo del 2004 para el 2005. De los países centroamericanos, Guatemala es el que posee la menor relación entre deuda externa y el PIB.

### 1.1.2. El uso agrícola de las tierras

El cuadro 3 muestra los cultivos que ocupan mayores extensiones de tierras en Guatemala. Las mayores son de maíz, café, frijol y caña de azúcar, todas con más de 100.000 hectáreas. Tres cultivos no tradicionales y destinados a exportación también se destacan: cardamomo, hule y ajonjolí que ya ocupan más

áreas que los cultivos tradicionales como arroz o banano. La palma africana y el ajonjolí son oleaginosas y pueden ser empleadas como materias primas para biodiesel, a pesar que el ajonjolí tiene precios más interesantes en el mercado de semillas.

**Cuadro 3:** Mayores extensiones de cultivos

GUATEMALA: MAYORES EXTENSIONES DE TIERRAS PARA COSECHAS  
(Miles de hectáreas)

Cosecha	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Maíz	591,9	601,0	601,0	601,0	588,9	577,1
Café	262,3	262,0	262,1	262,1	264,7	267,3
Frijol	215,9	215,9	215,9	215,9	231,8	211,6
Caña de azúcar	165,5	184,9	184,9	184,9	184,9	184,9
Cardamomo	48,9	53,9	62,9	63,6	68,5	69,2
Hule (caucho)	34,7	38,2	38,2	40,9	45,0	51,8
Ajonjolí	48,9	52,4	50,3	50,3	48,3	43,3
Banano	39,4	35,4	36,6	36,6	37,0	37,3
Palma africana	23,5	27,4	31,0	31,0	31,0	31,0
Sorgo	26,0	26,0	26,0	26,2	26,6	26,9
Papa	12,6	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
Melón	6,9	11,9	13,0	13,1	13,3	13,6
Arroz	11,9	11,9	11,9	12,2	12,2	12,2
Plátano	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Mango	8,5	11,7	11,7	11,8	11,8	11,9
Tomate	6,6	6,3	7,0	7,0	9,2	9,2
Aguacate	5,5	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Tabaco	9,8	8,4	7,8	7,7	7,1	7,0

Fuente: Banco de Guatemala, 2006

**1.1.3. Matriz energética y mercado de hidrocarburos**

Algunos indicadores energéticos de Guatemala se muestran en el cuadro 4. El país tuvo un consumo total de energía alrededor de 50,5 millones de barriles equivalentes de petróleo (BEP) en 2004. El consumo total de energía por habitante está alrededor de 4,1 BEP por habitante por año y la intensidad energética es de 2,6 BEP por millón de dólares de PIB.

**Cuadro 4:** Indicadores energéticos

## GUATEMALA: INDICADORES ENERGÉTICOS

Indicador energético	Valor	Unidad
Consumo total de energía	50,53	Millones de BEP
Consumo de electricidad	7 009	GWh
Capacidad eléctrica instalada	2 016	MW
Grado de electrificación	82	%
Consumo de derivados de petróleo	22,30	Millones de barriles
Capacidad de refinación de petróleo	---	Barriles / día
Consumo total de energía per cápita	4,1	BEP / habitante
Intensidad energética promedio	2,6	BEP / millones de US\$ PIB

Fuente: OLADE 2005.

Para energía eléctrica, el consumo fue de 7009 GWh y para derivados de petróleo de 22,3 millones de barriles. La capacidad eléctrica instalada es de 2.016 MW, de los cuales 1.352 MW son termoeléctricos, 682 MW hidroeléctricos y 29 MW geotérmicos. Existe aún cogeneración con bagazo de caña que vende sus excedentes para la red nacional.

Guatemala es el único país de América Central con producción propia de petróleo con explotación de la cuenca del Petén y con producción anual de 6728 miles barriles en el año de 2005. Existe una pequeña refinería de producción de petróleo en la región pero no produce derivados acabados sino corrientes para mezcla y formulación de productos finales. Los derivados son importados. El cuadro 5 presenta el balance de petróleo para Guatemala. El consumo de fuel oil para generación eléctrica corresponde al 74% y los 26% restantes son empleados en industrias.

**Cuadro 5:** Balance de derivados del petróleo

GUATEMALA: BALANCE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO, 2005  
(Miles de barriles)

	Producción	Importación	Consumo	Exportación
Petróleo	6728	25	1 809	5 976
GLP	0	3 366	2 699	32
Gasolinas	0	7 422	7 024	19
Kero / Jet	0	660	614	0
Diesel	0	8 788	8 550	19
Fuel oil	0	3 295	4 521	2
Otros	0	120	406	194

Fuente: CEPAL, 2006 L738.

El consumo de gasolinas y diesel está detallado para los años 2004-2006 en el cuadro 6 en miles de barriles y en miles de litros. Llama la atención que la gasolina súper posee un volumen de ventas que es casi el doble de la gasolina regular. A su vez, el consumo de diesel es casi el doble del consumo de gasolina súper y mayor que la suma de los volúmenes de gasolina súper con gasolina regular.

**Cuadro 6:** Ventas de combustibles

GUATEMALA: VENTAS TOTALES DE GASOLINA REGULAR Y DIESEL, 2004-2006

		Gasolina Súper	Gasolina Regular	Diesel
2004	1 000 barriles	4 389,3	2 334,5	7 794,9
	1 000 litros	697 894	371 187	1 239 388
2005	1 000 barriles	4 495,3	2 496,7	8 549,7
	1 000 litros	714 759	396 982	1 359 405
2006	1 000 barriles	4 740,5	2 555,9	8 719,9
	1 000 litros	753 737	406 381	1 386 469

Fuente: MEM/DGH, 2007.

En el cuadro 7 están indicados los precios promedio al consumidor en dólares americanos, para la gasolina súper, la regular y el diesel, para las dos modalidades de comercialización que se encuentran en las estaciones de servicio,

servicio completo o autoservicio. En Guatemala existe libertad de precios en toda la cadena de distribución y ventas al por menor. Entonces, los precios indicados son promedias mensuales para el mercado. Como en este período hubo considerable incremento en el precio del petróleo (y, por tanto, de sus derivados), esto se reflejó en los precios al consumidor. En el final del período, los precios caen un poco.

**Cuadro 7:** Precios al consumidor de combustibles

PRECIOS AL CONSUMIDOR DE GASOLINAS Y DIESEL  
(US\$ / galón)

	Servicio Completo			Autoservicio		
	Super	Regular	Diesel	Super	Regular	Diesel
Enero 2004	2,01	1,95	1,44	1,97	1,92	1,41
Abril 2004	2,31	2,26	1,57	2,28	2,23	1,53
Julio 2004	2,41	2,35	1,58	2,38	2,32	1,55
Octubre 2004	2,50	2,44	2,03	2,46	2,40	2,01
Enero 2005	2,46	2,39	2,05	2,42	2,35	2,02
Abril 2005	2,88	2,82	2,37	2,85	2,78	2,35
Julio 2005	2,93	2,86	2,27	2,89	2,83	2,25
Octubre 2005	3,58	3,51	2,69	3,53	3,46	2,66
Enero 2006	2,98	2,91	2,61	2,94	2,87	2,58
Abril 2006	3,23	3,16	2,59	3,18	3,12	2,55
Julio 2006	3,51	3,44	2,74	3,47	3,40	2,71
Octubre 2006	3,26	3,19	2,62	3,22	3,15	2,60
Diciembre 2006	3,05	2,99	2,48	3,02	2,95	2,46

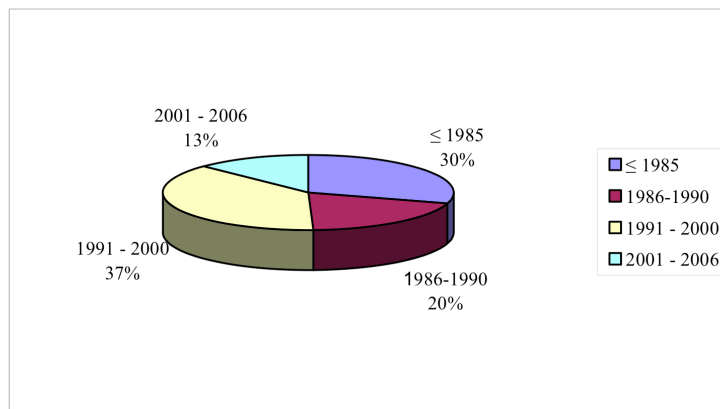
Fuente: MEM/DGH, 2007

Los combustibles derivados del petróleo poseen un impuesto a la distribución (IDP) que afecta a la gasolina súper en Q.4,70/galón (US\$ 0,6144), la gasolina regular en Q. 4,60/galón (US\$ 0,6013) y el diesel en Q.1,30/galón (US\$ 0,17).

El parque vehicular es de aproximadamente 1,7 millones de vehículos, de los cuales alrededor de 75% usan gasolina y 25% usan diesel. Las importaciones de vehículos usados corresponden a un 75% de las importaciones y la edad promedio del parque vehicular se presenta en la gráfica 1.

**GRÁFICA 1: EDAD DEL PARQUE VEHICULAR**

**GUATEMALA: EDAD DEL PARQUE VEHICULAR**



Fuente: MEM, 2007.

#### **1.1.4. La producción de biodiesel hoy**

Existen hoy cuatro empresas que producen biodiesel en Guatemala aunque en pequeña escala, y una empresa que produce aceite de palma tratado para uso en motores. Las empresas son Guatebiodiesel, ubicada en Ciudad de Guatemala con capacidad para producir de 1.500 a 2.000 galones/día de biodiesel (5.680 a 7.570 litros/día); Octagon, ubicada en Ciudad de Guatemala con capacidad de 3.000 galones/día de biodiesel (11.300 litros/día); la Fuerza Verde, también ubicada en Ciudad de Guatemala con capacidad para producir 50 galones/día (190 litros/día) de biodiesel; la Comunidad Nueva Alianza, ubicada en El Palmar, Quetzaltenango con capacidad para 50 galones/día (190 litros/día) de biodiesel y la Helios, ubicada en Zacapa (Oriente) y con capacidad para producir 290 galones/día (1.090 litros/día) de aceite de palma tratado para uso en motores (no hace la transesterificación).

Desde el punto de vista del proceso de producción, las cuatro empresas que producen biodiesel realizan la neutralización de la materia prima (cuando se emplean aceites usados o grasa animal). La reacción de transesterificación la hacen en una sola etapa la Fuerza Verde, la Comunidad Nueva Alianza y

Octagon, mientras que la Guatebiodiesel hace la reacción en dos etapas. Para purificación del producto emplean lavado con agua y posteriormente secan el biodiesel. A excepción de la Octagon, las demás empresas aún no hacen la recuperación del metanol por motivos de escala de producción actual. El subproducto de la reacción, la fase de glicerina que contiene aún impurezas, agua y metanol, no es tratada y no tiene mercado en Guatemala. Los productores afirman que están almacenando esta fase pero una solución definitiva para este problema debe aún ser desarrollada.



## 2. Marco Teórico

### 2.1 Historia de los motores Diesel

En 1895 el Dr. Diesel desarrolló un motor que fue diseñado para operar con combustibles provenientes de aceites vegetales como aceite de manía. Diesel realizó una demostración en una exposición mundial en el año 1900. Luego de la muerte de Diesel (1913) el motor que él inventó fue modificado para operar con Kerosene (derivado del petróleo) el cual era un producto muy accesible por su bajo costo para ese entonces. (1)

La característica principal que define al motor Diesel, es lo que dio lugar a su diseño, ya que se pretendía obtener un rendimiento superior al de un motor de gasolina, para ello se pensó en utilizar una relación volumétrica de compresión muy elevada, que en el motor de gasolina no se puede usar, ya que provocaría un incendio. (17)

Los motores Diesel actuales se emplean relaciones de compresión comprendidas entre 14:1 y 23:1. Mientras que el motor gasolina emplea entre 8:1 y 10:1. En el motor Diesel se pueden conseguir alcanzar estos altos grados de compresión debido a que en el cilindro se aspira y se comprime sólo aire, en lugar de mezcla de combustible y aire que se encendería y la explosión sería antes del final de la compresión. El combustible se introduce separadamente en el cilindro, poco antes del final de la carrera de compresión, y se mezcla con el aire comprimido en el interior del cilindro. (17)

## 2.2 Biodiesel

El Biodiesel es un combustible elaborado a partir de aceites vegetales como maíz, algodón, soya, girasol entre otros; también se puede producir a partir de grasas animales como sebo y tocino. Dicho combustible es apto para sustituir parcial o totalmente al diesel y no requiere ninguna modificación en los motores.

(1)

Químicamente el Biodiesel es una serie de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos naturales. El Biodiesel es 100% biodegradable, su toxicidad es inferior a la de la sal de mesa<sup>1</sup> y su combustión, dependiendo del aceite que se use, produce un olor similar a fritura de papas o galletas dulces. (1)

La producción de Biodiesel no se ha centrado en un solo país o un solo continente, en todos los continentes ya se está produciendo Biodiesel con el fin de tener una alternativa ante las crisis que se han tenido y que actualmente se están viviendo.

A continuación se mencionan algunos países que han sobresalido por la investigación realizada en la producción de Biodiesel:

**Sudáfrica**, inició sus experimentos antes de la Segunda Guerra Mundial, dichos experimentos fueron abandonados para dedicarse a la producción de combustibles derivados de petróleo. En 1980, durante el Congreso de Investigación Científica e Industrial (CSIR<sup>2</sup>) se consideró la idea de producir

---

<sup>1</sup> Puede causar vómitos por ingesta de cantidades muy grandes, irrita la piel si se expone a cantidades muy grandes, por exposición crónica no hay datos de toxicidad. (21)

<sup>2</sup> CSIR: Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, Sudáfrica.

combustible a partir de aceites vegetales. El proyecto de investigación del CSIR comenzó con la utilización de aceite de girasol, sin embargo, se tuvo inconvenientes porque el combustible presentó vaporización inapropiada y además éste escurrió y se mezcló con el aceite lubricante dentro del motor. La disolución a los problemas fue producir ésteres de etilo, o sea, hacer una transesterificación. (1)

Los resultados de las pruebas iniciales fueron positivos y produjeron aproximadamente 500 litros de ésteres de etilo (Biodiesel), hicieron pruebas en motores de tractores que operaban con diesel, presentándose problemas mínimos, también hicieron otro tipo de pruebas para evaluar la estabilidad del producto y los resultados fueron publicados en varias revistas científicas. Para 1984, el Departamento de Agricultura de Sudáfrica, dio por cancelado el proyecto justificando que no era rentable. (1)

En Europa, el líder es **Alemania** en cuanto a la producción de Biodiesel se refiere, ya que producen anualmente 650,000 toneladas métricas (185 millones de galones). En principio el Biodiesel alemán tuvo usos únicamente en la maquinaria para la agricultura; en la actualidad el Biodiesel en Alemania es utilizado en automóviles, maquinaria forestal, diversos tipos de botes y otros tipos de equipos. (1,3)

El segundo país europeo en producción de Biodiesel es **Francia**, con una producción de 360,000 toneladas métricas (104 millones de galones). Entre los años 1993 a 1999, Francia tuvo el liderato en producción, sin embargo, Alemania tomo ese lugar desde el año 2000. En Francia se han promovido dos tipos de combustibles renovables, etanol y Biodiesel. Tomando estos dos, representan un 1 % del consumo de combustible en Francia. (1)

Francia produce ligeramente tres veces más Biodiesel que etanol y esa es la razón por la cual se está fabricando cerca del 70 % vehículos que operan con diesel. (1)

Otros países que están produciendo Biodiesel pero en cantidades mucho menores son:

Italia (60 millones de galones al año)

Austria (7 millones de galones al año)

República Checa (50,000 toneladas al año)

El resto de países aún están en investigaciones para posteriormente producir Biodiesel. (1)

Otros países que no pertenecen al continente Europeo como **Tailandia**, tiene un programa activo de Biodiesel desde el año 2001. **China**, tiene registros de pruebas realizadas con aceite vegetal y aceites transesterificados entre los años 1991 y 1994. **Filipinas**, utilizó aceite de coco durante la Segunda Guerra Mundial, han hecho investigación con combustibles renovables desde la década de 1970.

En **Indonesia**, para contrarrestar la contaminación del aire se anunció en Enero de 2004 un plan para desarrollar el Biodiesel como una alternativa al petrodiesel<sup>3</sup>. (1)

**Brasil**, es el pionero en promover el uso del Biodiesel en Sur América. En **Paraguay**, se importan todos los combustibles derivados del petróleo, sin embargo, en Octubre del año 2000, el Viceministro de Energía y Minas anunció

---

<sup>3</sup> Petrodiesel: diesel obtenido por destilación del petróleo crudo.

una iniciativa con el Biodiesel. **Colombia** tiene planeado construir una planta de Biodiesel con una capacidad de producción de 60,000 galones para Bogotá. (1,5)

En Centroamérica, **Nicaragua** ha hecho estudios con resultados satisfactorios utilizando aceite de jatropha, dichos estudios han sido desarrollados con ayuda del programa Austriaco. (1)

En **Canadá**, los combustibles alternativos fueron implementados el 1 de Abril de 1997. El propósito principal fue para incrementar el uso de transporte que opera con combustibles alternativos. (1, 2)

En los **Estados Unidos**, la investigación en el tema de los combustibles renovables se ha desarrollado en varios estados, iniciando en la Universidad de Idaho en 1979, sin embargo los experimentos fueron enfocados principalmente para usar el producto en tractores. En 1989, el Dr. Thomas Reed quien estuvo en La Escuela de Minas de Colorado (Colorado School of Mines), investigó sobre la transesterificación para producir Biodiesel y en su primer experimento consiguió producir un galón de Biodiesel a partir de aceite usado en un restaurante de la cadena McDonald's. Reed continuó con sus experimentos siempre con aceites usados, inclusive produjo Biodiesel a partir de grasa de tocino. A principios de los años 90, en la Universidad de Missouri en Columbia, Leon Schumacher realizó estudios sobre nuevos usos del aceite de frijol de soya, y con financiamiento de la Estación Experimental de Agricultura (Agricultural Experiment Station) inició la producción de Biodiesel. (1,3)

## **2.3 Usos del Biodiesel**

Prácticamente el Biodiesel puede ser utilizado en todos los motores que operan con petrodiesel, tal es el caso de automóviles (sin necesidad de hacer alguna modificación en el motor), sin embargo, el único problema que se ha presentado es que el Biodiesel actúa como un disolvente y ataca a las partes blandas de hule que los motores diesel poseían hasta el año 1994, desde este hasta la fecha los motores diesel están siendo fabricados con el fin de operar con Biodiesel, es decir, han eliminado cualquier pieza que pueda ser atacada por la actividad del Biodiesel; de hecho la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales<sup>4</sup> aprobó en el año 2001 un nuevo estándar para el Biodiesel (ASTM D 6751), el cual cubre al Biodiesel puro que se conoce como B100 y también a la mezcla que comúnmente se hace con petrodiesel conocida como B20, el cual implica que el un galón de B20 debe contener el 20 por ciento en peso de Biodiesel y el resto de petrodiesel. (1, 4)

El Biodiesel puede ser utilizado en trenes, botes (barcos), tractores y maquinaria agrícola, equipo para granjas, equipos para generar energía eléctrica. Se han hecho también experimentos para introducir el Biodiesel en todo lo relacionado con la aviación tanto civil como militar. También se puede emplear en los equipos para calefacción. (1)

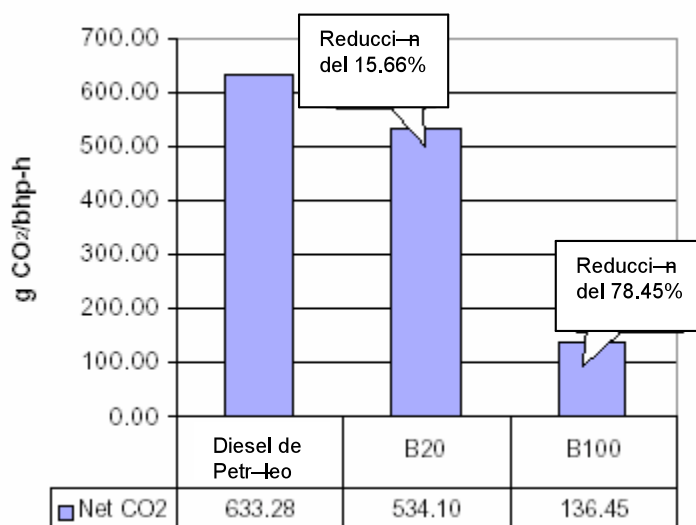
## **2.4 Beneficios de la utilización de Biodiesel**

Provee un buen mercado para la producción de aceites vegetales y grasas animales. También disminuye la dependencia de los países de tener que importar derivados del petróleo. Es un combustible renovable que no contribuye al efecto

---

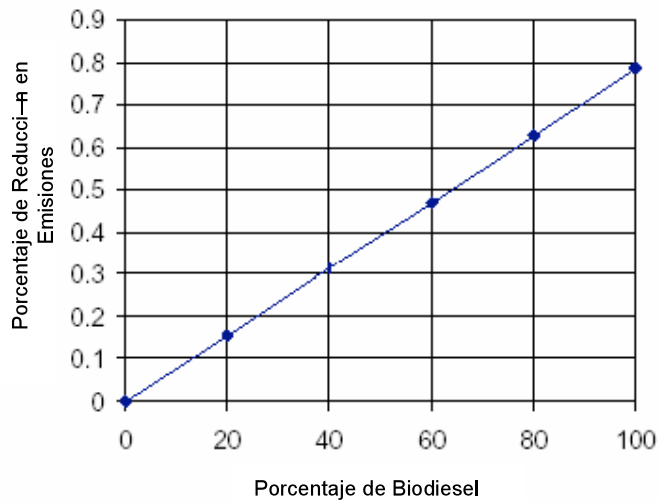
<sup>4</sup> ASTM: American Society for Testing and Materials.

invernadero de todo el globo terrestre, ya que La reducción global de CO<sub>2</sub> es de 16 a 78,4% para B20 y B100 respectivamente. La ventaja medioambiental de tipo global del Biodiesel es el cierre del ciclo de vida del CO<sub>2</sub> (emisión nula), pues las plantas oleaginosas por medio del proceso de fotosíntesis toman este gas y lo transforman en oxígeno. (22) Su combustión presenta una reducción sustancial de emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar ni material particulado en el aire. La combustión del Biodiesel produce emisiones no tóxicas y biodegradables, por ejemplo, se produce dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que es utilizado por las plantas en el proceso de fotosíntesis. Las emisiones de hollín se ven reducidas hasta en un 40% y el dióxido de azufre se reduce en un 100%. (1)



**GRÁFICA 2:** COMPARACIÓN DE LA EMISIÓN NETA DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) PARA DIESEL DERIVADO DE PETRÓLEO Y MEZCLAS DE BIODIESEL

16)



**GRÁFICA 3:** EFECTO DEL NIVEL DE MEZCLA DE BIODIESEL EN LA EMISIÓN DE CO<sub>2</sub>.

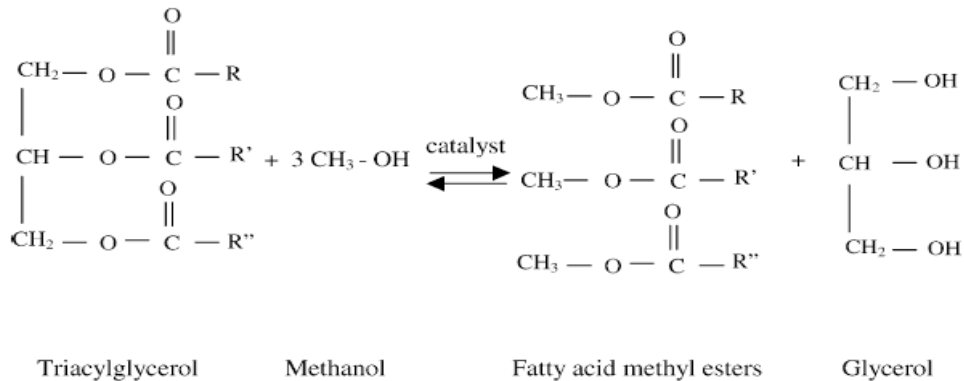
(16)

## 2.5 Química del Biodiesel

La reacción básica en la producción de Biodiesel es una transesterificación, en la cual ocurre una sustitución nucleofílica en el grupo carbonilo del triglicérido (aceite vegetal o grasa animal), dicha sustitución se realiza con un alcohol que generalmente es metanol (algunas veces se usa etanol) y la reacción se lleva a cabo en medio alcalino (como catalítico), se prefiere el uso de hidróxido de potasio (KOH) debido a su alta reactividad. (12)



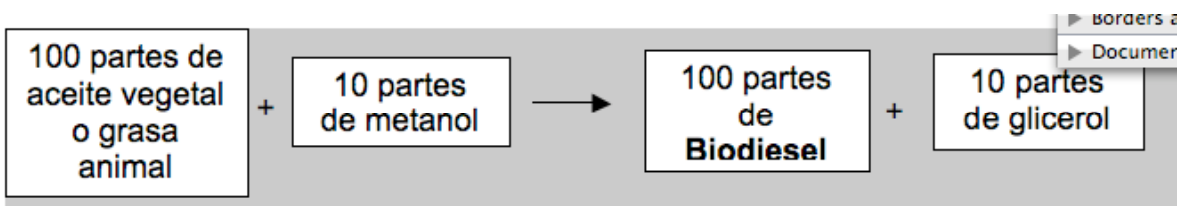
La reacción general de transesterificación de un triglicérido es la siguiente:



GRÁFICA 4: REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DE UN TRIGLICÉRIDO

El proceso de transesterificación debe llevarse a cabo en un recipiente que sea completamente cerrado, esto para evitar pérdidas de alcohol, además se puede efectuar a temperatura ambiente, sin embargo, es preferible hacer la reacción a altas temperaturas para acelerar la producción de Biodiesel. (13)

La estequiometría es la siguiente:



Los litros de Biodiesel que se obtienen por hectárea, dependerán del cultivo que da origen al aceite vegetal:

- Soja (*Glicine max*): 420 litros
- Arroz (*Oriza sativa*): 770 litros
- Tung (*Aleurites fordii*): 880 litros
- Girasol (*Helianthus annuus*): 890 litros

- Maní (*Arachis hipogaea*): 990 litros
- Colza (*Brassica napus*): 1100 litros
- Ricino (*Ricinus communis*): 1320 litros
- Jatrofa (*Jatropha curcas*): 1590 litros.
- Aguacate (*Persea americana*): 2460 litros
- Coco (*Cocos nucifera*): 2510 litros
- Cocotero (*Acrocomia aculeata*): 4200 litros
- Palma (*Elaeis guineensis*): 5550 litros (13)

## 2.6 Aceite de palma

El aceite de palma puede tener color amarillo claro hasta naranja dependiendo de la cantidad de carotenoides presentes. El aceite de palma puede ser separada en dos fracciones considerablemente grandes: aceite líquido (65 a 70%) que es oleína de palma (punto de fusión de 18 a 20°C) y fracción sólida (35 a 30%) que es estearina (punto de fusión de 48 a 50°C).

Propiedades	Aceite de palma	Oleína de palma	Estearina de palma
Punto de fusión (°C)	34.2	21.6	44.5 - 56.2
Densidad relativa (50°C/agua a 25°C)	0.89 - 0.92	0.91 - 0.92	0.88 - 0.89
Índice de refracción ( $\eta$ )	1.46	1.47	1.45
Humedad e impurezas (%)	0.1	0.1	0 - 0.15
Índice de Yodo	47.0 - 55.83	55.0 - 61.54	21.6 - 49.4
Índice de saponificación (mg KOH/g)	196 - 208.2	189 - 198.0	193 - 206
Materia insaponificable (%)	0.01 - 0.5	0.001 - 0.5	0.1 - 1.0

**Cuadro 8:** Tabla de Propiedades fisicoquímicas del aceite de palma y sus fracciones.

### 2.6.1 Composición química del aceite de palma

La diferencia principal del aceite de palma con respecto a otros aceites es el alto contenido de ácido palmítico, en la tabla No. 2 se hace una comparación de las fracciones del aceite de palma.

Ácido graso	Aceite de palma	Oleína de palma	Estearina de palma
Láurico 12:0	0–0.2	0.1–0.2	0.1–0.2
Mirístico 14:0	0.8–1.3	0.9–1.0	1.0–1.3
Palmítico 16:0	43.1–46.3	39.5–40.8	46.5–68.9
Palmitoleico 16:1	Trazas–0.3	Trazas–0.2	Trazas–0.2
Esteárico 18:0	4.0–5.5	3.9–4.4	4.4–5.5
Oleico 18:1	36.7–40.8	42.7–43.9	19.9–38.4
Linoleico 18:2	9.4–11.9	10.6–11.4	4.1–9.3
Linolénico 18:3	0.1–0.4	0–0.4	0.1–0.2
Araquídico 20:0	0.1–0.4	0.1–0.3	0.1–0.3
Saturados	50.2	45.8	52.1–76.2
Monoinsaturados	39.2	42.5	19.9–38.6
Poliinsaturados	10.5	11.6	4.2–9.5

**Cuadro 9:** Composición de ácidos grasos en aceite de palma y sus fracciones.

### 2.7 Presencia de agua en Biodiesel

Cantidades considerables de agua en cualquier combustible tienden a ocasionar fallas en el manejo del combustible en las estaciones de servicio (gasolineras) y también en un quemador o un motor. Además el agua puede provocar corrosión en los tanques de almacenamiento, equipos y si existen detergentes pueden provocar emulsiones, la cuales dan un aspecto lechoso al combustible. El Biodiesel puede contener agua después de los lavados con agua para la eliminación de glicerina, también puede formar algún tipo de emulsión después de realizar los lavados. La norma ASTM D6751 establece que el contenido de agua en el Biodiesel no debe ser mayor a 0.050% en volumen. (14)

## 2.8 Contenido de glicerina total y libre en Biodiesel

La cantidad de glicerina libre y combinada en el Biodiesel refleja la calidad del mismo. Un alto contenido de glicerina libre puede causar problemas durante el almacenamiento, o en estaciones de servicio (gasolineras), debido a la separación de la glicerina. Un alto contenido de glicerina total puede conducir a fallas en los inyectores y también puede provocar incrustaciones en los inyectores, pistones y válvulas; las incrustaciones aparecen porque la glicerina por las altas temperaturas se incendia y no llega a la cámara de combustión en forma de gas. La norma ASTM D6751 establece que el contenido de glicerina residual no debe ser mayor al 0.02% y para la glicerina total 0.24% (15)

## 2.9 Minerales adsorbentes

### 2.9.1 Arcillas

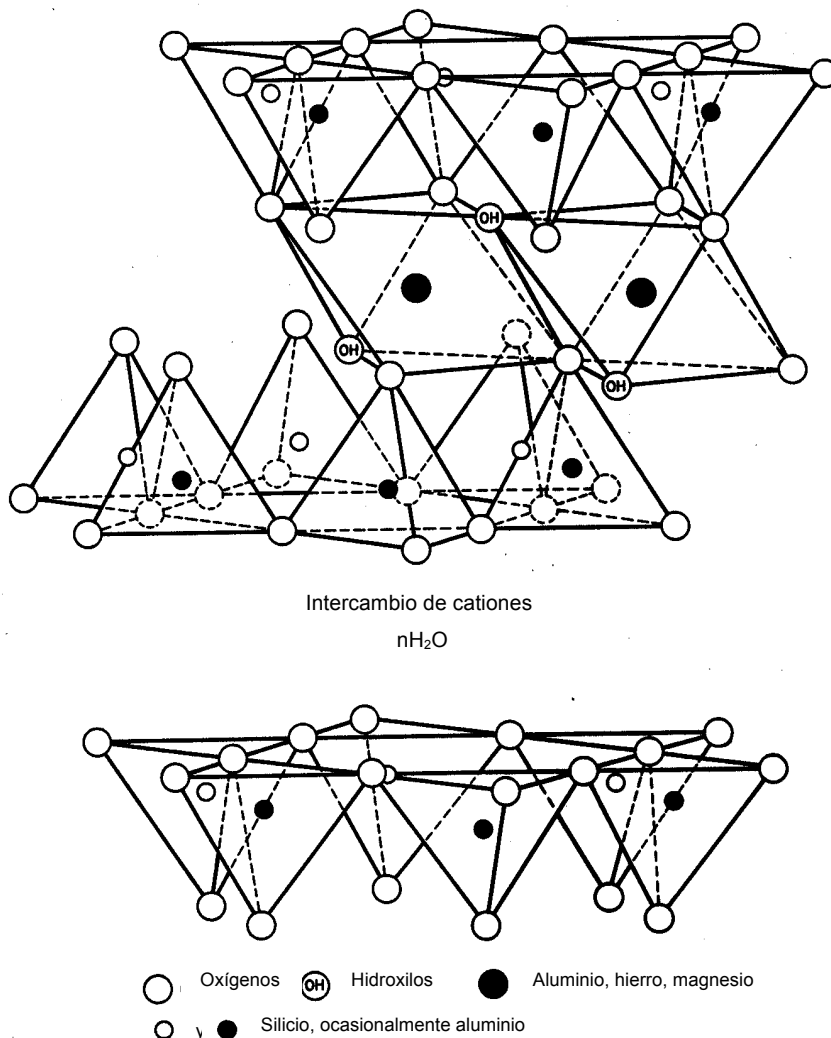
Las arcillas desde el punto de vista petrológico<sup>5</sup> son rocas sedimentarias y mineralógicamente son en su mayoría filosilicatos. Los filosilicatos presentan una estructura basada en hojas o apilamiento de planos de iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) y oxígeno. Los grupos tetraédricos  $(\text{SiO})_4^{4-}$  se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ , que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ , ver figura No.4. (10)

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos átomos de  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ , pueden estar sustituidos por átomos de  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$  y más raramente por  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+4}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  o  $\text{Zn}^{+2}$ .

---

<sup>5</sup> Petrología es el estudio sistemático de las rocas, especialmente de su origen. (19)

El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encuentran sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos  $(OH)^-$  de la capa brucítica o gibbsítica, de forma que, en este plano, quede un  $(OH)^-$  en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los  $(OH)^-$  son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros. Dentro de los filosilicatos más comunes se puede mencionar, el caolín y el talco. (10)



**GRÁFICA 5:** ESTRUCTURA DE FILOSILICATOS

Lo más importante de los filosilicatos desde el punto de vista agrícola es la liberación y retención de nutrientes de las plantas, la acumulación de agua en los suelos de las estaciones húmedas a secas y la accesibilidad del suelo a los gases atmosféricos, esto es debido a que son silicatos hojosos (laminares). (10)

### **2.9.2 Zeolitas**

Las zeolitas son arcillas compuestas de aluminio, silicio, y oxígeno. Se halla en una variedad de regiones del mundo donde la actividad volcánica prehistórica ocurrió cerca del agua, o donde el agua ha estado presente por milenios desde las erupciones. En 1756, el mineralogista<sup>6</sup> sueco Baron Axel Fredrick Cronstedt descubrió la zeolita. La zeolita tiene una porosidad natural debido a que tiene una estructura cristalina con ventanas, jaulas, y superjaulas. Las zeolitas naturales tienen ventanas de tamaño limitado (“tamaño de poro”) y todas son hidrofílicas (tienen afinidad por el agua). Algunas zeolitas sintéticas se parecen al carbón absorbente, dado que ambas pueden considerarse hidrofóbicas (tienen afinidad por los compuestos orgánicos, con poca o ninguna afinidad por el agua), y pueden adsorber vapores orgánicos con moléculas de tamaño más pequeño que el de sus poros. Tanto el carbón como la zeolita pueden adsorber agua y moléculas orgánicas; sin embargo, aquello por lo que tenga mayor afinidad, desplazará las demás moléculas. La zeolita tiene un “tamaño de poro” uniforme, lo cual hace que se le denomine “tamiz molecular”, mientras que el carbón tiene poros que se comunican con poros más pequeños que a su vez se comunican con poros todavía más pequeños *ad infinitum*. (11)

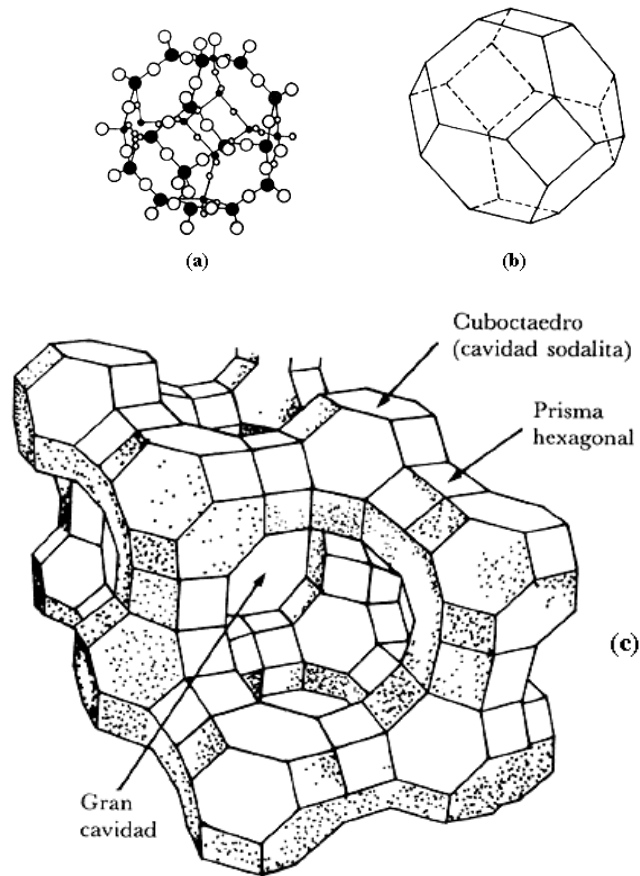
La zeolita natural existe como una roca natural, y puede alcanzar el tamaño de una roca grande. Sin embargo, los cristales de zeolita sintetizada siempre

---

<sup>6</sup> Los Mineralogistas estudian las propiedades físicas y químicas de las rocas y minerales con la finalidad de conocer su ambiente de formación y su relación con el contexto geológico y geodinámico regional

miden menos de un milímetro, esto es debido a que estos cristales crecen muy lentamente. Se han desarrollado zeolitas granulares en las cuales los granos se adhieren entre si para crear canales más grandes. (11)

La estructura de un cristal de zeolita se basa en un tetraedro que está formado por cuatro átomos de oxígeno enlazados con un átomo de silicio por medio de sus cuatro electrones de valencia. Estos tetraedros se conectan en las esquinas de los oxígenos para formar los cristales. Cuando el aluminio está presente durante la formación de los cristales, se sustituye el silicio por los átomos de aluminio, el cual tiene solamente tres electrones de valencia. El electrón de valencia que falta es proporcionado generalmente por un átomo de hidrógeno o de sodio debido a que estos elementos se encuentran típicamente en el agua hidratante. Esto distorsiona el tetraedro y hace un “sitio ácido” para el intercambio de otros iones. Esto además hace que la estructura sea hidrofílica. Si la zeolita se forma en una mezcla que contenga un catión orgánico (por ejemplo, un catión que tenga un núcleo de carbón), la estructura se puede formar alrededor del catión orgánico, utilizándolo como patrón. Esto a dado lugar a zeolitas hidrofílicas ricas en silicio con un “tamaño de poro” (o tamaño de ventana) lo suficientemente grande como para dejar pasar todo salvo las moléculas de petróleo que son más grandes. (11)



**GRÁFICA 6:** ESTRUCTURA DE UNA ZEOLITA FAUJASITA<sup>7</sup>. (B) REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DEL CUBOCTAEDRO (A), EN EL QUE APARECEN LOS ÁTOMOS DE OXÍGENO (O) Y LOS DE ALUMINIO O SILICIO (•). ESTOS CUBOCTAEDROS UNIDOS FORMAN A LA ZEOLITA FAUJASITA (C).

### 2.9.3. Características más importantes de las zeolitas

La zeolita es capaz del intercambio selectivo de iones, el cual depende de la naturaleza de las especies catiónicas, la temperatura, la concentración de las especies catiónicas en disolución, las especies aniónicas asociadas al catión en

<sup>7</sup> Faujasias: zeolitas del tipo X o Y, cuya composición química está dada por  $(M_{2/n})_n O \cdot Al_2O_3 \cdot 4.5 SiO_2 \cdot 7 H_2O$



disolución, el disolvente (la mayoría de los casos es en disoluciones acuosas, sin embargo, puede hacerse también en algunos disolventes orgánicos), las características estructurales de la zeolita en particular.

La zeolita puede adsorber moléculas en su gran área interna, siempre que puedan pasar por las ventanas. La zeolita y el carbón son iguales en este aspecto, y se diferencian solamente en el área de adsorción a la que puede tener acceso una molécula dada que pase por sus poros.

La zeolita puede ser un catalizador ácido sólido. Puede funcionar como un ácido fuerte (aunque se mantiene como un sólido) cuando la hidratación ha sustituido un hidrógeno, por un electrón de valencia adicional, o un intercambio isoelectrónico con el aluminio.

Se puede usar la zeolita como un tamiz molecular debido a que posee un tamaño de poro uniforme.

La zeolita es meta estable; quiere decir, es estable siempre que se mantenga a una temperatura y a un pH adecuados. Dentro de este rango, no se ve afectada por oscilaciones grandes de temperatura, presión, o radiación ionizante. (11)

Debido a las características que presentan éstos minerales, principalmente la capacidad de adsorber agua, se les ha seleccionado para tratar de eliminar el exceso de agua presente en el Biodiesel que ha quedado luego de los lavados para la eliminación de la glicerina residual.

#### **2.9.4. Magnesol ®**

El Magnesol® es un silicato de magnesio sintético, el cual es comparado con el carbón activado debido a la alta capacidad que posee para absorber solventes, la cual puede ir desde 300 metros cuadrados por gramo hasta 700 metros cuadrados por gramo, también es utilizado para la remoción de moléculas más pequeñas, tales como, amoníaco y sulfuro de hidrógeno. La fórmula química del Magnesol es  $MgO:SiO_2 \cdot H_2O$ , tiene un punto de fusión de  $1910^{\circ}C$ , gravedad específica de 2.1 a 2.5, es sumamente estable y como todos los silicatos, es incompatible con la presencia de ácido fluorhídrico (HF). (18)

El silicato de magnesio sintético también se conoce como Florisil, el cual es utilizado para análisis químico por cromatografía.

### **2.10 METODOS DE EVALUACION DE PROYECTOS INDUSTRIALES**

La Evaluación de proyectos Industriales, se realiza para determinar la capacidad del proyecto para cubrir todos los gastos, además obtener una rentabilidad o rendimiento para el inversionista con valores a precios de mercado. Busca como finalidad básica el lucro.

#### **2.10.1 Valor presente o actual neto ( VPN ) y Tasa Interna de Retorno (TIR)**

Valor actual neto procede de la expresión inglesa *Net present value*. El acrónimo es NPV en inglés y VAN en español. Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto.

La fórmula que nos permite calcular el Valor Actual Neto es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_F}{(1+k)^t} - I_0$$

$V_F$  representa los flujos de caja.

$I_0$  es el valor del desembolso inicial de la inversión.

$n$  es el número de períodos considerado.

El tipo de interés es  $k$ . Si el proyecto no tiene riesgo, se tomará como referencia el tipo de la renta fija, de tal manera que con el VAN se estimará si la inversión es mejor que invertir en algo seguro, sin riesgo específico. En otros casos, se utilizará el costo de oportunidad.

Cuando el VAN toma un valor igual a 0,  $r$  pasa a llamarse TIR (tasa interna de retorno). La TIR es la rentabilidad que nos está proporcionando el proyecto.

## 2.11 INDICADORES FINANCIEROS

### 2.11.1 EBIT

Del inglés "Earnings Before Interest and Taxes" se define como las ganancias antes de intereses e impuestos. Es una medida de la capacidad de ganancia de las operaciones continuas de las compañías. En caso de que una compañía con depreciación mínima y actividades de amortización, el EBIT es observado muy de cerca por los acreedores, ya que este representa la cantidad de efectivo que la compañía está en disposición de pagar a los mismos. Es conocido también como ganancias operativas.

### **2.11.2 ROIC**

Retorno del Capital Invertido (Return on Invested Capital ROIC). Es una medida de que tan eficientemente una compañía utiliza el dinero (propio o prestado) invertido en sus operaciones. Se calcula dividiendo las ganancias netas antes de impuestos/ (activos totales sin el efectivo excedente menos pasivos que no generan interés).

### **2.11.3 WACC**

Promedio Ponderado del costo del Capital. (Weighted Average Cost of Capital). Es un promedio que representa el retorno esperado de todos los activos de la compañía. A cada fuente de capital, tal como acciones, bonos y otras deudas, se le asigna una tasa de retorno requerida, y luego estas tasas de retorno requeridas son ponderadas en la proporción que aporta a la estructura del capital de la compañía. La tasa resultante es la mínima que la compañía necesita usar para la evaluación de un proyecto de capital o una inversión.

### **2.11.4 EVA**

EVA resume las iniciales en inglés de las palabras Economic Value Added o Valor Económico Agregado en español.

Es un concepto que se ha conocido en Latinoamérica en la década de los años noventa, a pesar que las teorías económicas y financieras desarrollaron elementos aproximados desde hace algo más de un siglo.

La empresa General Electric lo estuvo utilizando a partir de los años veinte. Posteriormente, en los 70, algunos académicos finlandeses lo estuvieron usando

y, entre ellos, Virtanen lo define como un complemento del retorno sobre la inversión (Return Over Investment, ROI) para la toma de decisiones.

Peter Drucker en un artículo para Harvard Business Review se aproxima al concepto de creación de valor cuando expresa lo siguiente: "Mientras que un negocio tenga un rendimiento inferior a su costo de capital, operará a pérdidas" no importa que pague un impuesto como si tuviera una ganancia real.

La metodología de EVA supone que el éxito empresarial está relacionado directamente con la generación de valor económico, que se calcula restando a las utilidades operacionales el costo financiero por poseer los activos que se utilizaron en la generación de dichas utilidades.

Empresas dirigidas hacia el uso de parámetros como la utilidad neta, los diferentes márgenes de ganancias o el crecimiento de las ventas pueden desarrollar un punto de vista miope e ignoran otros elementos de análisis como la racionalización del capital de trabajo o la productividad derivada del uso de la capacidad instalada.

La evaluación de dichas oportunidades solo puede basarse en el uso de indicadores enfocados en el concepto de valor como el EVA, de allí su importancia.

### **2.11.5 FREE CASH FLOW**

El Efectivo Flotante Operativo (Free Cash Flow FCF) Se obtiene de: (ganancias netas mas la amortización y depreciación) menos gastos de capital y dividendos.

El FCF es la cantidad de efectivo que a una compañía le queda después de haber pagado todos los gastos incluyendo inversiones. Un FCF negativo no es necesariamente un indicativo de que una compañía sea mala, por ejemplo, las compañías jóvenes ponen mucho de su efectivo en inversiones, las cuales disminuyen su flujo de efectivo. Pero si una compañía esta gastando mucho efectivo, debería haber una buena razón para hacerlo y debería tener una tasa de retorno suficientemente alta sobre estas inversiones. Mientras que el FCF no recibe tanta cobertura por los medios como lo hacen las ganancias, es considerado por algunos expertos como un mejor indicador de la salud financiera de las compañías.

### **2.11.6 NOPAT**

Del Inglés “Net Operating Profit After Taxes” (NOPAD) se define como Ganancias netas operativas después de impuestos. Es un estimado de lo que una compañía ganaría ni no tuviera ninguna deuda, es igual al ingreso operacional por  $(1 - \text{Tasa de impuesto } \%)$ . Para compañías que usan apalancamiento el NOPAD es una medida alternativa de la eficiencia de la operación. NOPAT es frecuentemente usado para calcular el Valor Económico Agregado, (en inglés Economic Value Added)

### 3. Metodología

#### Universo de trabajo

Muestras de Biodiesel sintetizadas por medio de transesterificación de metanol a partir de aceite de palma.

#### Materiales

- **Lugar:** Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Centrífuga
- Tubos para centrífuga (graduados)
- Bureta de 50 ml
- Balón aforado de 1L
- Pipetas volumétricas de 10, 25, 50 y 100 ml
- Vasos de precipitados de 400 ml
- Vidrios de reloj para cubrir los vasos de precipitados de 400 ml
- Estufa con agitador magnético
- Magneto para agitación
- Erlenmeyer de 250 ml
- Condensador de boca esmerilada 24/40
- Balón de fondo plano de boca esmerilada 24/40

#### Reactivos

- Ácido Peryódico, grado reactivo
- Disolución de Tiosulfato de sodio 0.1 N, grado ACS.
- Yoduro de potasio, grado técnico
- Ácido acético glacial 99.5%, grado técnico
- Disolución de almidón soluble al 1%, estabilizada con ácido salicílico.
- Isooctano, grado reactivo.
- Hidróxido de potasio, grado reactivo

- Alcohol etílico (etanol), grado reactivo
- Cloroformo, grado reactivo
- Dicromato de potasio, grado reactivo
- Ácido clorhídrico, grado reactivo

## **Métodos**

## **Procedimiento**

### **Síntesis de Biodiesel**

#### **Formación del metóxido de sodio (para 10L de aceite)**

Mezclar en una cubeta plástica 60g de hidróxido de potasio (KOH) con 2L de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), agitar hasta obtener disolución completa.

#### **Formación de Biodiesel**

En otra cubeta colocar 10L de aceite de palma, añadir cuidadosamente la mezcla obtenida en el paso 6.4.1.1., calentar a  $50^\circ\text{C}$  y agitar durante media hora. Esperar hasta la formación de dos fases y separar las dos fases por decantación.

#### **Tratamiento final del biodiesel**

Luego de la decantación, para asegurar que el Biodiesel no contenga agua, glicerina y jabones en concentraciones que impidan su uso adecuado, se trata con minerales para evaluar la remoción que logra cada uno. Para lograr esto se debe agregar 1% de mineral absorbente (talco, bentonita, zeolitas aniónicas, zeolitas catiónicas y Magnesol®). Se deben pesar 100g de Biodiesel en balanza analítica y sobre el mismo recipiente se debe agregar el 1% del mineral a evaluar. Para cada mineral se debe realizar el mismo procedimiento cinco (5) veces y se debe trabajar



los minerales por separado. El biodiesel se deja en contacto con el mineral por 2 horas con agitación constante.

### **Determinación de humedad (agua) y sedimentos en Biodiesel**

100 ml de muestra de combustible sin diluir son centrifugados a una fuerza centrífuga relativa de 800 rpm durante 10 minutos en un rango de temperatura de 21 a 32°C, en tubos graduados para centrífuga que tengan escala de 0.005 ml a 0.01 ml. Después de la centrifugación, el volumen de agua que se ha separado en la punta del tubo de la centrífuga es leído cerca de 0.005 ml y es reportado como porcentaje volumétrico de agua por centrifugación. (14)

### **Determinación de glicerina total y libre en Biodiesel (Método AOCS<sup>8</sup> Ca 14-56)**

#### **Determinación de glicerina total**

La determinación de glicerina total se lleva a cabo por medio de un tratamiento con hidróxido de potasio (KOH)<sup>9</sup>, esto con el fin de separar todo el glicerol de la fase oleosa, para esto se utiliza cloroformo (CHCl<sub>3</sub>). A 10 gramos de muestra se le debe agregar 100 ml de hidróxido de potasio disuelto en etanol (4% p/v), esta mezcla se debe calentar con reflujo durante treinta (30) minutos. Luego se debe trasvasar la mezcla a un balón aforado de 1 litro de capacidad que contenga 90 ml de cloroformo y 25 ml de ácido acético, seguidamente agregar agua hasta aforar, se debe tomar una alícuota de 50 ml de la fase acuosa a la cual se le agrega 50 ml disolución de ácido peryódico y 20 ml yoduro de potasio. La determinación se

---

<sup>8</sup> American Oil Chemist's Society

<sup>9</sup> Podría considerarse este proceso como una saponificación.

hace por medio de una titulación con una disolución estandarizada de tiosulfato de sodio 0.1N, utilizando como indicador disolución de almidón (1%). El método es conocido como “Método yodométrico-ácido peryódico para determinar glicerina libre, total y combinada”. (15)

### **Determinación de glicerina libre**

Al igual que en paso 6.4.3.1. la muestra es tratada con cloroformo, ácido peryódico y yoduro de potasio. La diferencia está en que no se realiza el proceso de saponificación (adición de hidróxido de potasio). La titulación se lleva a cabo con disolución estandarizada de tiosulfato de sodio. (15)

## **Diseño experimental**

Diseño totalmente al azar con cuatro tratamientos: bentonita (B), talco (T), zeolita (Z) y Magnesol® (M).

Hipótesis nula:

$$H_0 = \mu_B + \mu_T + \mu_{ZC} + \mu_{ZA} + \mu_M$$

### **Variable**

La variable a utilizada fue porcentaje de humedad y porcentaje de glicerina.

El número de muestras ( $n_j$ ) fue de 5 por tratamiento, tanto para humedad como para glicerina.

### **Análisis**

Se hizo un análisis de varianza a un nivel  $\alpha = 0.05$  y posteriormente se llevó a cabo una prueba de Dunnett, comparando con el biodiesel sin tratar como control. Además se compararon los resultados con la norma (ASTM D 2709 y ASTM D 6584) y se estableció el cumplimiento de la norma.

## Rentabilidad Financiera

La metodología que se utilizará para comprar la rentabilidad financiera de dos métodos para la purificación de Biodiesel será, una comparación del capital operativo que requiere para una empresa A cuyo método de purificación será el lavado con agua, y una empresa B que utilizará el método de purificación con zeolitas, para ello se hará uso de las siguientes índices financieros.

1. Comparación del capital operativo (necesario)
2. Análisis del NOPAT Ganancia Operativa después de impuestos(Ebit-impuestos)
3. Análisis de Retorno de Inversión para los primeros 5 años de operaciones (ROIC)
4. Análisis del Costo de Capital WACC para ambas inversiones.
5. Análisis del EVA, (capital operativo x retorno de inversión – costo de capital)
6. Con los datos anteriores se hará un análisis del Free cash Flow (FCF) que se obtendrán en los primeros 6 años para determinar en qué período la empresa comienza a tener liquidez.
7. Utilizando los indicadores VAN y TIR se determinará cual de los dos procedimientos de purificación de Biodiesel es más recomendable.



## 4. Justificación

Mejorar la productividad de nuestro país ha sido siempre una preocupación constante para los profesionales de diferentes sectores de la sociedad. Guatemala presenta una alta dependencia de los combustibles del petróleo, una alternativa ecológicamente viable es la producción local de Biodiesel, sin embargo a la fecha éste no constituye una alternativa económicamente atractiva por el alto costo de la materia prima y su proceso de producción.

Este proyecto pretende evaluar entre dos métodos de purificación de Biodiesel, cuál de ellos resulta mas rentable. Los procedimientos de purificación consisten en la remoción los subproductos de reacción, (glicerina, jabones, etc.), los métodos a evaluar son: a) lavado con agua y b) utilización de zeolitas,

La visión a largo plazo de países no productores de petróleo debería ser, que los combustibles alternativos como el Biodiesel se conviertan además de sus ventajas para el medio ambiente en un producto de precio competitivo, que permita la independencia energética.



## 5. Objetivos

### General

- Realizar una evaluación económica de dos métodos de purificación de Biodiesel.

### Específicos

- Probar 5 materiales adsorbentes para la eliminación de humedad, glicerina total y libre en el refinamiento del Biodiesel, estableciendo cual de ellos presenta el mejor desempeño.
- Cuantificar el contenido de agua remanente en el Biodiesel por centrifugación.
- Determinar el contenido de glicerina total y libre en Biodiesel por medio de una valoración por el método AOCS Ca 14-56.
- Cuantificar el contenido de jabones remanentes luego del proceso de purificación con materiales adsorbentes mediante titulación ácido base.
- Evaluar la factibilidad económica del proceso de purificación de Biodiesel mediante lavados con agua.
- Evaluar la factibilidad económica del proceso de purificación de Biodiesel mediante tratamiento con zeolitas.

- Analizar indicadores económicos como EBIT, NOPAT, WACC, ROIC, FCF, VAN y TIR para establecer entre dos procesos de purificación de Biodiesel, cual inversión es más rentable.



## **6. Hipótesis**

Ho: Es más rentable efectuar el procedimiento de purificación de Biodiesel mediante tratamiento con zeolitas que el método de los lavados con agua.

Hi: Es más rentable efectuar el procedimiento de purificación de Biodiesel mediante tratamiento de lavados con agua.



## 7. RESULTADOS

### 7.1. Resultados contenido de glicerina total

#### 7.1.1. BIODIESEL SIN TRATAR

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (ml) <sup>10</sup>	Contenido de Glicerol Total (%)	
0	blanco	0	47.15		Promedio: 0.933 Varianza: 0.0006 Desviación estándar: 0.0239 Intervalo de confianza 95%: 0.00067
1	BIODIESEL SIN TRATAR A	10.5409	42.60	0.894	
2	BIODIESEL SIN TRATAR B	10.0432	42.50	0.959	
3	BIODIESEL SIN TRATAR C	10.0321	42.60	0.940	
4	BIODIESEL SIN TRATAR D	10.1009	42.60	0.933	
5	BIODIESEL SIN TRATAR E	10.0348	42.60	0.939	

#### 7.1.2. BENTONITA

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de Glicerol Total (%)	
0	blanco	0	47.15		Promedio: 0.516 Varianza: 0.0003 Desviación estándar: 0.0164 Intervalo de confianza 95%: 0.00046
1	Bentonita A	10.0181	44.60	0.527	
2	Bentonita B	10.0065	44.60	0.528	
3	Bentonita C	10.3260	44.70	0.492	
4	Bentonita D	10.0005	44.60	0.528	
5	Bentonita E	10.0341	44.70	0.506	

<sup>10</sup> En la titulación de glicerina total, utilizando el método oficial AOCS Ca 14-56.

### 7.1.3. ZEOLITAS ANIONICAS

No.	IDENTIFICACIÓN	cantidad de muestra (g)	volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de Glicerol Total (%)	
0	blanco	0	47.15		Promedio: 0.401 Varianza: 0.0002 Desviación estándar: 0.0152 Intervalo de confianza 95%: 0.00043
1	Zeolita Aniónica A	10.0628	45.10	0.422	
2	Zeolita Aniónica B	10.5861	45.10	0.401	
3	Zeolita Aniónica C	10.0485	45.20	0.402	
4	Zeolita Aniónica D	10.0543	45.20	0.402	
5	Zeolita Aniónica E	10.1003	45.30	0.379	

### 7.1.4. ZEOLITAS CATIONICAS

No.	IDENTIFICACIÓN	cantidad de muestra (g)	volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de Glicerol Total (%)	
0	blanco	0	47.15		Promedio: 0.221 Varianza: 0.0001 Desviación estándar: 0.0091 Intervalo de confianza 95%: 0.00026
1	Zeolita Catiónica A	10.0432	46.10	0.217	
2	Zeolita Catiónica B	10.0950	46.10	0.215	
3	Zeolita Catiónica C	10.0612	46.00	0.237	
4	Zeolita Catiónica D	10.0045	46.10	0.217	
5	Zeolita Catiónica E	10.0006	46.10	0.218	

### 7.1.5. TALCO

No.	IDENTIFICACIÓN	cantidad de muestra (g)	volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de Glicerol Total (%)	
0	blanco	0	47.15		Promedio: 0.538 Varianza: 0.0006 Desviación estándar: 0.0257 Intervalo de confianza 95%: 0.00072
1	Talco A	10.0627	44.60	0.525	
2	Talco B	10.2127	44.40	0.558	
3	Talco C	10.0041	44.70	0.507	
4	Talco D	10.0005	44.40	0.570	
5	Talco E	10.0062	44.60	0.528	

### 7.1.6. MAGNESOL

No.	IDENTIFICACIÓN	cantidad de muestra (g)	volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de Glicerol Total (%)	
0	blanco	0	47.15		Promedio: 0.423 Varianza: 0.0002 Desviación estándar: 0.0145 Intervalo de confianza 95%: 0.00041
1	Magnesol A	10.0825	45.10	0.421	
2	Magnesol B	10.0056	45.10	0.424	
3	Magnesol C	10.0272	45.00	0.444	
4	Magnesol D	10.0321	45.20	0.403	
5	Magnesol E	10.0008	45.10	0.425	

## 7.2. Resultados contenido de glicerina libre

### 7.2.1. BIODIESEL SIN TRATAR

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (ml) <sup>11</sup>	Contenido de glicerol libre (%)	
0	blanco	0	49.00		Promedio: 0.858 Varianza: 0.0005 Desviación estándar: 0.0213 Intervalo de confianza 95%: 0.0006
1	BIODIESEL SIN TRATAR A	10.0324	46.90	0.434	
2	BIODIESEL SIN TRATAR B	10.1467	46.90	0.429	
3	BIODIESEL SIN TRATAR C	10.2346	47.00	0.405	
4	BIODIESEL SIN TRATAR D	10.0054	46.80	0.456	
5	BIODIESEL SIN TRATAR E	10.0004	46.80	0.456	

<sup>11</sup> En la titulación de glicerina libre, utilizando el método oficial AOCS Ca 14-56.

### 7.2.2. BENTONITA

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de glicerol libre (%)	
0	blanco	0	49.00		Promedio: 0.229 Varianza: 0.0006 Desviación estándar: 0.0238 Intervalo de confianza 95%: 0.00067
1	Bentonita A	10.0082	48.30	0.145	
2	Bentonita B	10.0609	48.50	0.103	
3	Bentonita C	10.0074	48.50	0.104	
4	Bentonita D	10.0354	48.40	0.124	
5	Bentonita E	10.1435	48.60	0.082	

### 7.2.3. ZEOLITAS ANIONICAS

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de glicerol libre (%)	
0	blanco	0	49.00		Promedio: 0.194 Varianza: 0.0010 Desviación estándar: 0.0313 Intervalo de confianza 95%: 0.00088
1	Zeolita Aniónica A	10.0542	48.40	0.124	
2	Zeolita Aniónica B	10.0176	48.40	0.124	
3	Zeolita Aniónica C	10.0075	48.70	0.062	
4	Zeolita Aniónica D	10.0200	48.60	0.083	
5	Zeolita Aniónica E	10.0006	48.70	0.062	

### 7.2.4. ZEOLITAS CATIONICAS

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de glicerol libre (%)	
0	blanco	0	49.00		Promedio: 0.019 Varianza: 0.0003 Desviación estándar: 0.0183 Intervalo de confianza 95%: 0.00052
1	Zeolita Catiónica A	10.0132	48.90	0.021	
2	Zeolita Catiónica B	10.0008	49.00	0.000	
3	Zeolita Catiónica C	10.0032	49.00	0.000	
4	Zeolita Catiónica D	10.0098	48.80	0.041	
5	Zeolita Catiónica E	10.0043	49.00	0.000	

### 7.2.5. TALCO

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de glicerol libre (%)	
0	blanco	0	49.00		Promedio: 0.305 Varianza: 0.0001 Desviación estándar: 0.0115 Intervalo de confianza 95%: 0.00032
1	Talco A	10.0058	48.30	0.145	
2	Talco B	10.0041	48.20	0.166	
3	Talco C	10.0006	48.30	0.145	
4	Talco D	10.0098	48.20	0.166	
5	Talco E	10.0031	48.30	0.145	

### 7.2.6. MAGNESOL

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (ml)	Contenido de glicerol libre (%)	
0	blanco	0	49.00		Promedio: 0.113 Varianza: 0.0018 Desviación estándar: 0.0423 Intervalo de confianza 95%: 0.00119
1	Magnesol A	10.1818	48.80	0.041	
2	Magnesol B	10.0193	48.50	0.103	
3	Magnesol C	10.0089	48.90	0.021	
4	Magnesol D	10.0004	48.50	0.104	
5	Magnesol E	10.0234	48.90	0.021	

### 7.3. Resultados contenido de humedad

#### 7.3.1. BIODIESEL SIN TRATAR

No.	Biodiesel	Volumen de muestra (ml)	% de humedad (V/V)	
1	BIODIESEL SIN TRATAR	100	0.500	Promedio: 0.58 Varianza: 0.0020 Desviación estándar: 0.0447 Intervalo de confianza 95%: 0.00125
2	BIODIESEL SIN TRATAR	100	0.600	
3	BIODIESEL SIN TRATAR	100	0.600	
4	BIODIESEL SIN TRATAR	100	0.600	
5	BIODIESEL SIN TRATAR	100	0.600	

#### 7.3.2. BENTONITA

No.	Mineral	Volumen de muestra (ml)	% de humedad (V/V)	
1	Bentonita	100	0.025	Promedio: 0.035 Varianza: 0.0002 Desviación estándar: 0.0137 Intervalo de confianza 95%: 0.00038
2	Bentonita	100	0.050	
3	Bentonita	100	0.025	
4	Bentonita	100	0.025	
5	Bentonita	100	0.050	



### 7.3.3. TALCO

No.	Mineral	Volumen de muestra (ml)	% de humedad (V/V)	
1	Talco	100	0.025	Promedio: 0.04 Varianza: 0.0005 Desviación estándar: 0.0224 Intervalo de confianza 95%: 0.00063
2	Talco	100	0.075	
3	Talco	100	0.050	
4	Talco	100	0.025	
5	Talco	100	0.025	

### 7.3.4. ZEOLITAS CATIONICAS

No.	Mineral	Volumen de muestra (ml)	% de humedad (V/V)	
1	Zeolitas Cationicas	100	< 0.005	Promedio: < 0.005 Varianza: 0.0000 Desviación estándar: 0
2	Zeolitas Cationicas	100	< 0.005	
3	Zeolitas Cationicas	100	< 0.005	
4	Zeolitas Cationicas	100	< 0.005	
5	Zeolitas Cationicas	100	< 0.005	

### 7.3.5. ZEOLITAS ANIONICAS

No.	Mineral	Volumen de muestra (ml)	% de humedad (V/V)	
1	Zeolitas Aniónicas	100	< 0.005	Promedio: < 0.005 Varianza: 0.0000 Desviación estándar: 0
2	Zeolitas Aniónicas	100	< 0.005	
3	Zeolitas Aniónicas	100	< 0.005	
4	Zeolitas Aniónicas	100	< 0.005	
5	Zeolitas Aniónicas	100	< 0.005	

### 7.3.6. MAGNESOL

No.	Mineral	Volumen de muestra (ml)	% de humedad (V/V)	
1	Magnesol	100	0.100	Promedio: 0.085 Varianza: 0.0002 Desviación estándar: 0.0137 Intervalo de confianza 95%: 0.00038
2	Magnesol	100	0.075	
3	Magnesol	100	0.075	
4	Magnesol	100	0.075	
5	Magnesol	100	0.100	

## 7.4. Resultados contenido de catalítico

### 7.4.1. BODIESEL SIN TRATAR

No.	Biodiesel	Peso de muestra (g)	ml de HCl (Fenolftaleína)	contenido de catalítico (g KOH / g de muestra)	Promedio contenido de catalítico
1	BIODIESEL SIN TRATAR	25.0437	0	N.D.	N.D.
2	BIODIESEL SIN TRATAR	25.3245	0	N.D.	
3	BIODIESEL SIN TRATAR	25.2778	0	N.D.	
4	BIODIESEL SIN TRATAR	25.3188	0	N.D.	
5	BIODIESEL SIN TRATAR	25.8732	0	N.D.	

### 7.4.2. BENTONITA

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (Fenolftaleína)	contenido de catalítico (g KOH / g de muestra)	Promedio contenido de catalítico
1	Bentonita	25.2250	0	N.D.	N.D.
2	Bentonita	24.9983	0	N.D.	
3	Bentonita	25.0874	0	N.D.	
4	Bentonita	25.6523	0	N.D.	
5	Bentonita	25.0089	0	N.D.	

### 7.4.3. TALCO

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (Fenolftaleína)	contenido de catalítico (g KOH / g de muestra)	Promedio contenido de catalítico
1	Talco	25.3423	0	N.D.	N.D.
2	Talco	25.6521	0	N.D.	
3	Talco	25.0021	0	N.D.	
4	Talco	25.3890	0	N.D.	
5	Talco	25.1908	0	N.D.	

### 7.4.4. ZEOLITAS CATIONICAS

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (Fenolftaleína)	contenido de catalítico (g KOH / g de muestra)	Promedio contenido de catalítico
1	Zeolitas Cationicas	25.5690	0	N.D.	N.D.
2	Zeolitas Cationicas	25.3654	0	N.D.	
3	Zeolitas Cationicas	25.2398	0	N.D.	
4	Zeolitas Cationicas	25.0654	0	N.D.	
5	Zeolitas Cationicas	25.0032	0	N.D.	

#### 7.4.5. ZEOLITAS ANIÓNICAS

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (Fenolftaleína)	contenido de catalítico (g KOH / g de muestra)	Promedio contenido de catalítico
1	Zeolitas Aniónicas	25.0021	0	N.D. <sup>12</sup>	N.D.
2	Zeolitas Aniónicas	25.3432	0	N.D.	
3	Zeolitas Aniónicas	25.6578	0	N.D.	
4	Zeolitas Aniónicas	25.3936	0	N.D.	
5	Zeolitas Aniónicas	26.1597	0	N.D.	

#### 7.4.6. MAGNESOL

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (Fenolftaleína)	contenido de catalítico (g KOH / g de muestra)	Promedio contenido de catalítico
1	Magnesol	25.0541	0	N.D.	N.D.
2	Magnesol	25.2314	0	N.D.	
3	Magnesol	25.3679	0	N.D.	
4	Magnesol	25.2367	0	N.D.	
5	Magnesol	25.2309	0	N.D.	

---

<sup>12</sup> N.D.= No detectado.

## 7.5. Resultados contenido de jabones

### 7.5.1. BIODIESEL SIN TRATAR

No.	Biodiesel	Peso de muestra (g)	ml de HCl (azul de bromofenol)	contenido de jabones (g oleato de potasio / g de muestra)	contenido de jabones en ppm	
1	BIODIESEL SIN TRATAR	25.0437	0.9	0.00115	1152.00	Promedio: 1338.45 Desviación: 130.55 I.C. 9 5%: 3.66
2	BIODIESEL SIN TRATAR	25.3245	1	0.00127	1265.81	
3	BIODIESEL SIN TRATAR	25.2778	1.1	0.00139	1394.96	
4	BIODIESEL SIN TRATAR	25.3188	1.1	0.00139	1392.70	
5	BIODIESEL SIN TRATAR	25.8732	1.2	0.00149	1486.76	

### 7.5.2. BENTONITA

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (azul de bromofenol)	contenido de jabones (g oleato de potasio / g de muestra)	contenido de jabones en ppm	
1	Bentonita	25.2250	0.8	0.00102	1016.64	Promedio: 992.43 Desviación: 106.58 I.C. 9 5%: 2.98
2	Bentonita	24.9983	0.9	0.00115	1154.09	
3	Bentonita	25.0874	0.7	0.00089	894.441	
4	Bentonita	25.6523	0.8	0.00100	999.708	
5	Bentonita	25.0089	0.7	0.00090	897.249	

### 7.5.3. TALCO

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (azul de bromofenol)	contenido de jabones (g oleato de potasio / g de muestra)	contenido de jabones en ppm	
1	Talco	25.3423	0.2	0.00025	252.984	Promedio: 303.52 Desviación: 66.95 I.C. 9 5%: 1.88
2	Talco	25.6521	0.3	0.00037	374.893	
3	Talco	25.0021	0.2	0.00026	256.426	
4	Talco	25.3890	0.3	0.00038	378.778	
5	Talco	25.1908	0.2	0.00025	254.506	

### 7.5.4. ZEOLITAS CATIONICAS

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (azul de bromofenol)	contenido de jabones (g oleato de potasio / g de muestra)	contenido de jabones en ppm	Promedio ppm (contenido de jabones)
1	Zeolitas Cationicas	25.5690	0	N.D.	N.D.	N.D.
2	Zeolitas Cationicas	25.3654	0	N.D.	N.D.	
3	Zeolitas Cationicas	25.2398	0	N.D.	N.D.	
4	Zeolitas Cationicas	25.0654	0	N.D.	N.D.	
5	Zeolitas Cationicas	25.0032	0	N.D.	N.D.	

### 7.5.5. ZEOLITAS ANIÓNICAS

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (azul de bromofenol)	contenido de jabones (g oleato de potasio / g de muestra)	contenido de jabones en ppm	Promedio ppm (contenido de jabones)
1	Zeolitas Aniónicas	25.0021	0	N.D.	N.D.	N.D.
2	Zeolitas Aniónicas	25.3432	0	N.D.	N.D.	
3	Zeolitas Aniónicas	25.6578	0	N.D.	N.D.	
4	Zeolitas Aniónicas	25.3936	0	N.D.	N.D.	
5	Zeolitas Aniónicas	26.1597	0	N.D.	N.D.	

### 7.5.6. MAGNESOL

No.	Mineral	Peso de muestra (g)	ml de HCl (azul de bromofenol)	contenido de jabones (g oleato de potasio / g de muestra)	contenido de jabones en ppm	Promedio ppm (contenido de jabones)
1	Magnesol	25.0541	0	N.D.	N.D.	N.D.
2	Magnesol	25.2314	0	N.D.	N.D.	
3	Magnesol	25.3679	0	N.D.	N.D.	
4	Magnesol	25.2367	0	N.D.	N.D.	
5	Magnesol	25.2309	0	N.D.	N.D.	



## 7.6. Porcentajes de remoción

### 7.6.1. Porcentajes de remoción de glicerina total

Mineral	Contenido de glicerol total inicial (Biodiesel sin tartar)	Contenido de glicerol total final (Biodiesel tratado)	Porcentaje de remoción	Cumplimiento con la norma ASTM D6751
<b>Bentonita</b>	0.933	0.516	44.69453376	No cumple
<b>Talco</b>	0.933	0.538	42.33654877	No cumple
<b>Zeolitas Aniónicas</b>	0.933	0.401	57.02036442	No cumple
<b>Zeolitas Catiónicas</b>	0.933	0.221	76.31296892	Si cumple
<b>Magnesol</b>	0.933	0.423	54.66237942	No cumple

### 7.6.2. Porcentajes de remoción de glicerina libre

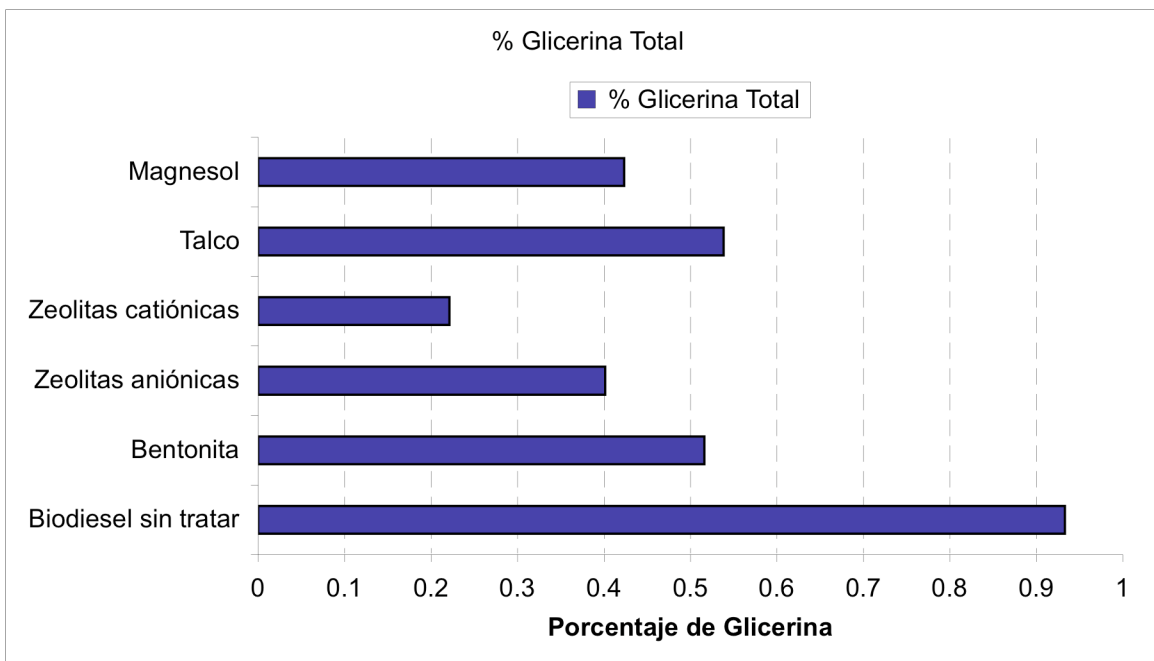
Mineral	Contenido de glicerol libre inicial (Biodiesel sin tratar)	Contenido de glicerol libre final (Biodiesel tratado)	Porcentaje de remoción	Cumplimiento con la norma ASTM D6751
<b>Bentonita</b>	0.858	0.229	73.31002331	No cumple
<b>Talco</b>	0.858	0.305	64.45221445	No cumple
<b>Zeolitas Aniónicas</b>	0.858	0.194	77.38927739	No cumple
<b>Zeolitas Catiónicas</b>	0.858	0.019	97.78554779	Si cumple
<b>Magnesol</b>	0.858	0.113	86.82983683	No cumple

### 7.6.3. Porcentajes de remoción de humedad y sedimentos

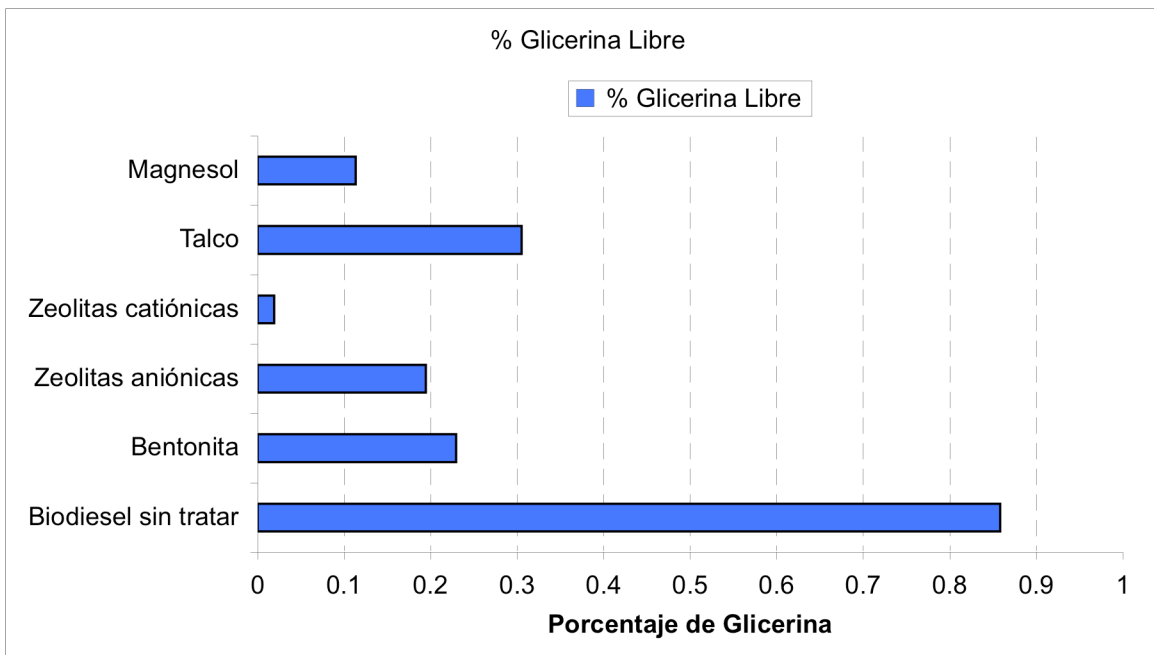
Mineral	Contenido de humedad y sedimentos inicial (Biodiesel sin tratar)	Contenido de humedad y sedimentos final (Biodiesel tratado)	Porcentaje de remoción	Cumplimiento con la norma ASTM D6751
Bentonita	0.58	0.035	93.96551724	Si cumple
Talco	0.58	0.040	93.10344828	Si cumple
Zeolitas Aniónicas	0.58	N.D.	100	Si cumple
Zeolitas Catiónicas	0.58	N.D.	100	Si cumple
Magnesol	0.58	0.085	85.34482759	No cumple

### 7.6.4. Porcentajes de remoción de jabones

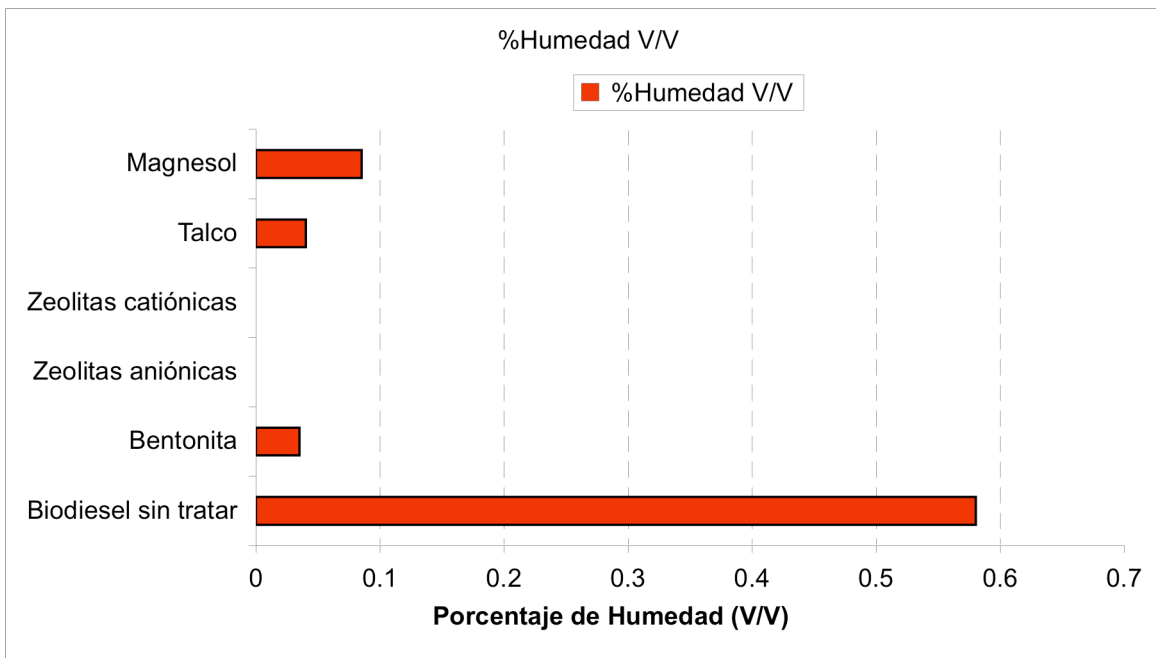
Mineral	Contenido de jabones inicial (Biodiesel sin tratar)	Contenido de jabones final (Biodiesel tratado)	Porcentaje de remoción
Bentonita	1338.45	992.43	25.85229183
Talco	1338.45	303.52	77.3230229
Zeolitas Aniónicas	1338.45	N.D.	100
Zeolitas Catiónicas	1338.45	N.D.	100
Magnesol	1338.45	N.D.	100



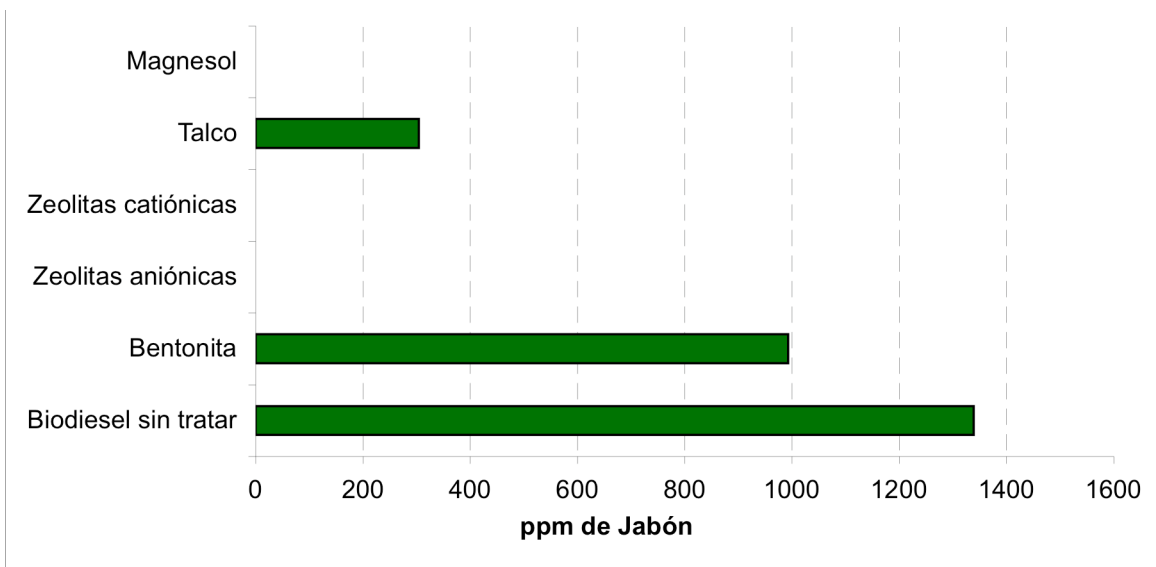
**GRÁFICA 7:** GRÁFICA QUE DEMUESTRA EL CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL EN EL BIODIESEL DESPUÉS DE HABERLO TRATADO CON LOS DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES. DE REFERENCIA SE UTILIZÓ EL CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL EN EL BIODIESEL SIN TRATAR.



**GRÁFICA 8:** GRÁFICA QUE DEMUESTRA EL CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE EN EL BIODIESEL DESPUÉS DE HABERLO TRATADO CON LOS DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES. DE REFERENCIA SE UTILIZÓ EL CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE EN EL BIODIESEL SIN TRATAR.



**GRÁFICA 9:** GRÁFICA QUE DEMUESTRA EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS EN EL BODIESEL DESPUÉS DE HABERLO TRATADO CON LOS DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES. DE REFERENCIA SE UTILIZÓ EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y GLICERINA EN EL BODIESEL SIN TRATAR.



**GRÁFICA 10:** GRÁFICA QUE DEMUESTRA EL CONTENIDO DE JABONES EN EL BODIESEL DESPUÉS DE HABERLO TRATADO CON LOS DIFERENTES MATERIALES ADSORBENTES. DE REFERENCIA SE UTILIZÓ EL CONTENIDO DE JABONES EN EL BODIESEL SIN TRATAR.

## 7.7 Análisis estadístico

### 7.7.1 Glicerina Total

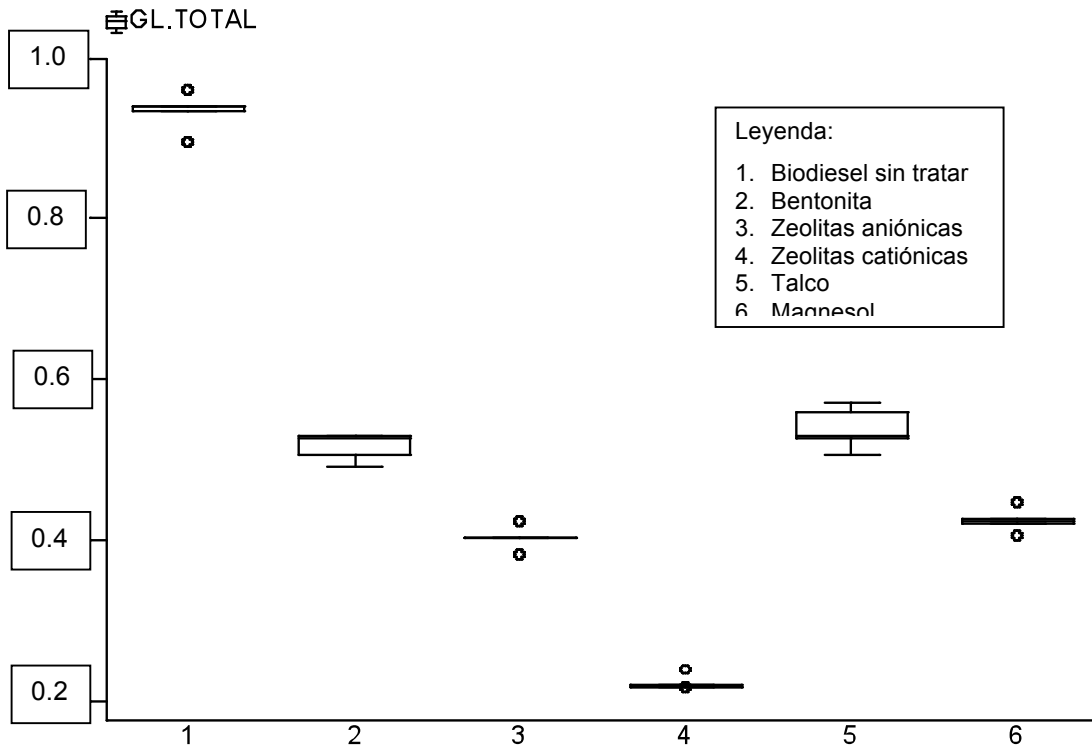
Tratamiento	Media	Desviación Estándar	Frecuencias
Biodiesel sin tratar	0.933	0.239	5
Bentonita	0.516	0.016	5
Zeolitas aniónicas	0.401	0.015	5
Zeolitas catiónicas	0.221	0.009	5
Talco	0.538	0.026	5
Magnesol	0.423	0.015	5

### 7.7.2. Análisis de varianza glicerina total

Fuente	SS	df	MS	F	Prob > F
Entre grupos	1.412	5	0.282574038	834.29	0
Dentro de los grupos	0.008	24	0.0003387		
Total	1.420	29	0.048999965		

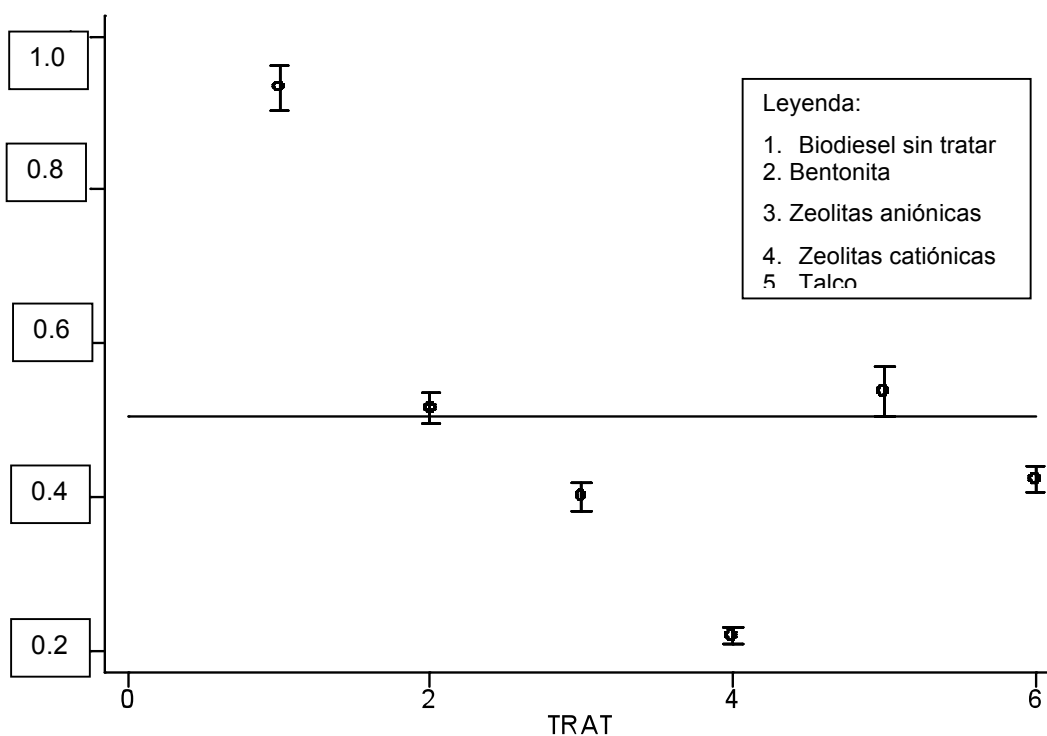
Conclusión: Existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ( $p < 0.00001$ ).

### Gráfica de cajas de Tukey para Glicerina Total



**GRÁFICA 11:** GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL EN BIODIESEL TRATADO.

### Gráfica de líneas para Glicerina Total



**GRÁFICA 12:** GRÁFICA DE LÍNEAS PARA CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL EN BODIESEL TRATADO.

COMPARACIONES CONTRA EL CONTROL (Biodiesel sin tratar):

Todos los tratamientos presentan diferencia estadísticamente significativa al compararlos contra el control ( $p < 0.01$ )

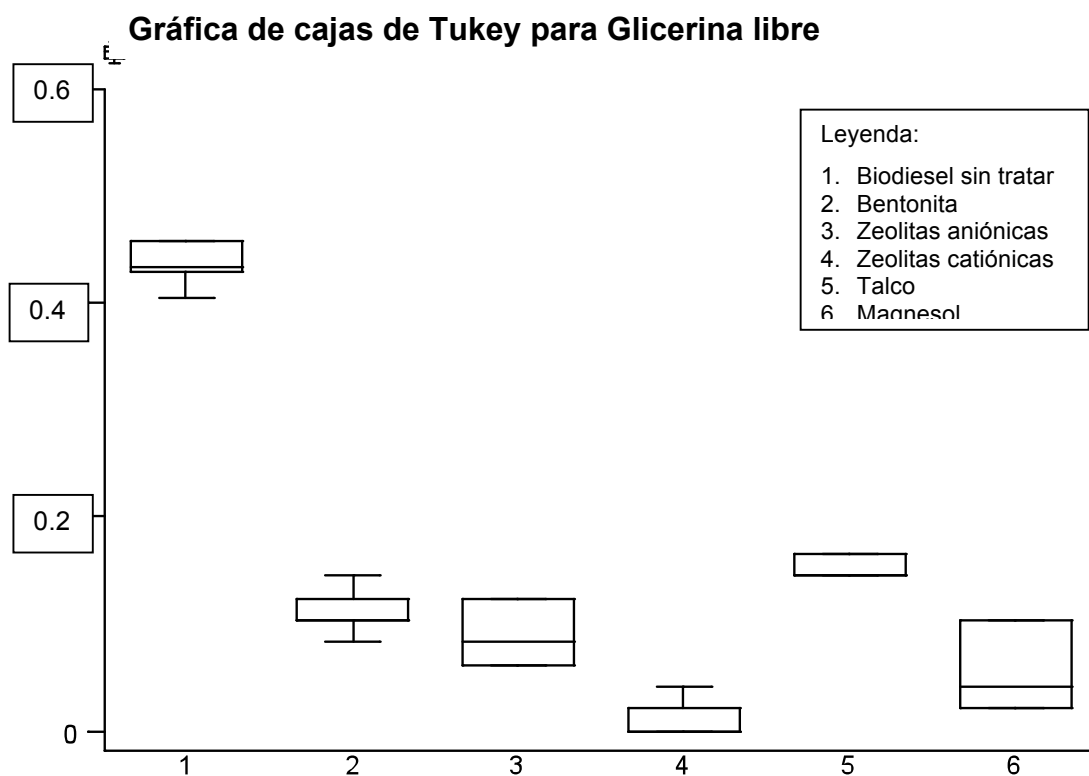
#### 7.7.3. Glicerina Libre

Tratamiento	Media	Desviación Estándar	Frecuencias
<b>Biodiesel sin tratar</b>	0.436	0.021	5
<b>Bentonita</b>	0.112	0.024	5
<b>Zeolitas aniónicas</b>	0.091	0.031	5
<b>Zeolitas catiónicas</b>	0.012	0.018	5
<b>Talco</b>	0.153	0.012	5
<b>Magnesol</b>	0.058	0.042	5

### 7.7.4. Análisis de varianza glicerina libre

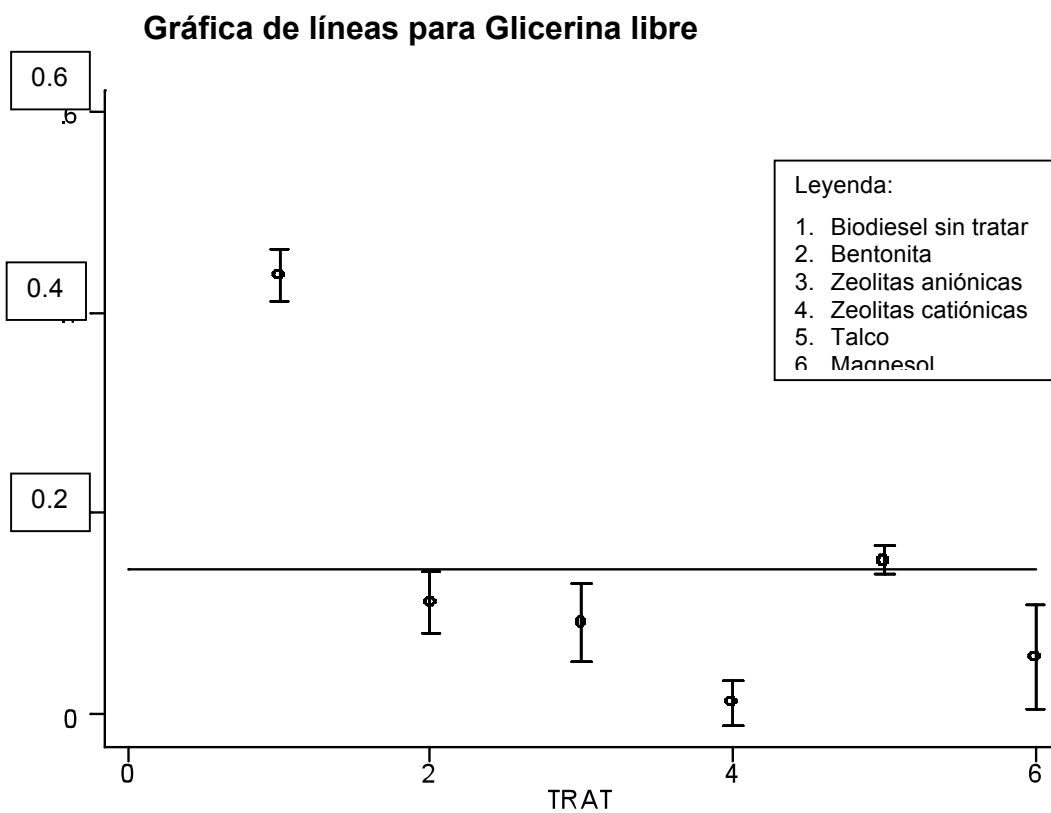
Fuente	SS	df	MS	F	Prob > F
Entre grupos	0.56962625	5	0.113925251	160.22	0
Dentro de los grupos	0.0170656	24	0.000711067		
Total	0.58669185	29	0.020230754		

Conclusión: Existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ( $p < 0.00001$ ).



**GRÁFICA 13:** GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE EN BIODIESEL TRATADO.





**GRÁFICA 14:** GRÁFICA DE LÍNEAS PARA CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE EN BIODIESEL TRATADO.

COMPARACIONES CONTRA EL CONTROL (Biodiesel sin tratar):

Todos los tratamientos presentan diferencia estadísticamente significativa al compararlos contra el control ( $p < 0.01$ ).

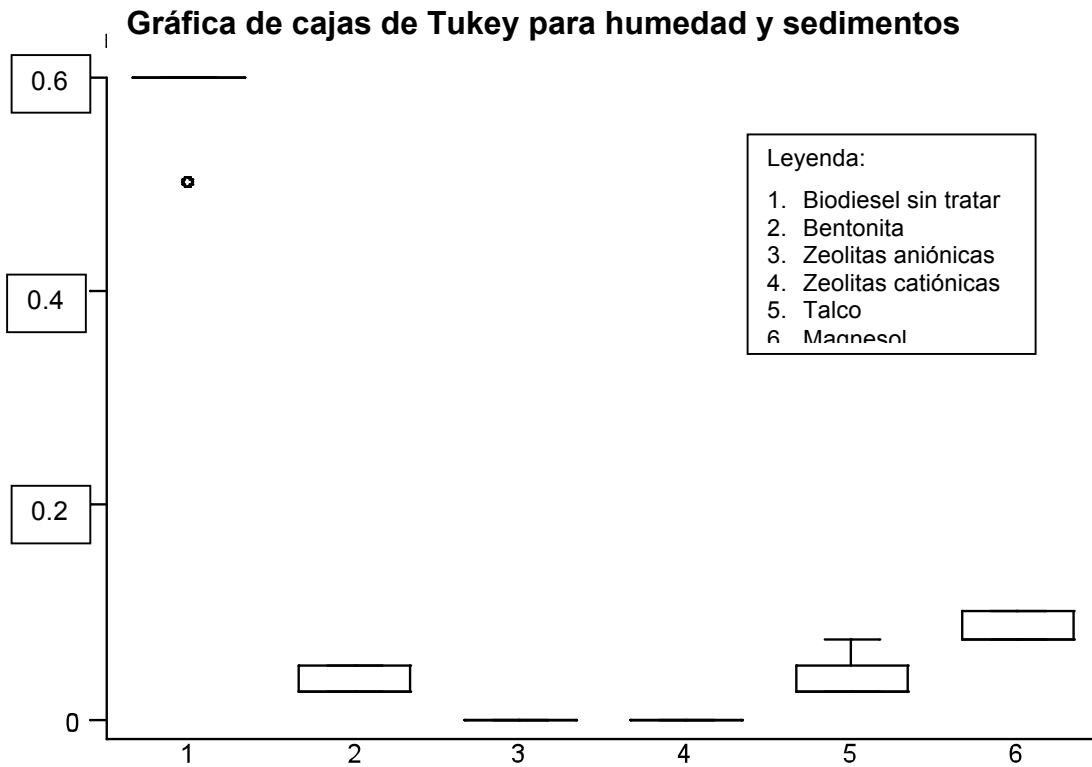
#### 7.7.5. Humedad

Tratamiento	Media	Desviación Estándar	Frecuencias
Biodiesel sin tratar	0.580	0.045	5
Bentonita	0.035	0.014	5
Zeolitas aniónicas	N.D.	N.D.	5
Zeolitas catiónicas	N.D.	N.D.	5
Talco	0.040	0.022	5
Magnesol	0.085	0.014	5

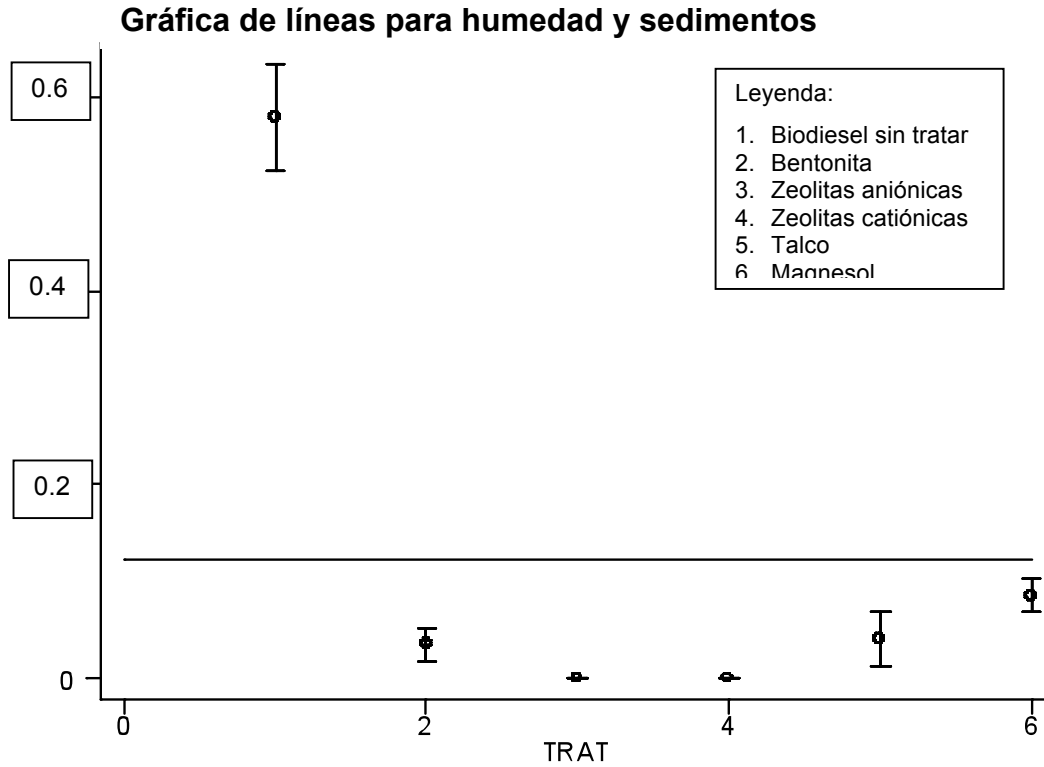
#### 7.7.6. Análisis de varianza humedad

Fuente	SS	df	MS	F	Prob > F
Entre grupos	1.27591675	5	0.25518335	532.56	0
Dentro de los grupos	0.11500004	24	0.000479167		
Total	1.28741676	29	0.044393681		

Conclusión: Existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ( $p < 0.00001$ ).



**GRÁFICA 15:** GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS EN BIODIESEL TRATADO.



**GRÁFICA 16:** GRÁFICA DE LÍNEAS PARA CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS EN BIODIESEL TRATADO.

COMPARACIONES CONTRA EL CONTROL (Biodiesel sin tratar):

Todos los tratamientos presentan diferencia estadísticamente significativa al compararlos contra el control ( $p < 0.01$ ).

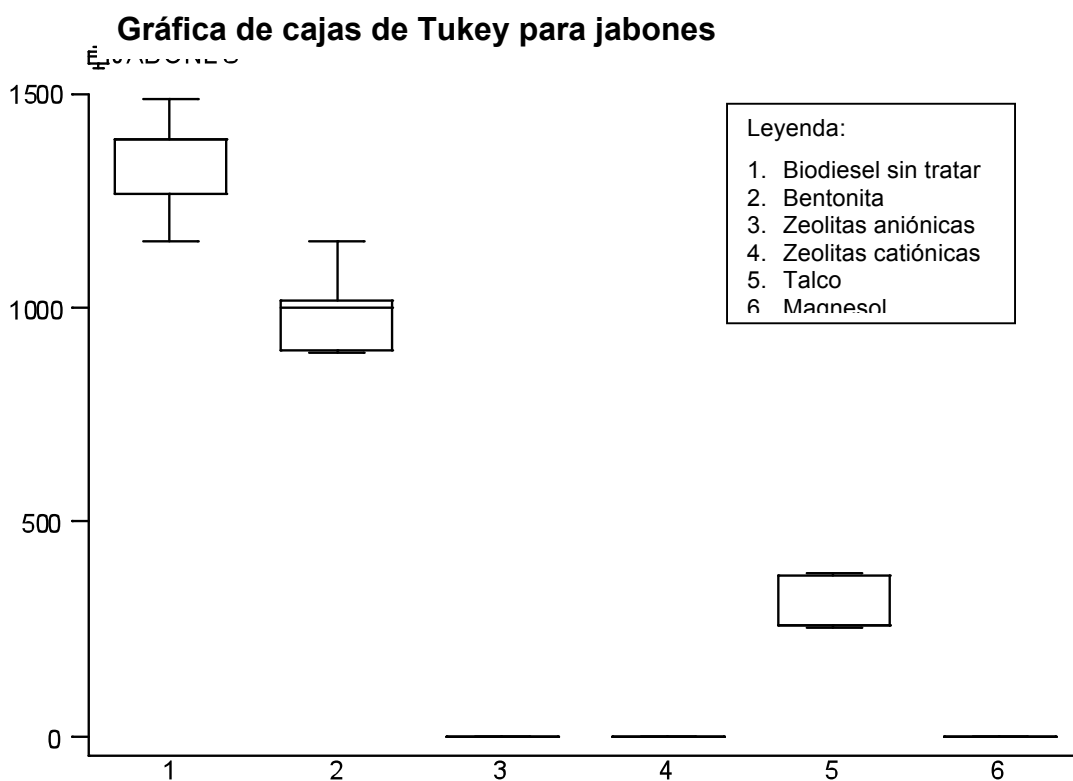
### 7.7.7. Jabones

Tratamiento	Media	Desviación Estándar	Frecuencias
Biodiesel sin tratar	1338	130	5
Bentonita	992	106	5
Zeolitas aniónicas	N.D.	N.D.	5
Zeolitas catiónicas	N.D.	N.D.	5
Talco	303	66	5
Mannesol	N.D.	N.D.	5

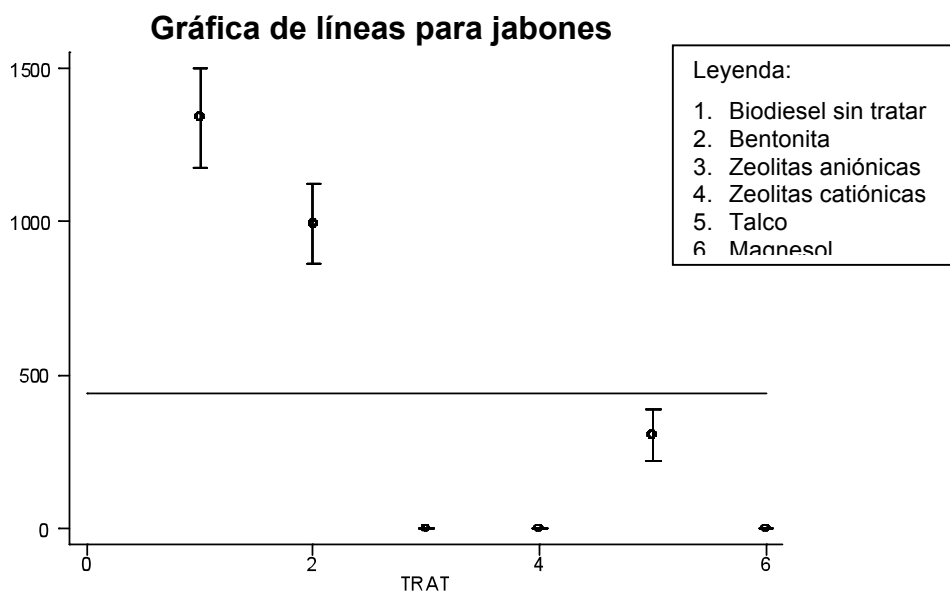
### 7.7.8. Análisis de varianza jabones

Fuente	SS	df	MS	F	Prob > F
Entre grupos	8559007.51	5	1711801.5	312.33	0
Dentro de los grupos	131538.741	24	5480.78088		
Total	8690546.25	29	299674.009		

Conclusión: Existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ( $p < 0.00001$ ).



**GRÁFICA 17:** GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE JABONES EN BIODIESEL TRATADO.



**GRÁFICA 18:** GRÁFICA DE CAJAS DE TUKEY PARA CONTENIDO DE JABONES EN BIODIESEL TRATADO.

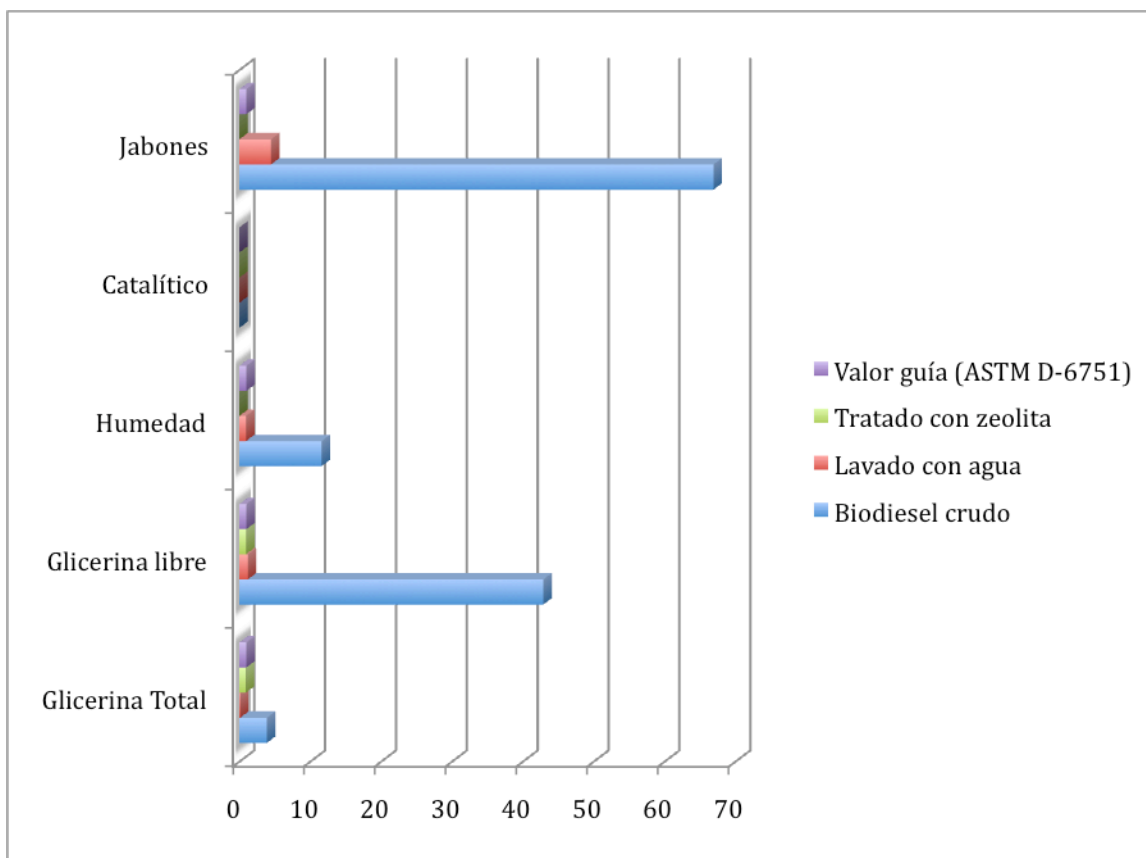
**COMPARACIONES CONTRA EL CONTROL (Biodiesel sin tratar):**

Todos los tratamientos presentan diferencia estadísticamente significativa al compararlos contra el control ( $p < 0.01$ ).

**Cuadro 10:** Tabla de comparación de propiedades técnicas

Parámetro	Biodiesel crudo	Lavado con agua	Tratado con zeolita	Valor guía (ASTM D-6751)
<b>Glicerina Total</b>	0.933 %	0.028 %	0.221 %	0.240%
<b>Glicerina libre</b>	0.858 %	0.024 %	0.019 %	0.02%
<b>Humedad</b>	0.58 %	0.047 %	< 0.005 %	0.050 % V/V
<b>Catalítico</b>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
<b>Jabones</b>	1338.45 ppm	89.48 ppm	N.D.	15 – 20 ppm (no ASTM)

**GRÁFICA 19:** COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD



**Cuadro 11:** Método de lavado con agua

METODO A: LAVADO CON AGUA

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<b>1.- Capital Operativo</b>						
Activos Totales	Q200,000.00	Q200,000.00	Q200,000.00	Q200,000.00	Q200,000.00	Q200,000.00
-Pasivo Oper.(prestamo 36 meses 11%)	Q88,664.00	Q88,664.00	Q88,664.00			
<b>Cap Operativo</b>	<b>Q111,336.00</b>	<b>Q111,336.00</b>	<b>Q111,336.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>
<b>Total de deudas acutales</b>	<b>Q88,664.00</b>	<b>Q88,664.00</b>	<b>Q88,664.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>
<b>2.- NOPAT</b>						
Ingresos de operación	Q128,900.00	Q128,900.00	Q128,900.00	Q128,900.00	Q128,900.00	Q128,900.00
<b>EBIT</b>	<b>Q128,900.00</b>	<b>Q128,900.00</b>	<b>Q128,900.00</b>	<b>Q128,900.00</b>	<b>Q128,900.00</b>	<b>Q128,900.00</b>
tax= Impto / Util antes impto						
<b>Ingresos antes de impuestos</b>	<b>Q40,228.00</b>	<b>Q40,228.00</b>	<b>Q40,228.00</b>	<b>Q128,900.00</b>	<b>Q128,900.00</b>	<b>Q128,900.00</b>
Impuesto s rentas - Total	Q12,068.40	Q12,068.40	Q12,068.40			
<b>Impuestos</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>
<b>NOPAT</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>
<b>3.- ROIC</b>	<b>81%</b>	<b>81%</b>	<b>81%</b>	<b>45%</b>	<b>45%</b>	<b>45%</b>
ROIC= NOPAT / Cap Oper						
<b>4.- WACC</b>						
Deudas de largo plazo	Q200,000.00	Q200,000.00	Q200,000.00			
<b>Deuda financiera</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>
<b>Deuda financiera (D)</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>



Interés minoritario (I)						
<b>Equidad Total</b>						
<b>Cap financiero (A)</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>	<b>Q200,000.00</b>
<b>4.3 Costo de la deuda Kd</b>						
Kd = Interes gasto / Deuda financiera						
Gastos de interés por prestamo	Q22,000.00	Q22,000.00	Q22,000.00			
Deuda financiera	Q200,000.00	Q200,000.00	Q200,000.00			
<b>Kd</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>			
<b>4.6 WACC (Costo de capital)</b>						
WACC = Kd (1-t) (D/A) + Ki (I/A) + Ke (E/A)						
<b>WACC</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>			
<b>5.- EVA (Ganancia económica)</b>						
EVA = Cap Oper * (ROIC - WACC)	Q77,983.04	Q77,983.04	Q77,983.04	Q90,230.00	Q90,230.00	Q90,230.00
Cap Operativo	Q111,336.00	Q111,336.00	Q111,336.00	Q200,000.00	Q200,000.00	Q200,000.00
ROIC-WACC	70%	70%	70%	45%	45%	45%
<b>EVA</b>	<b>Q77,983.04</b>	<b>Q77,983.04</b>	<b>Q77,983.04</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>
<b>EVA incremental</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>
<b>6.- Free Cash Flow (FCF)</b>						
FCF = NOPAT - Inv Neta						
Cap Operativo	Q111,336.00	Q111,336.00	Q111,336.00	Q200,000.00	Q200,000.00	Q200,000.00
<b>Inversión Neta</b>		<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>-Q88,664.00</b>	<b>-Q88,664.00</b>	<b>-Q88,664.00</b>
<b>FCF</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q90,230.00</b>	<b>Q178,894.00</b>	<b>Q178,894.00</b>	<b>Q178,894.00</b>

**Cuadro 12:** Método de tratamiento con zeolitas

METODO B: LAVADO CON ZEOLITAS

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<b>1.- Capital Operativo</b>						
Activos Totales	Q100,000.00	Q100,000.00	Q100,000.00	Q100,000.00	Q100,000.00	Q100,000.00
-Pasivo Oper.(prestamo 36 meses 11%)	Q44,332.00	Q44,332.00	Q44,332.00			
<b>Cap Operativo</b>	<b>Q55,668.00</b>	<b>Q55,668.00</b>	<b>Q55,668.00</b>	<b>Q100,000.00</b>	<b>Q100,000.00</b>	<b>Q100,000.00</b>
<b>Total de deudas acutales</b>	<b>Q44,332.00</b>	<b>Q44,332.00</b>	<b>Q44,332.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>
<b>2.- NOPAT</b>						
Ingresos de operación	Q239,200.00	Q239,200.00	Q239,200.00	Q239,200.00	Q239,200.00	Q239,200.00
<b>EBIT</b>	<b>Q239,200.00</b>	<b>Q239,200.00</b>	<b>Q239,200.00</b>	<b>Q239,200.00</b>	<b>Q239,200.00</b>	<b>Q239,200.00</b>
tax= Impto / Util antes impto						
<b>Ingresos antes de impuestos</b>	<b>Q194,867.00</b>	<b>Q194,867.00</b>	<b>Q194,867.00</b>	<b>Q239,200.00</b>	<b>Q239,200.00</b>	<b>Q239,200.00</b>
Impuesto s rentas - Total	Q58,460.10	Q58,460.10	Q58,460.10	Q58,460.10	Q58,460.10	Q58,460.10
<b>Impuestos</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>	<b>30.00%</b>
<b>NOPAT</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>
<b>3.- ROIC</b>	<b>301%</b>	<b>301%</b>	<b>301%</b>	<b>167%</b>	<b>167%</b>	<b>167%</b>
ROIC= NOPAT / Cap Oper						
<b>4.- WACC</b>						
Deudas de largo plazo	Q100,000.00	Q100,000.00	Q100,000.00			
<b>Deuda financiera</b>	<b>Q100,000.00</b>	<b>Q100,000.00</b>	<b>Q100,000.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>
<b>Deuda financiera (D)</b>	<b>Q100,000.00</b>	<b>Q100,000.00</b>	<b>Q100,000.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>

Interés minoritario (I)						
<b>Equidad Total</b>						
<b>Cap financiero (A)</b>						
<b>4.3 Costo de la deuda Kd</b>						
Kd = Interes gasto / Deuda financiera						
Gastos de interés por prestamo	Q11,000.00	Q11,000.00	Q11,000.00			
Deuda financiera	Q100,000.00	Q100,000.00	Q100,000.00			
<b>Kd</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>			
<b>4.6 WACC (Costo de capital)</b>						
WACC = Kd (1-t) (D/A) + Ki (I/A) + Ke (E/A)						
<b>WACC</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>			
<b>5.- EVA (Ganancia económica)</b>						
EVA = Cap Oper * (ROIC - WACC)	Q161,316.52	Q161,316.52	Q161,316.52	Q167,440.00	Q167,440.00	Q167,440.00
Cap Operativo	Q55,668.00	Q55,668.00	Q55,668.00	Q100,000.00	Q100,000.00	Q100,000.00
ROIC-WACC	290%	290%	290%	167%	167%	167%
<b>EVA</b>	<b>Q161,316.52</b>	<b>Q161,316.52</b>	<b>Q161,316.52</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>
<b>EVA incremental</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	
<b>6.- Free Cash Flow (FCF)</b>						
FCF = NOPAT - Inv Neta						
Cap Operativo	Q55,668.00	Q55,668.00	Q55,668.00	Q100,000.00	Q100,000.00	Q100,000.00
<b>Inversión Neta</b>		<b>Q0.00</b>	<b>Q0.00</b>	<b>-Q44,332.00</b>	<b>-Q44,332.00</b>	<b>-Q44,332.00</b>
<b>FCF</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q167,440.00</b>	<b>Q211,772.00</b>	<b>Q211,772.00</b>	<b>Q211,772.00</b>

**Cuadro 13:** Costos de producción para el proceso de purificación usando lavados con Agua

METODO A

LAVADO CON AGUA

<b>INSUMO</b>	<b>COSTO DE MATERIA PRIMA</b>	<b>COSTO UNITARIO X GALON</b>	<b>UNIDAD DE MEDIDA</b>	<b>UNIDADES X GALON</b>	<b>COSTO UNITARIO X GALON</b>	<b>COSTO de PRODUCCIÓN (Q/gal biodiesel)</b>
Aceite vegetal	15	15	gal	1	15	15 Q/gal biodiesel
Metanol	34	6.8	gal	1	6.8	6.8 Q/gal biodiesel
Soda cáustica	14	0.5	Kg	1	0.5	0.50 Q/gal biodiesel
Ácido sulfúrico	2.4	0.25	Kg	1	0.25	0.25 Q/gal biodiesel
Agua de enfriamiento	0.72	0.05	m <sup>3</sup>	1	0.05	0.05 Q/gal biodiesel
Vapor (4 kg/cm <sup>2</sup> )	0.08	0.09	Kg	1	0.09	0.09 Q/gal biodiesel
Energía eléctrica	0.32	0.25	kWh	1	0.25	0.05 Q/gal biodiesel
Agua Para lavado	0.01	0.01	gal	2	0.02	
Costo operativos de tratamiento de agua	0.5	0.5		2	1	
Depreciación de planta de agua	0.08	0.08		1	0.08	
Depreciación planta Biodise	0.08	0.08		1	0.08	
Mano de obra	0.9	0.9		1	0.9	0.90 Q/gal biodiesel
Amortización	0.5	0.5		1	0.5	0.50 Q/gal biodiesel
<b>Costo</b>					<b>25.52</b>	
<b>Precio de Venta</b>					<b>Q 30.00</b>	

**Cuadro 14:** Costos de producción para el proceso de purificación usando tratamiento con arcilla

METODO B

LAVADO CON ARCILLA

INSUMO	COSTOS DE MATERIA PRIMA Q	COSTO UNITARIO X GALON	UNIDAD DE MEDIDA	UNIDADES X GALON	COSTO DE PRODUCCIÓN X GALON	COSTO de PRODUCCIÓN (Q/gal biodiesel)
Aceite vegetal	15	15	gal	1	15	15 Q/gal biodiesel
Metanol	34	6.8	gal	1	6.8	6.8 Q/gal biodiesel
Soda cáustica	14	0.5	Kg	1	0.5	0.50 Q/gal biodiesel
Ácido sulfúrico	2.4	0.25	Kg	1	0.25	0.25 Q/gal biodiesel
Agua de enfriamiento	0.72	0.05	m <sup>3</sup>	1	0.05	0.05 Q/gal biodiesel
Vapor (4 kg/cm <sup>2</sup> )	0.08	0.08	Kg	1	0.08	0.09 Q/gal biodiesel
Energía eléctrica	0.32	0.05	kWh	1	0.05	0.05 Q/gal biodiesel
Costo de lavado con zeolita	20	1	Kg	1	1	
Mano de obra		0.9		1	0.9	0.90 Q/gal biodiesel
Amortización	0.25	0.25		1	0.25	0.50 Q/gal biodiesel
Depreciación	0.08	0.08		1	0.08	
<b>Costo</b>					<b>24.96</b>	
<b>Precio de Venta</b>					<b>Q30.00</b>	

**Cuadro 15:** Estimado de Costos de Producción para dos Métodos de Purificación en la Producción de Biodiesel

<b>Parámetros Estimados</b>	<b>Método de Purificación con Agua</b>	<b>Método de Purificación con Arcilla</b>
Producción Anual	130,000 Galones	130,000 Galones
Ventas	Q3,900,000.00	Q3,900,000.00
Costo de producción	Q3,317,600.00	Q3,244,800.00
Ganancias brutas	Q582,400.00	Q655,200.00
Alquileres	Q36,000.00	Q36,000.00
Sueldos	Q307,500.00	Q270,000.00
Gastos operativos	Q50,000.00	Q50,000.00
Trasporte	Q60,000.00	Q60,000.00
Ganancias antes de gastos financieros	Q128,900.00	Q239,200.00
Intereses	Q22,000.00	Q11,000.00
Amortizaciones	Q66,672.00	Q33,333.00
Ganancias antes de impuestos	Q40,228.00	Q194,867.00
Impuestos 30%	Q12,068.40	Q58,460.10
ganancia Neta	Q28,159.60	Q136,406.90

**Cuadro 16:** VAN y TIR

<b>Indicadores</b>	<b>Método de Purificación con Agua</b>	<b>Método de Purificación con Arcillas</b>
Valor Actual Neto	Q 358,625.76	Q 712,075.15
Tasa Interna de Retorno	50.24%	169.16%





## **8. Discusión de Resultados**

### **8.1 Producción y refinación de ésteres de metilo (biodiesel)**

El tratamiento final de los ésteres de metilo (biodiesel) es importante puesto que en el proceso de transesterificación se obtiene como subproducto glicerina, de la cual la mayor parte se separa de los ésteres de metilo y una porción menor queda disuelta dentro del biodiesel. La glicerina se puede encontrar libre o combinada (especies mono y diglicéridos que no reaccionaron completamente al momento de efectuar la transesterificación), para los dos casos existe una regulación por parte de ASTM (D6751), la cual indica que el contenido no debe ser mayor a 0.02% en peso para la glicerina libre y 0.240% en peso para la glicerina total; si se diera el caso de biodiesel con un contenido superior a los porcentajes mencionados, pueden ocurrir problemas internos en el motor en el cual se utilice el biodiesel, ya que pueden provocar daños en los inyectores del motor y en el caso de las estaciones de servicio y expendio puede provocar problemas debido a que las condiciones climáticas pueden hacer que las propiedades físicas cambien de forma considerable y dañar los sistemas de distribución del biodiesel.

Para minimizar el contenido de glicerina libre y total en el biodiesel se realiza un lavado con agua, ya que la glicerina, los mono y diglicéridos pueden formar puentes de hidrógeno, lo cual hace que el agua arrastre la mayor parte de las especies de glicerina. Sin embargo, al realizar dicho lavado se presenta el inconveniente de que quedan residuos de agua disueltos en el biodiesel, lo cual también afecta a los motores y también puede afectar los sistemas de almacenamiento y distribución del combustible, puesto que al existir mucha humedad puede provocar corrosión en piezas metálicas, tanto de los motores, como en tanques de almacenamiento, válvulas, etc. Además, si el biodiesel presenta un contenido alto de jabones, pueden formarse emulsiones, que también pueden alterar las propiedades del biodiesel, otro problema que pueden causar los jabones es por la parte metálica que poseen, la cual puede provocar

incrustaciones y afectar la cámara de combustión, así como los pistones del motor.

## **8.2. Tratamiento final de biodiesel con minerales adsorbentes**

Para eliminar el contenido de humedad y las especies de glicerina se propuso realizar un tratamiento con adsorbentes minerales, siendo estos Bentonita, Zeolitas aniónicas, Zeolitas catiónicas, Talco y Magnesol. Con el tratamiento aplicado se esperaba remover la mayor cantidad de la humedad y glicerina posible, con el fin de que el biodiesel cumpla con la norma ASTM D6751.

Los minerales fueron elegidos por varias razones, la principal es por las capacidad que posee cada uno de los mismos para adsorber compuestos polares (agua, glicerina, jabones y catalítico), la segunda es el acceso que se tiene dentro del país, puesto que existen varios minerales sintéticos que funcionan muy bien para realizar el tratamiento, sin embargo, éstos son de origen extranjero y por eso requiere de una importación afectando a los costos de producción del biodiesel. En consecuencia puede existir problemas por competencia con los proveedores de diesel derivado del petróleo, sin embargo, se debe considerar que la combustión de los combustibles derivados del petróleo representan un alto impacto hacia el ambiente (calidad del aire), ya que las especies azufradas, por ejemplo, pueden provocar lluvia ácida, así como la formación de otros compuestos azufrados que son tóxicos para el ser humano; en el caso de la combustión del Biodiesel, no hay especies azufradas como producto de combustión.

Los resultados obtenidos indican que de los cinco minerales seleccionados, las zeolitas catiónicas remueven el glicerol total y libre hasta el punto de hacer que el biodiesel cumpla con las especificaciones según la norma ASTM D6751. En el caso de los demás minerales utilizados, también logran remover el glicerol libre y total, sin embargo, al final del tratamiento no se consigue el valor que especifica la norma ASTM.

Otra prueba que se realizó al biodiesel tratado fue la de contenido de humedad y sedimentos por centrifugación según la norma ASTM D2709. De acuerdo con la norma ASTM D6751 se establece que no se debe exceder de 0.050% V/V de agua. En el caso de los minerales en cuestión se observó que la mayoría de las muestras tratadas no superan ese límite, sin embargo, las zeolitas aniónicas y catiónicas trabajan mejor que el resto de minerales, puesto que al realizar la prueba no se detectó humedad ni sedimentos en el tubo de la centrífuga. El mineral que no cumplió con el límite de la norma fue el Magnesol, ya que se encontró que al final del tiempo máximo de centrifugación, el contenido de agua y sedimentos fue de 0.15% V/V, lo que corresponde a tres veces más del valor que la norma tiene establecido como límite máximo.

Se efectuaron pruebas para verificar si los minerales tenían algún efecto sobre el contenido de catalítico (residuos de hidróxido de potasio o hidróxido de sodio) y jabones; en el caso del catalítico y los jabones. Se encuentran presentes en el biodiesel por reacciones incompletas o por la presencia de mono y diglicéridos.

En el caso de las pruebas de catalítico y jabones, las zeolitas aniónicas y catiónicas, son las más efectivas para dicho tratamiento. Se debe considerar que el biodiesel sin tratar no presentó consumo de ácido clorhídrico, es decir, no existe contenido de catalítico sin reaccionar, sin embargo, para contenido de jabones si hubo consumo del mismo ácido. La razón por la que no se detectó el contenido de catalítico, es porque luego del proceso de transesterificación se separa la glicerina en la cual, por polaridad se encuentra disuelto el hidróxido de potasio.

Al evaluar la capacidad adsorbente de las zeolitas catiónicas y el efecto que tienen sobre los contaminantes del biodiesel, se puede decir que de los cinco minerales evaluados, fue el que mejores resultados proporcionó, puesto que

remueve la glicerina total y libre, con esto se está evitando el lavado del Biodiesel con agua, que además de eliminar por arrastre (solubilidad) la glicerina, ayuda también a eliminar jabones y el contenido de catalítico en exceso. El no utilizar agua es muy importante puesto que desde el punto de vista ambiental, es mejor recurrir a un tratamiento de este tipo para evitar tener contacto con el recurso hídrico y por consiguiente se evita tener un sistema para el tratamiento de desechos líquidos, el cual podría ser inclusive, hasta más caro que la misma planta de producción de biodiesel.

El hecho de que las zeolitas hayan respondido mejor que el resto de minerales se debe a que son capaces de llevar a cabo un intercambio selectivo de iones, las áreas internas que poseen son capaces de adsorber moléculas polares y pueden actuar como catalizadores ácidos sólidos debido a un intercambio isoelectrónico con el aluminio que forma parte de la estructura. El magnesol también remueve jabones, sin embargo, se presenta problema con los sedimentos, ya que por el tamaño de su partícula es bastante difícil su remoción, este problema también se observó con la bentonita y el talco.

Finalmente se hizo un cálculo del porcentaje de remoción para cada mineral, utilizando como variable el contenido de glicerina total, los resultados indican que las zeolitas catiónicas proporcionan un 76.86% de remoción de glicerina total. En orden decreciente, los minerales evaluados quedan ordenados en función de su mejor desempeño para la remoción de glicerina y agua:

Zeolitas catiónicas > Zeolitas aniónicas > Magnesol > Talco > Bentonita

Este orden se puede observar también gráficamente tanto en las gráficas de barras como en las de cajas de Tukey y de líneas. El tratamiento estadístico realizado de análisis de varianza permite concluir que existe diferencia estadísticamente significativa entre los grupos analizados. A través de la prueba

de Dunnett, que compara a todos los grupos contra un control (en este caso el biodiesel sin tratar), y confirma que en todos los minerales existe una diferencia estadísticamente significativa en el contenido de jabones, glicerina y humedad ( $p < 0.01$ )

### **8.3 Evaluación Económica**

Para la evaluación de cual de dos métodos de purificación de Biodiesel es económicamente más conveniente, se consideraron los costos de implementar una planta Artesanal, productora de Biodiesel con capacidad de producir 500 galones diarios. Se consideró también que el capital inicial provendría en su totalidad de un préstamo a 36 meses con una tasa de interés anual del 11%. Las dos variables para el proceso de purificación del Biodiesel son:

Opción A: lavado con agua, el cual requiere la construcción de un sistema de purificación del agua utilizada en el proceso, previo a ser descartada al drenaje.

Opción B: purificación con arcillas (zeolitas) para retener las impurezas, cuya implementación no implica ninguna inversión en infraestructura.

Antes de tomar una decisión respecto a la implementación de uno u otro proceso industrial, es de suma importancia evaluar la rentabilidad de las alternativas que se tengan y establecer cual es la mejor opción para hacer una inversión acertada.

En el caso de la producción del Biodiesel, a priori parecería que realizar el proceso de purificación del producto final utilizando agua municipal para hacer lavados resulta mas conveniente que la inversión en arcillas comerciales que logren la purificación, sin embargo al estudiar mas a fondo la inversión necesaria

considerando los procesos adicionales que se requieren al utilizar este método, el escenario es diferente.

Los procesos implicados en el método de lavado con agua, considerados para esta evaluación, son básicamente dos: el tratamiento del agua previo a su descarte en el drenaje municipal, y el proceso de retirar la humedad remanente en el Biodiesel.

Es importante resaltar que se consideraron valores fijos para los costos de producción utilizando ambos métodos en los 6 años estimados, así como una producción fija y ninguna inversión de crecimiento de la planta en el mismo lapso.

Tomando en cuenta los valores obtenidos para los diferentes indicadores financieros que se presentan en los cuadros No. 1 y No. 2 es posible establecer que:

Es necesario contar con un capital operativo inicial mas alto para implementar el método de lavado de Biodiesel con agua, ya que implica la construcción de un sistema completo de tratamiento de aguas, lo cual prácticamente duplica la inversión inicial, considerando que se trata de un capital por el cual se deben pagar intereses, no es la opción mas conveniente.

Dado que en ambos escenarios se está considerando que el capital operativo provendría de un préstamo bancario, es importante considerar el NOPAT que estima cuanto podría ganar la empresa si no tuviese cuentas por pagar. Evaluando los datos obtenidos para cada método es evidente que las ganancias son mas altas utilizando el método de purificación con arcilla.

Dado que el ROIC para el método de purificación con arcillas es considerablemente mayor en los primeros 3 años y en los tres años subsecuentes, contra el valor obtenido para el método de lavados con agua, se puede confirmar que la inversión tiene un uso mucho más efectivo si se aplica como procedimiento de purificación el uso de arcillas.

En el caso del análisis del costo de capital (WACC), debido a que se consideró para ambos casos una inversión inicial proveniente de un préstamo bancario a 36 meses con el 11% de interés, el indicador es exactamente igual, no importando el método de purificación que se implemente.

El valor económico agregado (Economic Value Added EVA ) o utilidad económica es el producto obtenido por la diferencia entre la rentabilidad de los activos y el costo de financiación o de capital requerido para poseer dichos activos.

El Valor Económico Agregado (EVA) es más que una medida de actuación, es parte de una cultura: la de Gerencia del Valor, que es una forma para que todos los que toman decisiones en una empresa se coloquen en una posición que permita delinear estrategias y objetivos encaminados fundamentalmente a la creación de valor.

El EVA es el resultado de deducir de todos los ingresos operacionales la totalidad de los gastos operacionales, el valor de los impuestos y el costo de oportunidad, es importante su análisis ya que se considera la productividad de todos los factores utilizados para desarrollar la actividad empresarial.

El valor económico agregado se fundamenta en que los recursos empleados por una empresa, en este caso la producción del Biodiesel, con cualquiera de las opciones de proceso de purificación, debería producir una rentabilidad superior a su costo, tal situación ocurre únicamente en el método que

propone la purificación con zeolitas, donde puede verse claramente que el EVA es superior a la inversión inicial, en el caso de la inversión necesaria para implementar el método de lavados con agua, la inversión supera al EVA por lo tanto del análisis de este indicador de productividad se deduce que no es conveniente la implementación del lavado con agua.

Tomando en cuenta que la relación de Efectivo Flotante Operativo (o FCF en inglés) es de 1.86 a 1 para el método de arcillas sobre el método de lavado con agua, la inversión mas rentable es sin duda el método de purificación con arcillas. No obstante éste parámetro podría haber sido diferente si en cualquiera de los dos casos se hubiese planteado alguna inversión en los 6 años que se consideraron para este estudio, y aún así no representar que una inversión fuese mejor que la otra, ya que este parámetro puede ser engañoso si las compañías están invirtiendo su efectivo con el propósito de mejorar su productividad y por ende su rentabilidad.

El objetivo de las decisiones de inversión es encontrar activos cuyo valor supere su costo y por ello, es de suma importancia que para cualquier proyecto de inversión se analice previamente el Valor Actual Neto, ya que es un indicador del valor del dinero hoy. En el caso del proyecto de inversión entre implementar un método de purificación con arcillas y la alternativa de utilizar lavados con agua, el VAN que se obtendría aplicando el primer método es casi del doble que purificando mediante lavados con agua. Considerando un lapso de 6 años, el VAN es positivo no importando que método se implemente, sin embargo el que en uno sea significativamente mayor que en el otro es un claro indicativo de que es mas conveniente la utilización de arcillas. Así mismo este valor está asociado al resultado obtenido para la Tasa Interna de Retorno, en cuyo resultado puede apreciarse que la opción de purificación con arcillas recupera la inversión en el primer año de vida del proyecto.



El contenido de agua en el Biodiesel es crítico debido a que puede dañar importantes piezas de los motores, considerando que éste combustible es mucho más afín al agua que el Diesel de Petróleo, el proceso de producción debe garantizar la eliminación del agua remanente, de tal forma que se cumpla con la norma EN14214 (no mayor a 500mg/Kg.)(9).

Utilizando purificación con zeolitas se minimiza el riesgo de no cumplir con la norma ya que no se añade agua al producto, la cual aunque se cuente con un sistema eficiente de eliminación por calentamiento puede quedar como remanente al utilizar el método de lavado con agua.



## Conclusiones

1. De los dos métodos de purificación para Biodiesel evaluados, se determinó que el que utiliza arcillas es el más rentable, por lo que se comprueba, que la hipótesis nula es correcta.
2. Se encontró que, de los 5 materiales adsorbentes probados, las zeolitas catiónicas son las que presentan el mejor desempeño.
3. En la cuantificación del contenido de agua remanente en el Biodiesel por centrifugación, se encontró que el menor contenido lo presentan las muestras de Biodiesel tratadas con zeolitas.
4. Los niveles de Glicerina Total y Libre son menores utilizando zeolitas catiónicas, lo cual permite prescindir de lavados con agua al Biodiesel.
5. Se encontró que las zeolitas catiónicas, aniónicas y el Magnesol permiten remover totalmente el contenido de jabones en el Biodiesel.
6. Se encontró que es económicamente factible implementar ambos métodos de purificación.
7. El análisis de los indicadores económicos utilizados permitió determinar que, no obstante que el método de lavados con agua, pareciera ser en principio ser más económico, al tomar en cuenta las implicaciones que conlleva, tales como la construcción de una planta de tratamiento, los remanentes de humedad que deja en el Biodiesel y un paso adicional en la producción (secado), se encontró que es más costoso y no agrega ningún valor extra al producto terminado.



## Recomendaciones

1. Implementar el uso de zeolitas catiónicas para purificación de Biodiesel, por ser el método más rentable entre los dos evaluados.
2. Por su alto desempeño en la eliminación de glicerina total, glicerina libre, jabones y agua se recomienda el uso de zeolitas catiónicas como primera opción para la purificación de Biodiesel.
3. Para la remoción efectiva de jabones puede utilizarse Magnesol®, zeolitas catiónicas y aniónicas.
4. Invertir en proceso de purificación con zeolitas catiónicas para la purificación de Biodiesel en vez de la opción de lavados con agua, cuyo uso requiere de tratamiento de purificación subiendo los costos de producción.
5. Es importante dar a conocer esta técnica de refinación de Biodiesel ya que presenta la ventaja de conservar el recurso hídrico, eliminando el uso de agua en el proceso.



## Bibliografía

1. Pahl, Greg. "Biodiesel, Growing a New Energy Economy" 1<sup>st</sup>. Edition. Chelsea Green Publishing Company. Canada 2005.
2. Zhang, Y. Dubé, M.A. McLean D.D. Kates, M. 2003 "Biodiesel production from waste vegetable oil: 1. Process design and technological assessment", *Bioresource Technology*, 89 (2003) pp. 1 – 16.
3. Körbitz, W., 1999. "Biodiesel production in Europe and North America, an encouraging prospect." *Renew. Energy* 16, pp. 1078 – 1083.
4. Agarwal, A.K., Das, L.M., 2001. "Biodiesel development and characterization for use as a fuel in compression ignition engines". *J. Eng. Gas Turbines Power* 123, pp. 440–447.
5. Pereira R., L., Wilhelm, H.M. 2005. "Current Status of Biodiesel Development in Brazil". Humana Press Inc. pp. 808 – 818.
6. Nelson, L.A., Foglia, T.A., Marmer, W.N., 1996. "Lipase-catalyzed production of Biodiesel." *J. Am. Oil Soc. Chem.* 73 (8), 1191– 1195.
7. Watanabe, Y., Shimada, Y., Sugihara, A., Tominaga, Y., 2001. "Enzymatic conversion of waste edible oil to Biodiesel fuel in a fixedbed bioreactor." *J. Am. Oil Soc. Chem.* 78 (2), 703–707.
8. Fangrui Ma, Milford A. Hanna, 1999 "Biodiesel production: a review" *Bioresource Technology* 70, 1 – 15.

9. Knothe G. Krahl, J. Van Gerpen, J. "The Biodiesel Handbook" AOCS Press.
10. García R., E., Suárez B., M. 2000. "Las arcillas: propiedades y usos". Universidad Complutense (Madrid), Universidad de Salamanca. España. pp. 1 – 19.
11. "Zeolita un adsorbente de contaminantes del aire". 1999. Clean Air Technology Center (MD-12) Information Transfer and Program Integration Division Office of Air Quality Planning and Standards U.S. Environmental Protection Agency. USA. pp. 1 – 19.
12. Pine, S., Hendrickson, J. Química Orgánica. 4ta. Edición. McGraw-Hill. España 1982. pp. 335 – 338.
13. Carlstein, R. El Biodiesel como disolución bioenergética. ZOE Tecno-Campo ([www.zoetecnocampo.com](http://www.zoetecnocampo.com)). Argentina 2004. pp. 1 – 3.
14. Standard Test Method for Water and Sediment in Middle Distillate Fuels by Centrifuge. ASTM D 2709 – 96 (Reapproved 2001).
15. Total, Free and Combined Glycerol Iodometric-Periodic Acid Method. AOCS Official Method Ca 14-56. USA 1997. pp. 1 – 3.
16. "An overview of Biodiesel and petroleum diesel life cycles". U.S. Department of Agriculture and U.S. Department of Energy. USA 1998. p.p. 18 – 19.
17. Pla, J. M. "Inyección Diesel para camiones y automóviles". 1989. Ediciones CEAC, S.A. Barcelona, España. pp. 5 – 8.



18. Material Safety Data Sheet. Magnesium Silicate MSDS. ScienceLab.com Chemical & Laboratory Equipment. Septiembre 2005.
19. Pearl, R. M. "Geología". 3era edición. Compañía editorial Continental, S.A. España 1971. p.p. 19.
20. Earth Trends Country Profiles. "Energy and Resources – Guatemala". USA 2003.
21. Merck Index, 13a. Edition.
22. Agudelo, J. "Biodiesel. Una revisión del desempeño mecánico y ambiental". Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia 2004. pp. 1 – 4.



## Anexos

### Cálculos para determinación de contenido de glicerina total.

$$\% \text{ Glicerina total} = \frac{(B - S) \times N \times 2.302}{W}$$

En donde:

**B** es el volumen de titulante que fue consumido para el blanco.

**S** es el volumen de titulante que fue consumido para cada muestra de biodiesel analizado.

**N** es el valor de la Normalidad del Tiosulfato de sodio.

**W** es el peso de la muestra representada por la alícuota tomada según indica el método para el análisis de glicerina total.

Para el peso **W** se debe realizar en siguiente cálculo:

$$W = \frac{\text{Peso de la muestra (g)} \times \text{volumen de la muestra (ml de la alícuota)}}{900}$$

Ejemplo: Contenido de glicerina total en muestra de biodiesel tratado con zeolitas catiónicas.

Cantidad de muestra = 10.0432 g

Alícuota de muestra = 100 ml

Volumen de Tiosulfato de sodio para blanco = 47.15 ml

Volumen de Tiosulfato de sodio para muestra = 46.10 ml

Normalidad de Tiosulfato de sodio = 0.1 N

$$W = \frac{10.0432 \times 100}{900} = 1.11591$$

$$\% \text{ Glicerina total} = \frac{(47.15 - 46.10) \times 0.1 \times 2.302}{1.11591} = 0.217 \%$$

### **Cálculos para la determinación de glicerina libre.**

$$\% \text{ Glicerina libre} = \frac{(B - S) \times N \times 2.302}{W}$$

En donde:

**B** es el volumen de titulante que fue consumido para el blanco.

**S** es el volumen de titulante que fue consumido para cada muestra de biodiesel analizado.

**N** es el valor de la Normalidad del Tiosulfato de sodio.

**W** es el peso de la muestra representada por la alícuota tomada según indica el método para el análisis de glicerina libre.

Para el peso **W** se debe realizar en siguiente cálculo:

$$W = \frac{\text{Peso de la muestra (g) x volumen de la muestra (ml de la alícuota)}}{900}$$

Ejemplo: Contenido de glicerina libre en muestra de biodiesel tratado con zeolitas catiónicas.

Cantidad de muestra = 10.0432 g

Alícuota de muestra = 100 ml

Volumen de Tiosulfato de sodio para blanco = 49.00 ml

Volumen de Tiosulfato de sodio para muestra = 48.90 ml

Normalidad de Tiosulfato de sodio = 0.1 N

$$W = \frac{10.0132 \times 100}{900} = 1.11258$$

$$\% \text{ Glicerina libre} = \frac{(49.00 - 48.90) \times 0.1 \times 2.302}{1.11258} = 0.021 \%$$

## **Cálculos para determinar contenido de humedad y sedimentos, norma ASTM D 2709.**

El cálculo de humedad y sedimentos no requiere más que realizar la centrifugación con los tubos que indica la norma arriba mencionada, luego de realizada la centrifugación durante 10 minutos a 1560 revoluciones por minuto (rpm), se hace la lectura directa en el tubo de la centrífuga, el cual posee la graduación adecuada determinar el porcentaje V/V de humedad y sedimentos. Para detalles del equipo ver anexo de fotografías.

## **Cálculos para determinar contenido de jabones.**

$["B" \text{ ml de HCl } 0.1N] \times [1 \text{ litro} / 1000\text{ml}] \times [0.1 \text{ moles de HCl} / \text{litro}] \times [1 \text{ mol jabón} / 1 \text{ mol HCl}] \times [320.56\text{g/mol jabón}] / [\text{gramos de muestra}] = \text{gramos de KOH/muestra}$

$\frac{B \times 0.1 \times 320.56}{1000 \times W} = \text{gramos de jabón (como oleato de potasio)/gramos de muestra}$

Ejemplo: Contenido de jabones en muestra de biodiesel tratado con bentonita

Volumen consumido de ácido clorhídrico (B) = 0.8 ml

Peso de muestra (W) = 25.2250 g

$0.8 \times 0.1 \times 320.56$

$\frac{\quad}{1000 \times 25.2250} = \underline{\underline{0.00102 \text{ g de jabón (oleato de potasio) / g de muestra}}}$

1000 x 25.2250

## Cálculos para determinar contenido de catalítico.

[“A” ml de HCl 0.1N] x [1 litro / 1000ml] x [0.1 moles de HCl / litro] x [1mol KOH / 1mol HCl] x [56.1g/mol KOH] / [gramos de muestra] = gramos de KOH/muestra

o

$\frac{A \times 0.1 \times 56.1}{1000 \times W}$  = gramos de KOH catalítico / gramos de muestra

Ejemplo: Contenido de catalítico en muestra de biodiesel tratado con talco.

Volumen consumido de ácido clorhídrico (A) = 0 ml

Peso de muestra (W) = 25.3423 g

0 x 0.1 x 56.1

————— = **0 g de catalítico (KOH) / g de muestra**

1000 x 25.3423

## Fotografías



**GRÁFICA 20:** VISTA DEL EQUIPO UTILIZADO PARA EL REFLUJO QUE REQUIERE EL MÉTODO OFICIAL AOCS CA 14-56, PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL.





**GRÁFICA 21:** LUEGO DEL REFLUJO DE 30 MINUTOS, LAS MUESTRAS DEBEN SER TRASLADADAS HACIA BALONES AFORADOS QUE CONTIENEN ÁCIDO ACÉTICO Y CLOROFORMO, LA SOLUCIÓN ACUOSA ES LA QUE SE UTILIZA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL POR MEDIO DEL MÉTODO YODOMÉTRICO AOCS CA 14-56.



**GRÁFICA 22:** VISTA DE LA CENTRÍFUGA UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS EN LAS MUESTRAS DE BIODIESEL TRATADAS Y SIN TRATAR.





**GRÁFICA 23:** VISTA DEL INTERIOR DE LA CENTRÍFUGA UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS, EL DIÁMETRO ES DE 23 PULGADAS, DICHO DIÁMETRO SIRVIÓ PARA DETERMINAR LAS REVOLUCIONES POR MINUTO (RPM) A LAS QUE SE HARÍA LA CENTRIFUGACIÓN POR 10 MINUTOS.



**GRÁFICA 24:** TUBO UTILIZADO PARA REALIZAR LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS (ASTM D 2709) POR CENTRIFUGACIÓN, SE PUEDE OBSERVAR LA GRADUACIÓN QUE POSEE EL MISMO PARA PODER REALIZAR LA LECTURA DIRECTA.