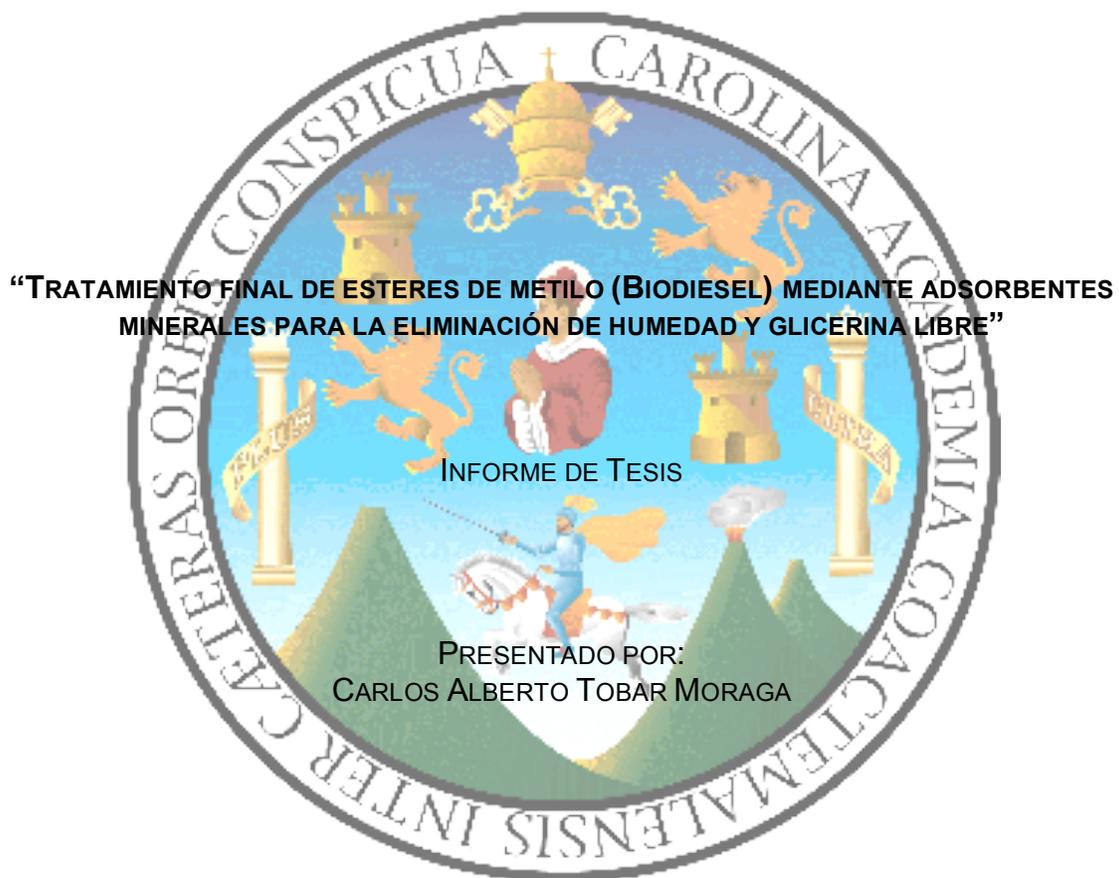


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA



PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
QUÍMICO

Guatemala, Febrero de 2008

**JUNTA DIRECTIVA****Oscar Cóbar Pinto, Ph.D.****Decano****Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto****Secretario****Licda. Lillian Raquel Irving Antillón, M.A.****Vocal I****Licda. Liliana Vides de Urizar****Vocal II****Licda. Beatriz Eugenia Batres de Jiménez****Vocal III****Br. Mariesmeralda Arriaga Monterroso****Vocal IV****Br. José Juan Vega Pérez****Vocal V**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al pueblo de Guatemala

A la Universidad de San Carlos de Guatemala

A la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

### **A mis Padres**

Carlos Alberto Tobar Jiménez y Elsa Judith Moraga Avila (QEPD) por todo el apoyo y motivación recibidos en todo momento.

### **A mi Esposa**

Wendy Maricela Recinos Rodríguez, por el apoyo incondicional, la paciencia y las palabras de aliento, desde siempre.

### **A mis Hijos**

Andrea Cecilia y Diego Alejandro, por servir de inspiración para alcanzar el éxito y culminar el presente trabajo de tesis.

### **A mis Hermanos**

Nadia Sofía y Manuel Esteban, por su buena voluntad para apoyarme en el momento que ha sido necesario.

### **A mis Suegros**

Luis Enrique Recinos Portales y María Piedad Rodríguez, por el constante apoyo y cariño demostrado.

Al Licenciado Pedro Alejandro Ordóñez Cruz, por la asesoría en el desarrollo de este trabajo de tesis.

Al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, a la Licenciada Diana Elizabeth Pinagel Cifuentes, al Ingeniero Fausto Escalante de la empresa Duke Energy International Guatemala y al Licenciado Jhoni Frank Alvarez Castañeda, por todo el apoyo brindado para la realización y culminación de este trabajo de tesis.

**A mis amigos**

Pedro, Patty, Renato, Edgar, Cecilia, Chejo, Elisa, Herbert y Tono, por su apoyo y preocupación recibidos durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

## **DEDICATORIA**

### **A mis Padres**

Carlos Alberto Tobar Jiménez

Elsa Judith Moraga Ávila (QEPD)

### **A mi Esposa**

Wendy Maricela Recinos Rodríguez

### **A mis Hijos**

Andrea Cecilia y Diego Alejandro

### **A mis Hermanos**

Nadia Sofía y Manuel Esteban

### **A mis Suegros**

Luis Enrique y María Piedad

### **A mi Cuñada**

Beberly Andrea

### **A mis Sobrinas**

Ana Judith y Adriana Sofía

### **A mis Abuelos**

Manuel de Jesús Tovar Rodríguez

Marina Esperanza Jiménez (QEPD)

Esteban Moraga Sánchez (QEPD)

María Ernestina Ávila

### **A mis compañeros de la Escuela de Química**

Pedro, Patty, Renato, Edgar, Fausto, Mirsa, Erick, Jhoni, Julio.

## ÍNDICE

<b>1. RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	<b>4</b>
3.1 HISTORIA DE LOS MOTORES DIESEL .....	4
3.2 BIODIESEL .....	4
3.3 USOS DEL BIODIESEL .....	8
3.4 BENEFICIOS DE LA UTILIZACIÓN DE BIODIESEL .....	9
3.5 QUÍMICA DEL BIODIESEL .....	10
3.6 ACEITE DE PALMA .....	11
3.7 PRESENCIA DE AGUA EN BIODIESEL .....	12
3.8 CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL Y LIBRE EN BIODIESEL .....	13
3.9 MINERALES ADSORBENTES .....	13
3.9.1 Arcillas .....	13
3.9.2 Zeolitas .....	15
3.9.3. Características más importantes de las zeolitas .....	17
3.9.4. Magnesol ® .....	18
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>19</b>
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
5.1. OBJETIVO GENERAL: .....	22
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	22
<b>6. HIPÓTESIS</b> .....	<b>23</b>
<b>7. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
7.1. UNIVERSO DE TRABAJO .....	24
7.2. MATERIALES .....	24
7.3. REACTIVOS .....	24
7.4. PROCEDIMIENTO .....	25
7.4.1. Síntesis de Biodiesel .....	25
7.4.1.1. Formación del metóxido de sodio (para 10L de aceite) .....	25
7.4.1.2. Formación de Biodiesel .....	25
7.4.1.3. Tratamiento final del biodiesel .....	25
7.4.2. Determinación de humedad (agua) y sedimentos en Biodiesel .....	25
7.4.3. Determinación de glicerina total y libre en Biodiesel (Método AOCS Ca 14-56) .....	26
7.5. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	27
<b>8. RESULTADOS</b> .....	<b>28</b>
8.1. RESULTADOS CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL .....	28
8.1.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	28
8.1.2. BENTONITA .....	28
8.1.3. ZEOLITAS ANIONICAS .....	28
8.1.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	29
8.1.5. TALCO .....	29
8.1.6. MAGNESOL .....	29
8.2. RESULTADOS CONTENIDO DE GLICERINA LIBRE .....	30
8.2.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	30
8.2.2. BENTONITA .....	30
8.2.3. ZEOLITAS ANIONICAS .....	30
8.2.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	31

8.2.5. TALCO .....	31
8.2.6. MAGNESOL .....	31
8.3. RESULTADOS CONTENIDO DE HUMEDAD .....	31
8.3.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	31
8.3.2. BENTONITA .....	32
8.3.3. TALCO .....	32
8.3.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	32
8.3.5. ZEOLITAS ANIONICAS .....	32
8.3.6. MAGNESOL .....	33
8.4. RESULTADOS DE CONTENIDO CATALITICO .....	34
8.4.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	34
8.4.2. BENTONITA .....	34
8.4.3. TALCO .....	34
8.4.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	34
8.4.5. ZEOLITAS ANIONICAS .....	35
8.4.6. MAGNESOL .....	35
8.5. RESULTADOS CONTENIDO DE JABONES .....	35
8.5.1. BIODIESEL SIN TRATAR .....	35
8.5.2. BENTONITA .....	36
8.5.3. TALCO .....	36
8.5.4. ZEOLITAS CATIONICAS .....	36
8.5.5. ZEOLITAS ANIONICAS .....	37
8.5.6. MAGNESOL .....	37
8.6. PORCENTAJES DE REMOCION .....	37
8.6.1. Porcentajes de remoción de glicerina total .....	37
8.6.2. Porcentajes de remoción de glicerina libre .....	38
8.6.3. Porcentajes de remoción de humedad y sedimentos .....	38
8.6.4. Porcentajes de remoción de jabones .....	38
8.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	41
8.7.1 Glicerina Total .....	41
8.7.2. Análisis de varianza glicerina total .....	41
8.7.3. Glicerina Libre .....	43
8.7.4. Análisis de varianza glicerina libre .....	43
8.7.5. Humedad .....	45
8.7.6. Análisis de varianza humedad .....	46
8.7.7. Jabones .....	47
8.7.8. Análisis de varianza jabones .....	47
<b>9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
9.1. PRODUCCIÓN Y REFINACIÓN DE ÉSTERES DE METILO (BIODIESEL) .....	50
9.2. TRATAMIENTO FINAL DE BIODIESEL CON MINERALES ADSORBENTES .....	51
<b>10. CONCLUSIONES .....</b>	<b>54</b>
<b>11. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>55</b>
<b>12. REFERENCIAS .....</b>	<b>56</b>
<b>13. ANEXOS .....</b>	<b>58</b>
13.1. CÁLCULOS PARA DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE GLICERINA TOTAL .....	58
13.2. CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DE GLICERINA LIBRE. ....	59
13.3 CÁLCULOS PARA DETERMINAR CONTENIDO DE HUMEDAD Y SEDIMENTOS, NORMA ASTM D 2709.60	60
13.4 CÁLCULOS PARA DETERMINAR CONTENIDO DE JABONES. ....	60
13.5 CÁLCULOS PARA DETERMINAR CONTENIDO DE CATALITICO .....	60
13.6 FOTOGRAFÍAS .....	62
13.7 PROPIEDADES Y DATOS DE SEGURIDAD DE REACTIVOS .....	67

## 1. RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo general 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 lo cual se realizaron mediciones iniciales de contenido de humedad y sedimentos, glicerina total y libre en muestras de biodiesel sin tratar.

Luego del 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. Es importante tomar en cuenta el tratamiento final del biodiesel con minerales adsorbentes, ya que es una opción que no solo beneficia el proceso de refinación del biodiesel, sino que además, desde el punto de vista ambiental, evita que se utilice agua en el proceso de lavado para eliminar glicerol, evitando así la construcción de una planta de tratamiento para los desechos líquidos que se generarían luego de dicho lavado.

## 2. INTRODUCCIÓN

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 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 poder eliminar el exceso de glicerina es necesario hacer lavados con agua, ya que la glicerina es miscible con el agua y el Biodiesel no lo es. Al hacer este tipo de tratamiento se está dejando cierto contenido de humedad el cual también puede provocar problemas al someter a combustión el Biodiesel dentro de un motor. La humedad es relativamente más fácil eliminarla,

ya que si se utilizan materiales adsorbentes se podrá bajar el nivel de agua a menos de 0.05% en volumen, el cual es el límite que pide cumplir la norma ASTM para Biodiesel.

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.

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1 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)

#### 3.2 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 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

---

<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.

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 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

---

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

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)

### **3.3 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)

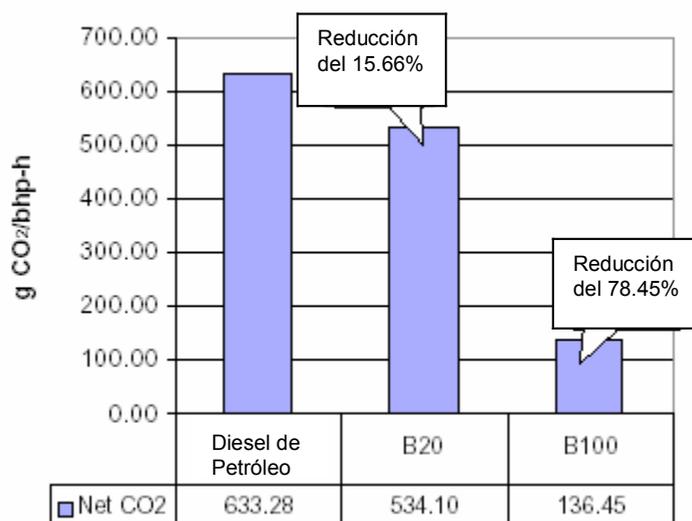
El Biodiesel puede ser utilizado en trenes, botes (barcos), tractores y maquinaria agrícola, equipo para granjas, equipos para generar energía eléctrica. Se han hecho también experimentos para introducir el Biodiesel en todo lo relacionado con la aviación tanto civil como militar. También se puede emplear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

---

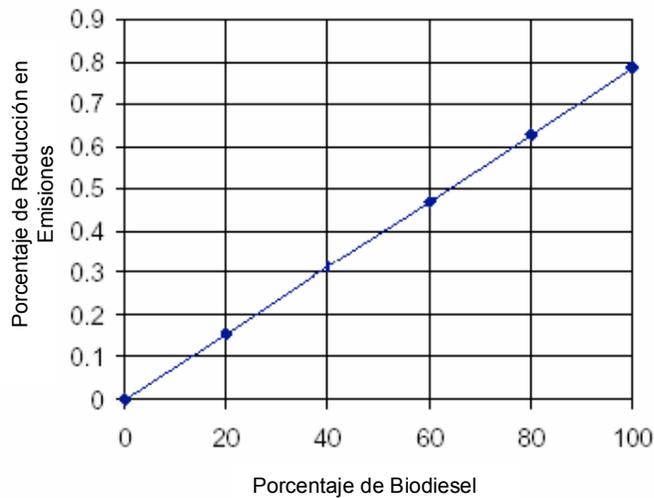
<sup>4</sup> ASTM: American Society for Testing and Materials.

### 3.4 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 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)



**Figura No. 1:** Comparación de la emisión neta de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para Diesel derivado de petróleo y mezclas de Biodiesel. (16)

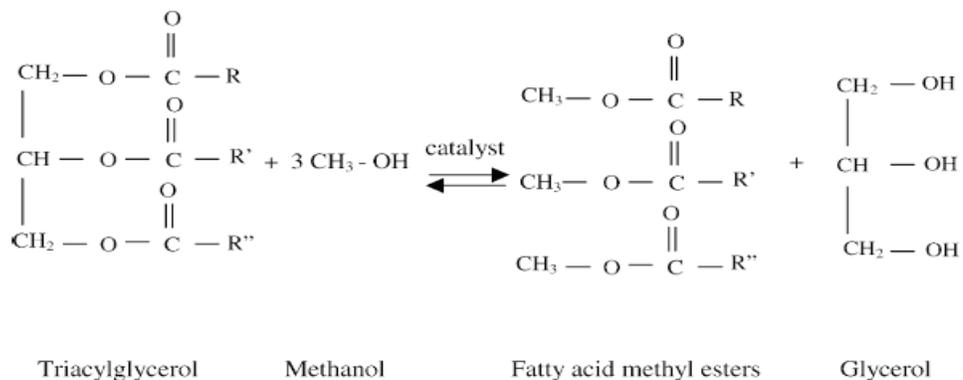


**Figura No. 2:** Efecto del nivel de mezcla de Biodiesel en la emisión de CO<sub>2</sub>. (16)

### 3.5 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)

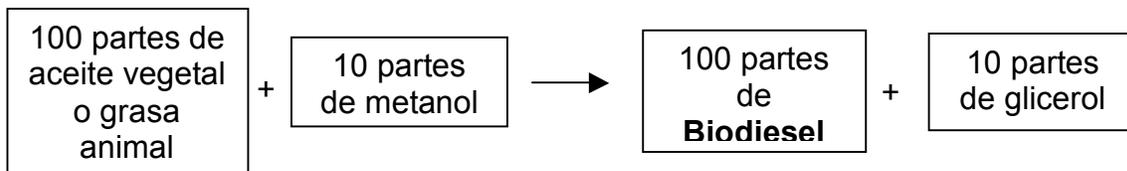
La reacción general de transesterificación de un triglicérido es la siguiente:



**Figura No. 3:** 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
- jatropa (*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)

### 3.6 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 oleina 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	Oleina 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

**Tabla No.1.** Propiedades fisicoquímicas del aceite de palma y sus fracciones.

### 3.6.1 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	Oleina 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

**Tabla No.2.** Composición de ácidos grasos en aceite de palma y sus fracciones.

### 3.7 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)

### **3.8 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)

### **3.9 Minerales adsorbentes**

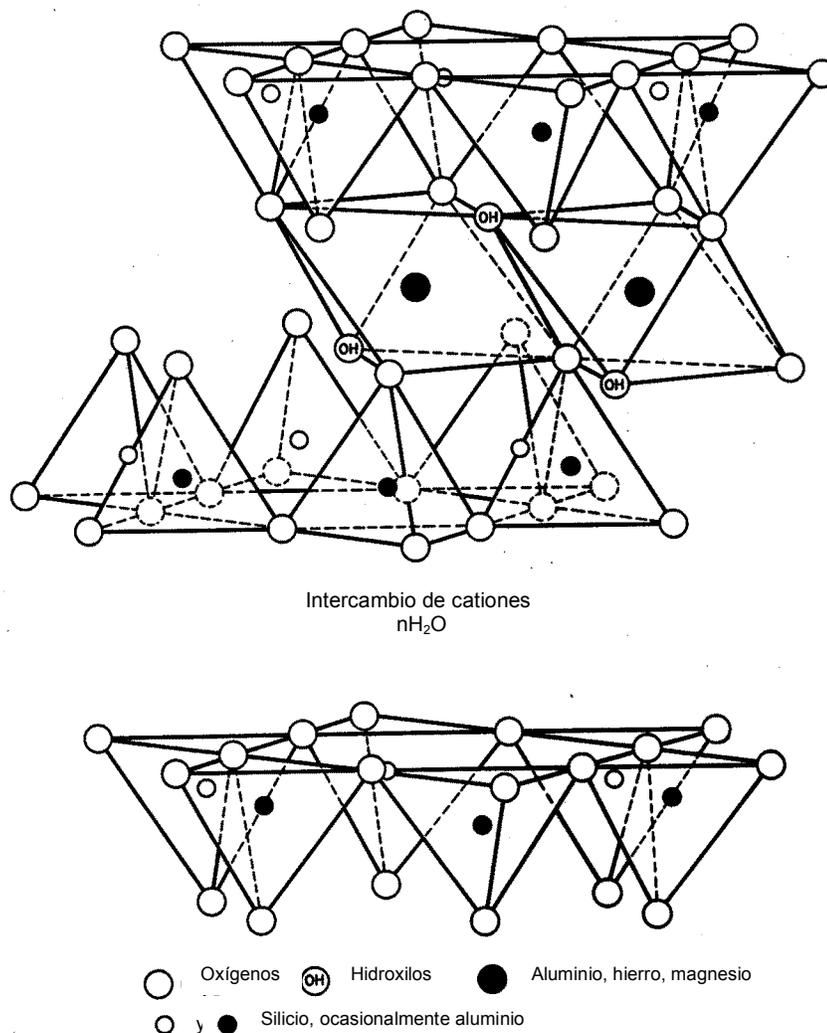
#### **3.9.1 Arcillas**

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)

---

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

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  $\text{Zn}^{+2}$ . 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  $(\text{OH})^-$  de la capa brucítica o gibbsítica, de forma que, en este plano, quede un  $(\text{OH})^-$  en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los  $(\text{OH})^-$  son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros. Dentro de los filossilicatos más comunes se puede mencionar, el caolín y el talco. (10)



**Figura No. 4:** Estructura de filossilicatos

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)

### 3.9.2 Zeolitas

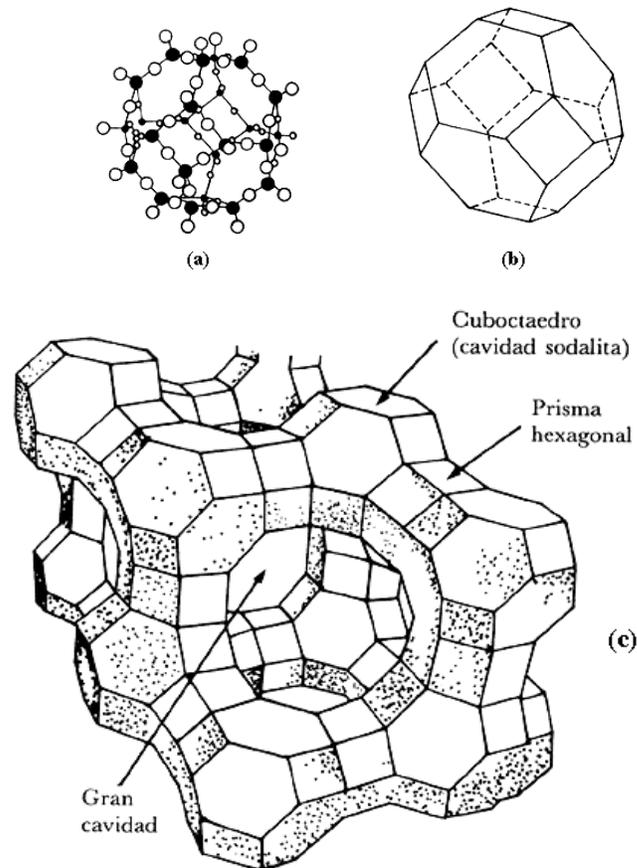
Las zeolitas son arcillas compuestas de aluminio, silicio, y oxígeno. Se halla en una variedad de regiones del mundo donde la actividad volcánica prehistórica ocurrió cerca del agua, o donde el agua ha estado presente por milenios desde las erupciones. En 1756, el mineralogista<sup>6</sup> sueco Baron 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 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)

---

<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

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)



**Figura No. 5:** 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).

### 3.9.3. 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 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.

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

- 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.

#### **3.9.4. 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.

## 4. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala el consumo de combustibles derivados del petróleo es bastante alta, por ejemplo para el año 2000 se hizo un estudio en el cual se determinó que cada persona consume aproximadamente 88 litros de combustible por año y multiplicado ésto por el número de habitantes que es mayor a 12 millones, es un valor aproximado de 279 millones de galones de combustible por año. Tomando en cuenta que el combustible que se utiliza en Guatemala es derivado del petróleo, se esperaría que la combustión de esa cantidad de combustible altere considerablemente la calidad del aire. (20)

Actualmente en Guatemala ha surgido la necesidad y preocupación por parte del sector privado y el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Universidad de San Carlos de Guatemala de estar monitoreando la calidad del aire y a la vez aplicar algún tipo de acción correctiva en los casos que se ha encontrado que las emisiones son bastante elevadas en cuanto a contaminantes se refiere. Dentro de las mejoras que los diferentes tipos de industria han realizado, están las instalación de ciclones dentro de las chimeneas de las calderas, utilización de filtros cuando se trata de alguna trituradora, tratamiento de los gases de emisión por combustión de combustibles fósiles a través de tratamientos químicos (eliminación de gases de SO<sub>2</sub> tratados con suspensión de hidróxido de calcio y formación de sulfato de calcio), esto en el caso del sector industrial. En el caso del parque automotor, se determinó por medio de un estudio realizado en los años 1994 a 1996<sup>8</sup>, que el 70% de la contaminación de la Ciudad de Guatemala, es provocada por las emisiones vehiculares, tomando en cuenta los motores a gasolina y diesel. Sin embargo, a pesar de este dato, hasta estos dos últimos años ha surgido la

---

<sup>8</sup> Estudio realizado por el Laboratorio de Monitoreo del Aire, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.

novedad de los biocombustibles dentro de los cuales se encuentran, el Biodiesel y bioetanol (el cual se pretende utilizar mezclado con gasolina), entre otros.

En el caso del bioetanol, el propósito de utilizarlo mezclado con gasolina es para aprovechar al recurso que se tiene de la industria azucarera y así poder reducir el costo del galón de gasolina.

El Biodiesel, como combustible alternativo, tiene muchos méritos. Es derivado de una fuente renovable y doméstica, por lo que alivia la dependencia de importaciones de petróleo. Es biodegradable y no tóxico (1). Comparado con el diesel de petróleo, el Biodiesel tiene un perfil de emisiones de combustión más favorable, tal como bajas emisiones de monóxido de carbono, partículas en suspensión e hidrocarburos sin quemar. El dióxido de carbono producido por la combustión del Biodiesel puede ser reciclado por el proceso de fotosíntesis, minimizando de ese modo el impacto de la combustión del Biodiesel en el efecto invernadero. (2, 3, 4, 22)

El Biodiesel tiene un punto de ignición relativamente alto ( $150^{\circ}$  C) lo que lo hace menos volátil y más seguro de transportar o manejar que el diesel de petróleo. (2) Posee propiedades lubricantes que reducen el desgaste de los motores y extienden la vida de los mismos. Además, no es necesaria modificación alguna en los motores existentes para su uso. En resumen, estas ventajas del Biodiesel lo convierten en una buena alternativa al combustible derivado del petróleo y han conducido a su uso en muchos países, especialmente en áreas ambientalmente delicadas.

Dentro del proceso de producción del Biodiesel de forma artesanal, se encuentran componentes como la cantidad de glicerina residual y total que no es posible separar por decantación, para ello es necesario hacer lavados con agua, lo cual provoca que se alcance la capacidad máxima de

miscibilidad con el Biodiesel, es por ello que se está proponiendo hacer tratamientos con materiales adsorbentes como zeolitas, talco, Magnesol® y bentonita, los cuales serán evaluados con el fin de encontrar la mejor opción tomando en cuenta su capacidad, el costo de cada uno de los adsorbentes en cuestión y la disponibilidad de cada uno de los materiales en el país.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1. Objetivo general:

Refinamiento del Biodiesel como parte del tratamiento final de ésteres de metilo (Biodiesel) mediante adsorbentes minerales para la eliminación de humedad y glicerina (total y libre).

### 5.2. Objetivos específicos:

- 5.2.1. Eliminar glicerina residual en Biodiesel por medio de lavados con agua, para que cumpla con la norma ASTM 6751 (especificaciones de Biodiesel).
- 5.2.2. Evaluar el efecto adsorbente para la eliminación del agua remanente después del lavado, utilizando minerales como zeolitas, talco y bentonitas.
- 5.2.3. Cuantificar el contenido de agua remanente en el Biodiesel por centrifugación; y el contenido de glicerina residual en Biodiesel por medio de una valoración por el método AOCS Ca 14-56.

## **6. HIPÓTESIS**

Es posible refinar el Biodiesel producido para que cumpla con las normas ASTM D 2709 y ASTM D 6584, mediante tratamiento con minerales adsorbentes sin necesidad de llevar a cabo lavados con agua.

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1. Universo de trabajo

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

### 7.2. Materiales

- 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

### 7.3. 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

## **7.4. Procedimiento**

### **7.4.1. Síntesis de Biodiesel**

#### **7.4.1.1. 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.

#### **7.4.1.2. 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.

#### **7.4.1.3. 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.

### **7.4.2. 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  $32^\circ\text{C}$ , en tubos graduados para centrifuga 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)

### **7.4.3. Determinación de glicerina total y libre en Biodiesel (Método AOCS<sup>9</sup> Ca 14-56)**

#### **7.4.3.1. Determinación de glicerina total**

La determinación de glicerina total se lleva a cabo por medio de un tratamiento con hidróxido de potasio (KOH)<sup>10</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 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)

#### **7.4.3.2. 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

---

<sup>9</sup> American Oil Chemist's Society

<sup>10</sup> Podría considerarse este proceso como una saponificación.

de hidróxido de potasio). La titulación se lleva a cabo con disolución estandarizada de tiosulfato de sodio. (15)

### 7.5. 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.

## 8. RESULTADOS

### 8.1. Resultados contenido de glicerina total

#### 8.1.1. BIODIESEL SIN TRATAR

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (mL) <sup>11</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	

#### 8.1.2. 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	

#### 8.1.3. 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	

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

### 8.1.4. 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	

### 8.1.5. 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	

### 8.1.6. 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	

## 8.2. Resultados contenido de glicerina libre

### 8.2.1. BIODIESEL SIN TRATAR

No.	IDENTIFICACIÓN	Cantidad de muestra (g)	Volumen de tiosulfato (mL) <sup>12</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	

### 8.2.2. 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	

### 8.2.3. 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	

<sup>12</sup> En la titulación de glicerina libre, utilizando el método oficial AOCS Ca 14-56.

### 8.2.4. 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	

### 8.2.5. 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	

### 8.2.6. 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	

## 8.3. Resultados contenido de humedad

### 8.3.1. 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	

**8.3.2. 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	

**8.3.3. 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	

**8.3.4. 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	

**8.3.5. 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	

**8.3.6. 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	

## 8.4. Resultados contenido de catalítico

### 8.4.1. BIODIESEL 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.	

### 8.4.2. 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.	

### 8.4.3. 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.	

### 8.4.4. 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 Catiónicas	25.5690	0	N.D.	N.D.
2	Zeolitas Catiónicas	25.3654	0	N.D.	
3	Zeolitas Catiónicas	25.2398	0	N.D.	
4	Zeolitas Catiónicas	25.0654	0	N.D.	

### 8.4.5. 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>13</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.	

### 8.4.6. 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.	

## 8.5. Resultados contenido de jabones

### 8.5.1. BODIESEL 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	

<sup>13</sup> N.D.= No detectado.

**8.5.2. 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	

**8.5.3. 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	

**8.5.4. 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.	

### 8.5.5. 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.	

### 8.5.6. 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.	

## 8.6. Porcentajes de remoción

### 8.6.1. 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
Bentonita	0.933	0.516	44.69453376	No cumple
Talco	0.933	0.538	42.33654877	No cumple
Zeolitas Aniónicas	0.933	0.401	57.02036442	No cumple
Zeolitas Catiónicas	0.933	0.221	76.31296892	Si cumple
Magnesol	0.933	0.423	54.66237942	No cumple

### 8.6.2. 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
Bentonita	0.858	0.229	73.31002331	No cumple
Talco	0.858	0.305	64.45221445	No cumple
Zeolitas Aniónicas	0.858	0.194	77.38927739	No cumple
Zeolitas Catiónicas	0.858	0.019	97.78554779	Si cumple
Magnesol	0.858	0.113	86.82983683	No cumple

### 8.6.3. 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

### 8.6.4. 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

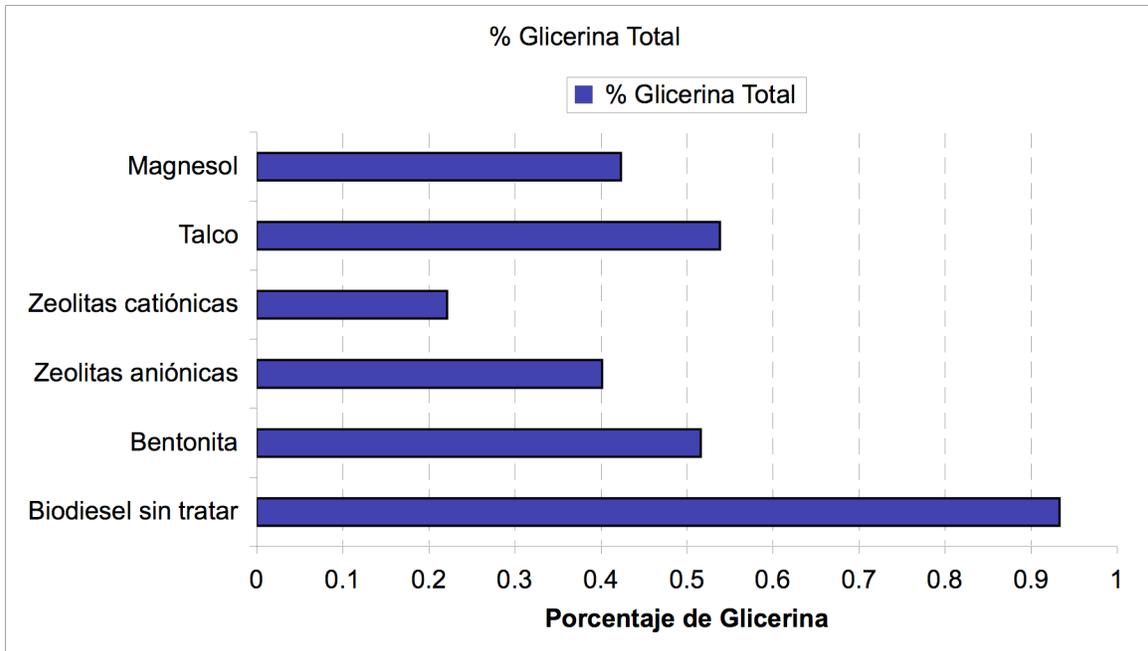


Figura 8.1: Gráfica que demuestra el contenido de glicerina total en el biodiesel después de haberlo tratado con los diferentes materiales adsorbentes. De referencia se utilizó el contenido de glicerina total en el biodiesel sin tratar.

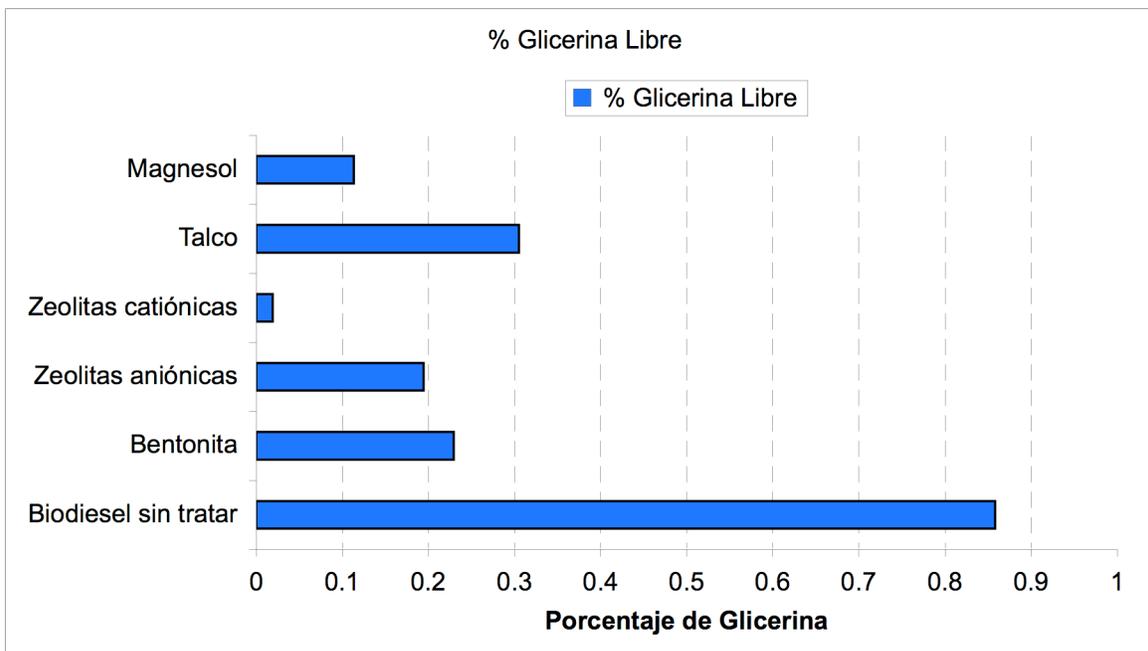


Figura 8.2: Gráfica que demuestra el contenido de glicerina libre en el biodiesel después de haberlo tratado con los diferentes materiales adsorbentes. De referencia se utilizó el contenido de glicerina libre en el biodiesel sin tratar.

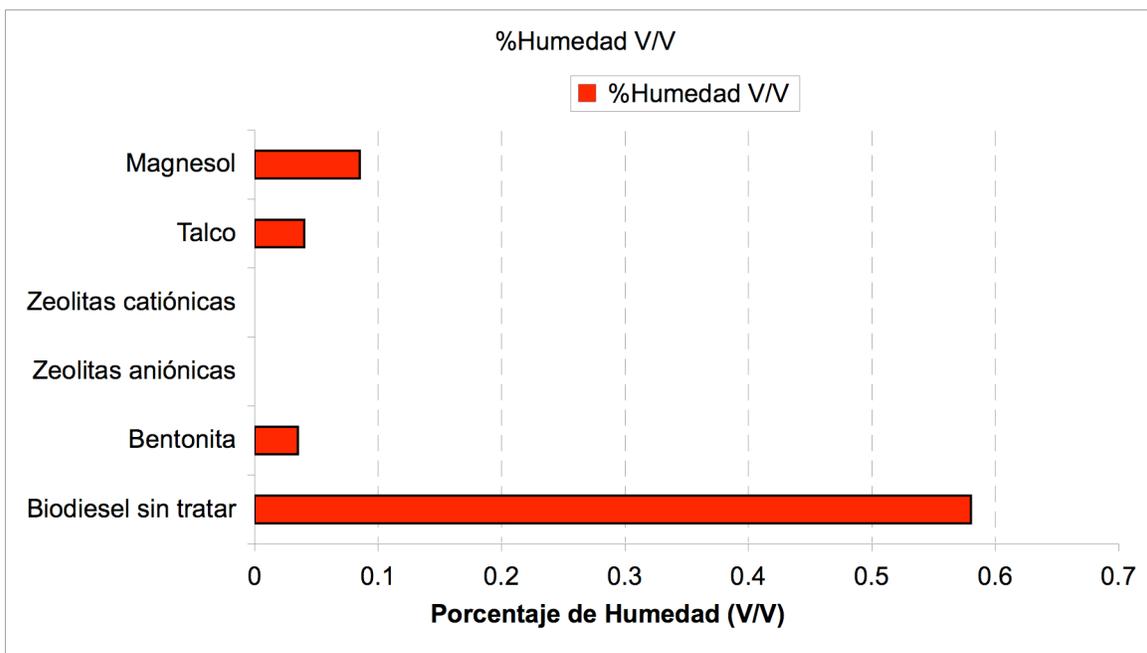


Figura 8.3: Gráfica que demuestra el contenido de humedad y sedimentos en el biodiesel después de haberlo tratado con los diferentes materiales adsorbentes. De referencia se utilizó el contenido de humedad y glicerina en el biodiesel sin tratar.

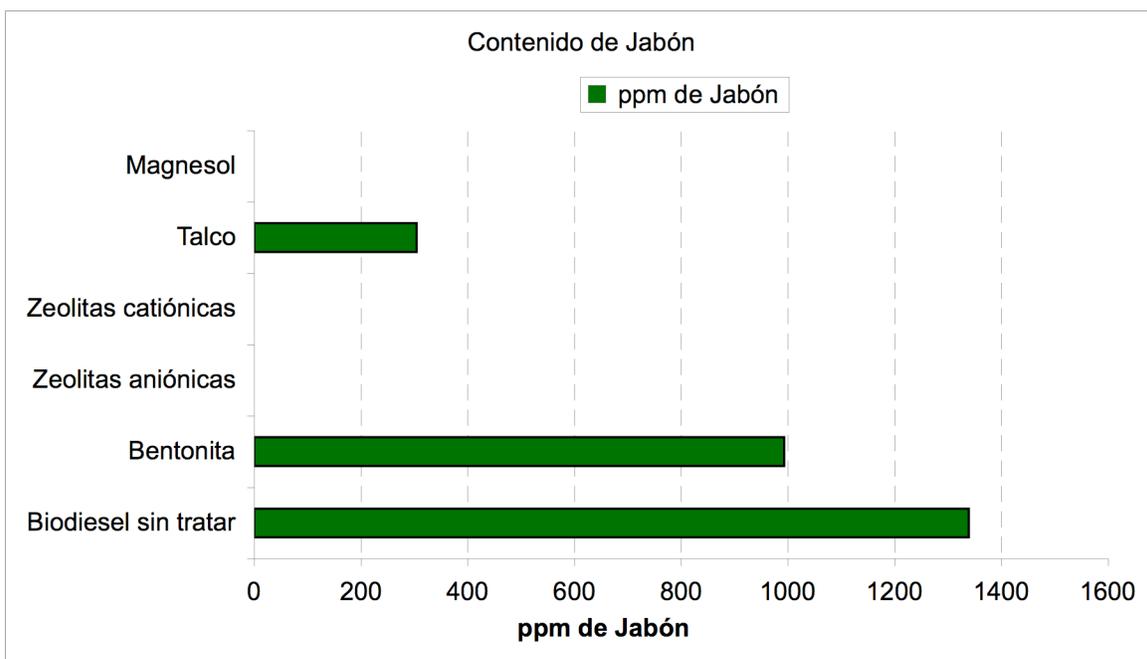


Figura 8.4: Gráfica que demuestra el contenido de jabones en el biodiesel después de haberlo tratado con los diferentes materiales adsorbentes. De referencia se utilizó el contenido de jabones en el biodiesel sin tratar.

## 8.7 Análisis estadístico

### 8.7.1 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

### 8.7.2. Análisis de varianza glicerina total

Fuente	SS	df	MS	F	Prob > F
Entre grupos	1.412 87019	5	0.282574038	834.29	0
Dentro de los grupos	0.008 1288	24	0.0003387		
Total	1.420 99899	29	0.048999965		

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

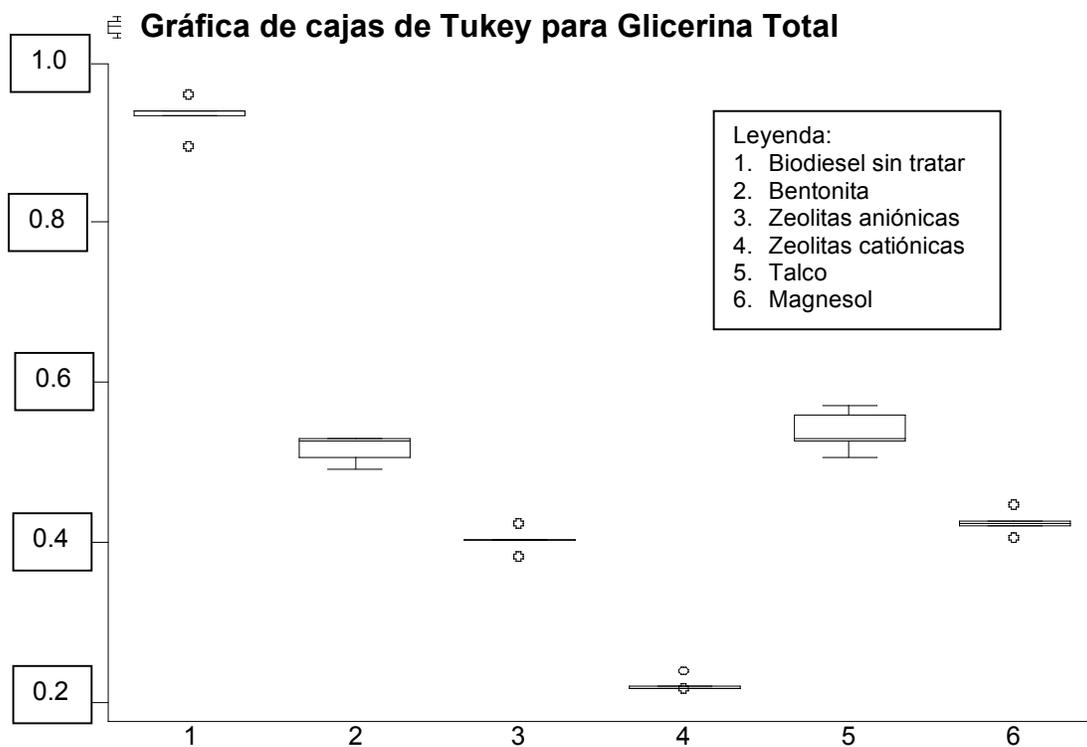


Figura 8.5: Gráfica de cajas de Tukey para contenido de glicerina total en biodiesel tratado.

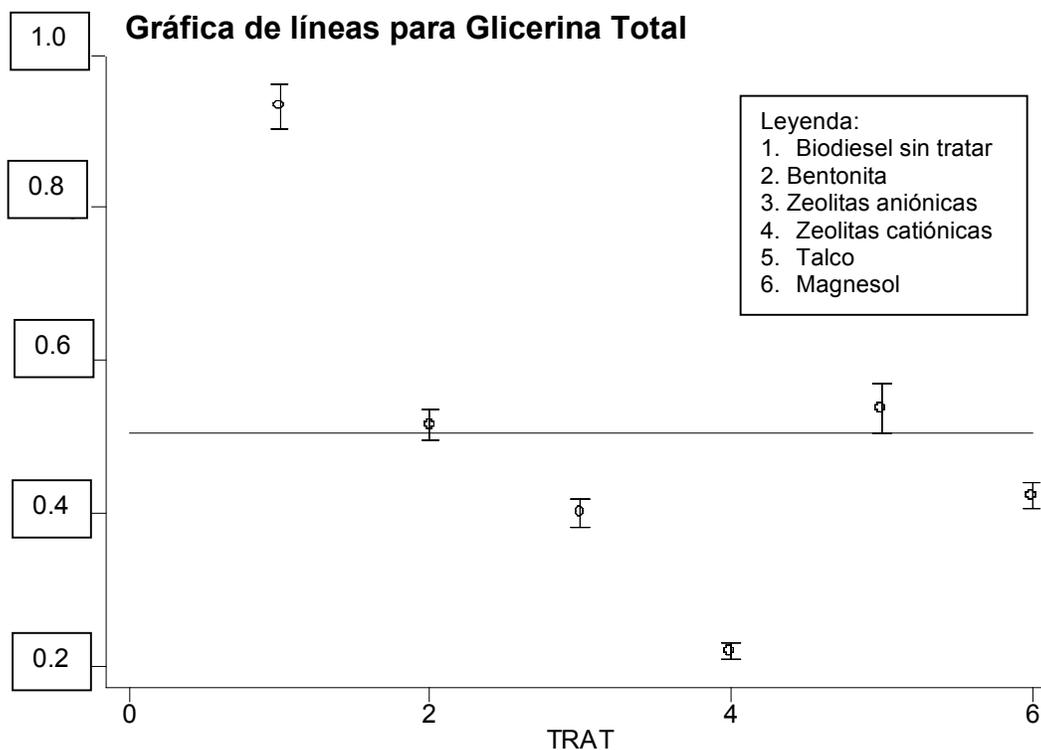


Figura 8.6: Gráfica de líneas para contenido de glicerina total en biodiesel tratado.

COMPARACIONES CONTRA EL CONTROL (Biodiesel sin tratar):

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

### 8.7.3. Glicerina Libre

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

### 8.7.4. 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 ( $p < 0.00001$ ).

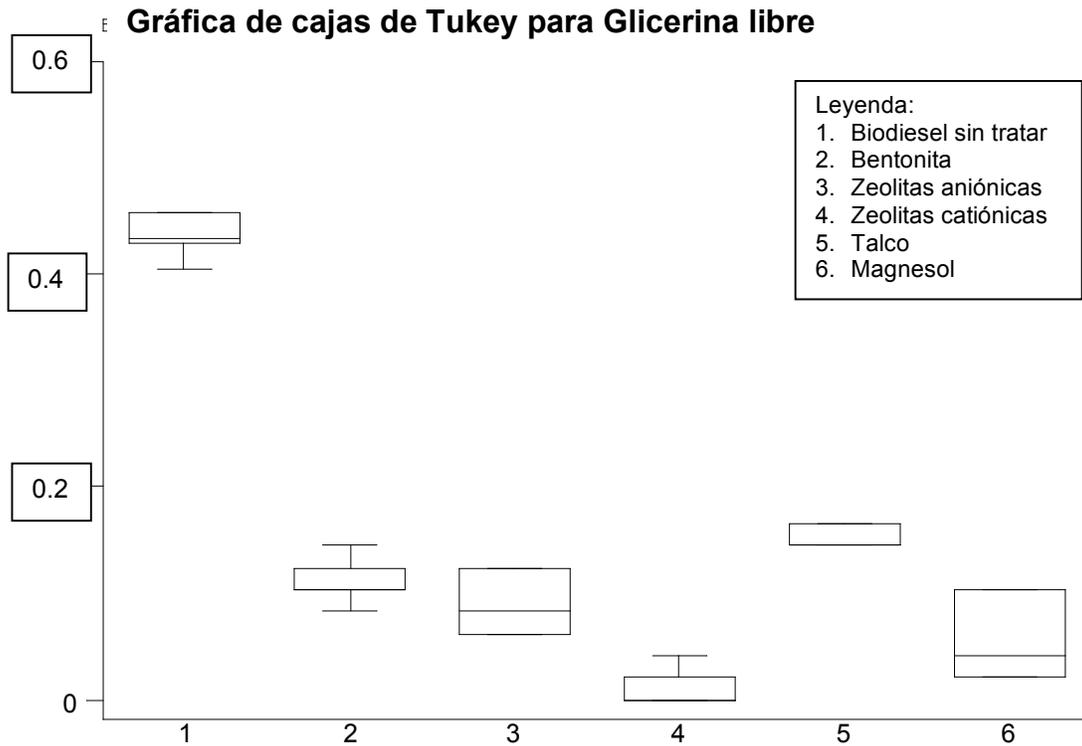


Figura 8.7: Gráfica de cajas de Tukey para contenido de glicerina libre en biodiesel tratado.

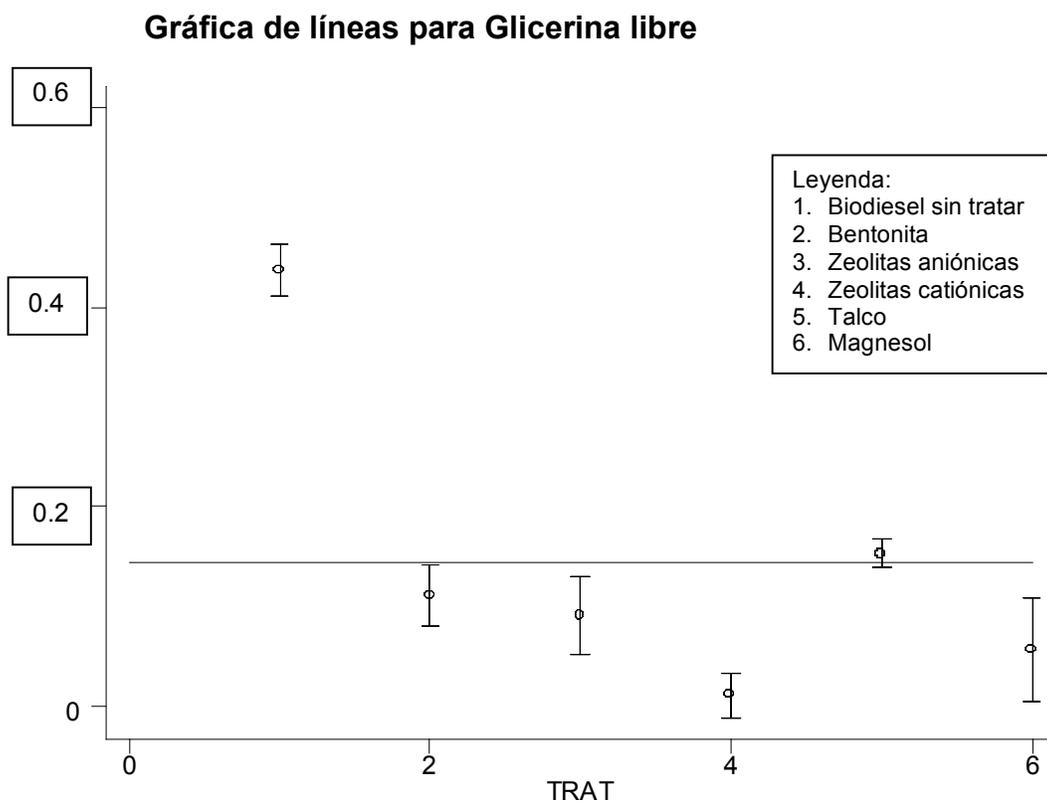


Figura 8.8: Gráfica de líneas para contenido de glicerina libre en biodiesel tratado.

COMPARACIONES CONTRA EL CONTROL (Biodiesel sin tratar):

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

### 8.7.5. Humedad

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

### 8.7.6. 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 ( $p < 0.00001$ ).

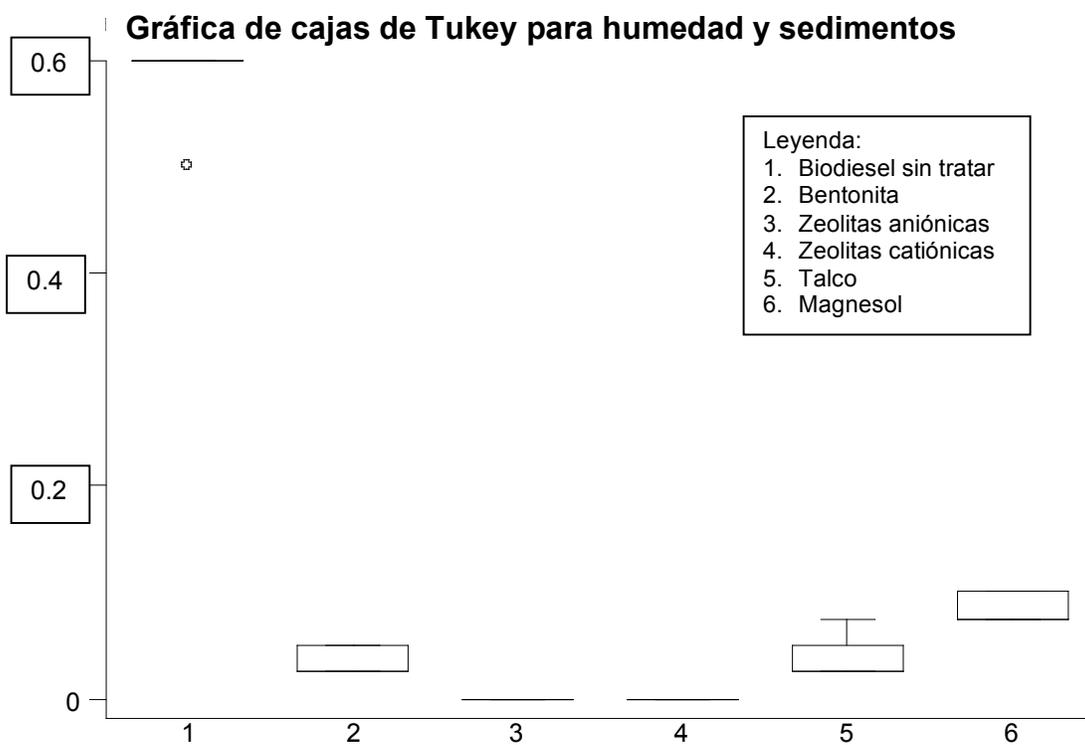


Figura 8.9: Gráfica de Cajas de Tukey para contenido de humedad y sedimentos en biodiesel tratado.

### Gráfica de líneas para humedad y sedimentos

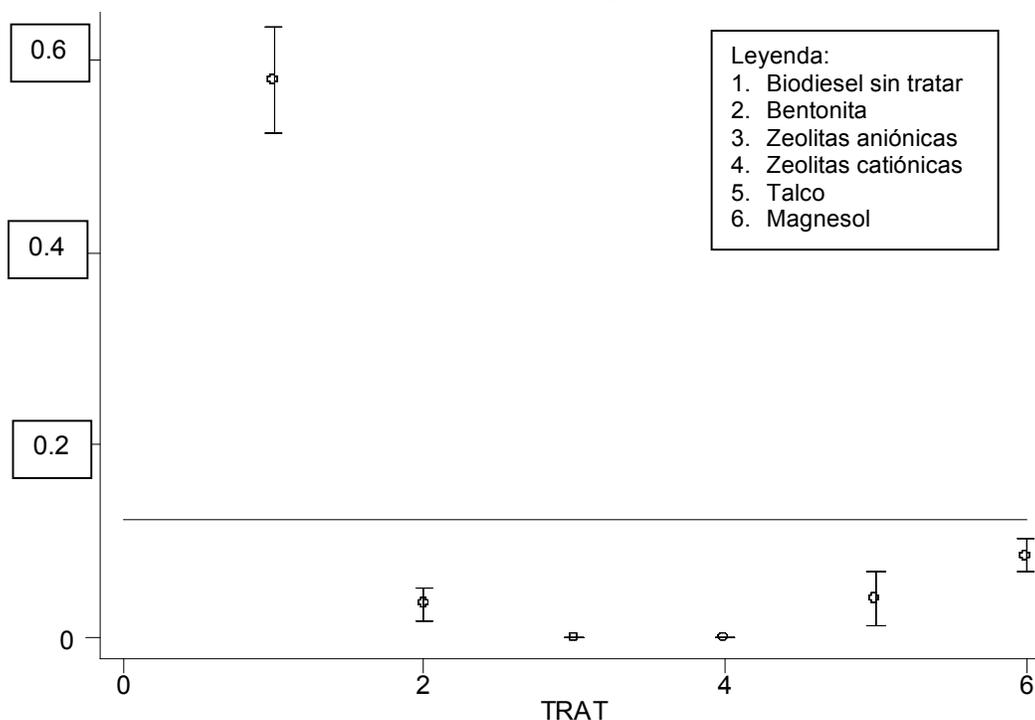


Figura 8.10: Gráfica de líneas para contenido de humedad y sedimentos en biodiesel tratado.

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

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

#### 8.7.7. 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
Magnesol	N.D.	N.D.	5

#### 8.7.8. 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 ( $p < 0.00001$ ).

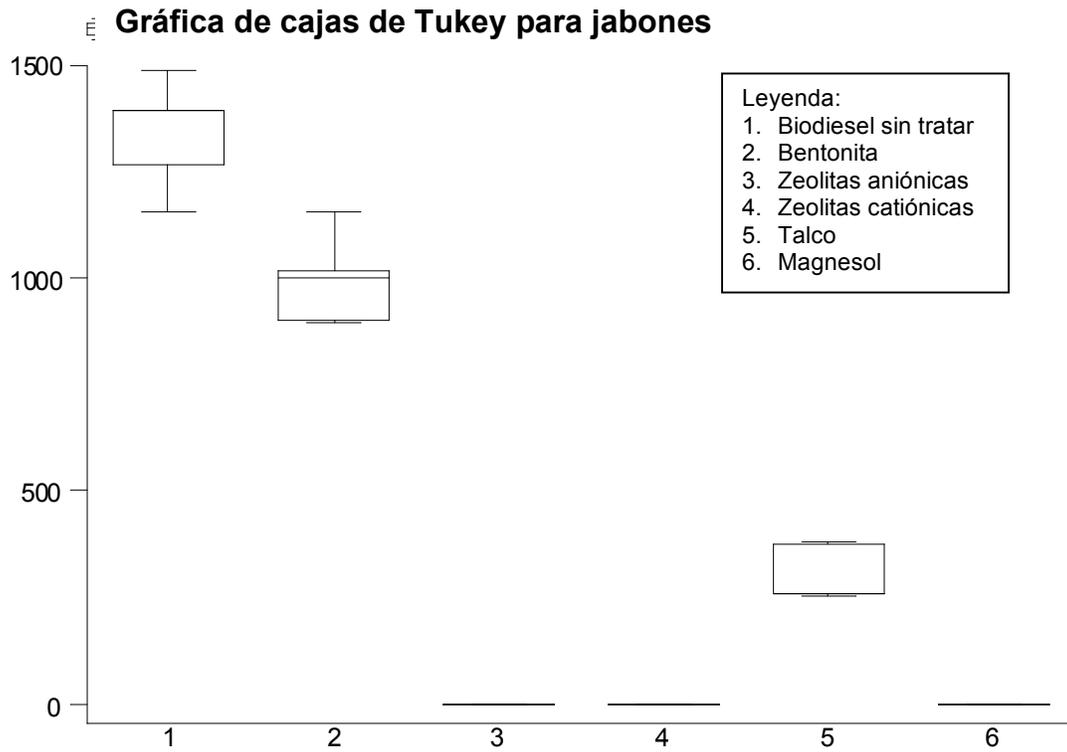


Figura 8.11: Gráfica de Cajas de Tukey para contenido de jabones en biodiésel tratado.

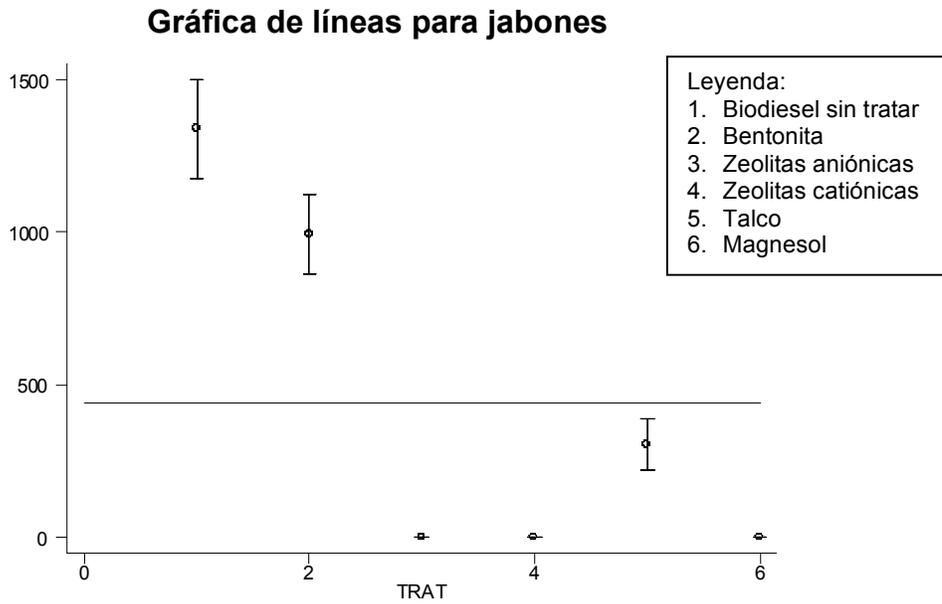


Figura 8.12: Gráfica de Cajas de Tukey para contenido de jabones en biodiesel tratado.

COMPARACIONES CONTRA EL CONTROL (Biodiesel sin tratar):

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

## 9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 9.1. 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.

## **9.2. 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.

Adicionalmente se hicieron 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 ( $p < 0.01$ )

## 10. CONCLUSIONES

- 10.1.** Se logró refinar el biodiesel sin tratar (sin lavar) por medio del uso de un adsorbente mineral.
- 10.2.** Se evaluó la capacidad adsorbente de los minerales utilizados, los resultados indican que las zeolitas catiónicas proporcionan un 76.86% de remoción de glicerina total.
- 10.3.** Fue posible disminuir los niveles de glicerina Total y Libre por medio del uso de zeolitas catiónicas, lo cual evita hacer lavados con agua al biodiesel sin tratar.
- 10.4.** El hecho de no utilizar agua en el proceso de refinación del biodiesel, es muy importante puesto que en el caso de evitar los lavados del mismo, se disminuye la posibilidad de generar un impacto negativo sobre el recurso hídrico.
- 10.5.** Todos los minerales evaluados presentan una diferencia estadísticamente significativa para el tratamiento de contenido de jabones, glicerina y humedad.

## **11. RECOMENDACIONES**

- 11.1.** Es importante dar a conocer esta técnica de refinación de biodiesel, ya que presenta la ventaja de no utilizar agua en el proceso, con lo que se contribuye a conservar el recurso hídrico.
- 11.2.** Es recomendable que la humedad y los sedimentos sean analizados por diferentes técnicas analíticas que permitan distinguir el contenido de humedad separado del contenido de sedimentos.
- 11.3.** Investigar si existen otros minerales Guatemala que se puedan proporcionar resultados similares a los obtenidos en el presente trabajo.

## 12. REFERENCIAS

- 12.1. Pahl, Greg. "Biodiesel, Growing a New Energy Economy" 1<sup>st</sup>. Edition. Chelsea Green Publishing Company. Canada 2005.
- 12.2. 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.
- 12.3. Körbitz, W., 1999. "Biodiesel production in Europe and North America, an encouraging prospect." *Renew. Energy* 16, pp. 1078 – 1083.
- 12.4. 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.
- 12.5. Pereira R., L., Wilhelm, H.M. 2005. "Current Status of Biodiesel Development in Brazil". Humana Press Inc. pp. 808 – 818.
- 12.6. Nelson, L.A., Foglia, T.A., Marmer, W.N., 1996. "Lipase-catalyzed production of Biodiesel." *J. Am. Oil Soc. Chem.* 73 (8), 1191– 1195.
- 12.7. 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.
- 12.8. Fangrui Ma, Milford A. Hanna, 1999 "Biodiesel production: a review" *Bioresource Technology* 70, 1 – 15.
- 12.9. Knothe G. Krahl, J. Van Gerpen, J. "The Biodiesel Handbook" AOCS Press.
- 12.10. García R., E., Suárez B., M. 2000. "Las arcillas: propiedades y usos". Universidad Complutense (Madrid), Universidad de Salamanca. España. pp. 1 – 19.
- 12.11. "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.
- 12.12. Pine, S., Hendrickson, J. Química Orgánica. 4ta. Edición. McGraw-Hill. España 1982. pp. 335 – 338.
- 12.13. Carlstein, R. El Biodiesel como disolución bioenergética. ZOE Tecno-Campo ([www.zoetecnocampo.com](http://www.zoetecnocampo.com)). Argentina 2004. pp. 1 – 3.
- 12.14. Standard Test Method for Water and Sediment in Middle Distillate Fuels by Centrifuge. ASTM D 2709 – 96 (Reapproved 2001).
- 12.15. Total, Free and Combined Glycerol Iodometric-Periodic Acid Method. AOCS Official Method Ca 14-56. USA 1997. pp. 1 – 3.
- 12.16. “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.
- 12.17. Pla, J. M. “Inyección Diesel para camiones y automóviles”. 1989. Ediciones CEAC, S.A. Barcelona, España. pp. 5 – 8.
- 12.18. Material Safety Data Sheet. Magnesium Silicate MSDS. ScienceLab.com Chemical & Laboratory Equipment. Septiembre 2005.
- 12.19. Pearl, R. M. “Geología”. 3era edición. Compañía editorial Continental, S.A. España 1971. p.p. 19.
- 12.20. Earth Trends Country Profiles. “Energy and Resources – Guatemala”. USA 2003.
- 12.21. Merck Index, 13a. Edition.
- 12.22. Agudelo, J. “Biodiesel. Una revisión del desempeño mecánico y ambiental”. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia 2004. pp. 1 – 4.

### 13. ANEXOS

#### 13.1. 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

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

$$(47.15 - 46.10) \times 0.1 \times 2.302$$

$$\% \text{ Glicerina total} = \frac{\quad}{1.11591} = \underline{\underline{0.217 \%}}$$

### 13.2. 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:

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

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

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

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

### 13.3 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.

### 13.4 Cálculos para determinar contenido de jabones.

[“B” mL de HCl 0.1N] x [1 litro / 1000mL] x [0.1 moles de HCl / litro] x [1mol jabón / 1mol HCl] x [320.56g/mol jabón] / [gramos de muestra] = gramos de KOH/muestra

$\frac{B \times 0.1 \times 320.56}{1000 \times W}$  = 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

$\frac{0.8 \times 0.1 \times 320.56}{1000 \times 25.2250} = \underline{\underline{0.00102 \text{ g de jabón (oleato de potasio) / g de muestra}}}$

### 13.5 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

$$\frac{0 \times 0.1 \times 56.1}{1000 \times 25.3423} = \underline{\underline{0 \text{ g de catalítico (KOH) / g de muestra}}}$$

### 13.6 Fotografías



**Fotografía No.1:** Vista del equipo utilizado para el reflujo que requiere el método oficial AOCS Ca 14-56, para la determinación del contenido de glicerina total.



**Fotografía No. 2:** Luego del reflujó 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.



**Fotografía No.3:** Vista de la centrífuga utilizada para la determinación de contenido de humedad y sedimentos en las muestras de biodiesel tratadas y sin tratar.



**Fotografía No. 4:** Vista del interior de la centrifuga 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.



**Fotografía No. 5:** 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.

## 13.7 Propiedades y datos de seguridad de reactivos

## PROPIEDADES Y DATOS DE SEGURIDAD DE REACTIVOS

REACTIVO	GRADO	Estado físico	Color/Olor	Punto de Fusión/ Ebullición	FÓRMULA QUÍMICA	IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS	MANIPULACIÓN	PRIMEROS AUXILIOS	USOS DE LA SUSTANCIA
ACIDO ACETICO GLACIAL	ACS	Líquido	Incoloro/ Peneante	17°C / 118/118°C	CH <sub>3</sub> COOH	Inflamable/ Piroclava Quemaduras graves	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho de 0,7mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de látex natural	Tiss Inhalación: aire fresco. Avisar al Médico. Tiss Ingestión: beber abundante agua. Tiss contacto con los ojos: aclarar con abundante agua, manteniendo los párpados abiertos (al menos durante 10 minutos). Tiss ingestión: beber abundante agua, evitar vómitos.	Análisis químico, análisis farmacológico.
ACIDO CLORHIDRICO	ACS	Líquido	Incoloro/ Peneante		HCl	Provoca corrosión, irrita la piel y las mucosas	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,1mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo 0,1mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco. Avisar al Médico. Tiss contacto con la piel: Aclarar con abundante agua. Tiss contacto con los ojos: Aclarar con abundante agua, manteniendo los párpados abiertos (al menos durante 10 minutos). Tiss ingestión: beber abundante agua, evitar vómitos.	Análisis químico, análisis farmacológico.
ACIDO PERYDICO	Para análisis	Sólido	Incoloro/ casi inodoro	122°C / no disponible	H <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Peligro de fuego en contacto con materiales combustibles. Piroclava quemaduras	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,1mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo 0,1mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco. Tiss contacto con la piel: Aclarar con abundante agua. Tiss contacto con los ojos: Aclarar con abundante agua, manteniendo los párpados abiertos. Tiss ingestión: beber abundante agua, evitar vómitos.	Análisis químico, producción químico
ALMIDON SOLUBLE	Para análisis	Sólido	Blanco/ inodoro	no disponible / no disponible	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> n	Producto no peligroso según la Directiva 675-48/CEE	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,1mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo 0,1mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco. Tiss contacto con la piel: lavar con agua. Tiss contacto con los ojos: aclarar con agua. Tiss ingestión (grandes cantidades) consultar al médico si subsiste el malestar.	Análisis químico
TRICLORO METANO O CLOROFORMO	ACS	Líquido	Incoloro/ dulzón	63°C/61°C	CHCl <sub>3</sub>	Noxico por ingestión. Irrita la piel. Posibles efectos cancerígenos.	Protección de manos contacto pleno: guantes de látex de 0,7mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo de 0,1mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco, suministrar oxígeno en caso necesario (en caso de parada respiratoria). Tiss contacto con la piel: Aclarar con abundante agua. Tiss contacto con los ojos: Aclarar con abundante agua, manteniendo los párpados abiertos. Tiss ingestión: beber abundante agua, evitar vómitos. Mantener libres las vías respiratorias.	Análisis químico, Disolvente, producción y análisis farmacológicos
ALCOHOL ETILICO O ETANOL (ABSOLUTO)	ACS	Líquido	Incoloro/ alcohólico	-114°C / 78,3°C	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Fácilmente inflamable	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,7mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo de 0,4mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco. Tiss contacto con la piel: aclarar con abundante agua, eliminar la ropa contaminada. Tiss contacto con los ojos: aclarar con abundante agua, mantener los párpados abiertos. Tiss ingestión: hacer beber inmediatamente agua abundante.	Disolvente, producción y análisis farmacológicos, producción química.
ISOOCTANO	ACS	Líquido	Incoloro /a gasolina	-107°C/68°C	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Fácilmente inflamable, irrita la piel. Muy tóxico para los organismos acuáticos; puede provocar a largo plazo efectos nocivos para el ambiente acuático. Por inhalación puede causar daño pulmonar. Por inhalación puede provocar somnolencia y vértigo.	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,4mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo de 0,4mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco, suministrar oxígeno en caso necesario (en caso de parada respiratoria). Tiss contacto con la piel: Aclarar con abundante agua, eliminar la ropa contaminada. Tiss contacto con los ojos: Aclarar con abundante agua, manteniendo los párpados abiertos. Tiss ingestión: beber abundante agua.	Análisis químico
DICROMATO DE POTASIO	ACS	Sólido	Naranja/ inodoro	360°C / 500°C	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Puede causar cáncer, alteraciones genéticas, heparíticas. Puede perjudicar la fertilidad. Posibilidad de sensibilización por inhalación y en contacto con la piel. Muy tóxico para organismos acuáticos.	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,1mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo 0,1mm de espesor.	EL SOCORRISTA DEBE AUTOPROTEGERSE. Tiss Inhalación: aire fresco, suministrar oxígeno en caso necesario (en caso de parada respiratoria). Tiss contacto con la piel: Aclarar con abundante agua, eliminar la ropa contaminada. Tiss contacto con los ojos: Aclarar con abundante agua, eliminar la ropa contaminada. Tiss ingestión: beber abundante agua, evitar vómitos, no efectuar medidas de neutralización.	Producción química
HIDROXIDO DE POTASIO	ACS	Sólido	Incoloro/ inodoro	360°C / 1320°C	KOH	Noxico por ingestión. Provoca quemaduras graves.	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,1mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo 0,1mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco. Tiss contacto con la piel: aclarar con abundante agua, lavar con agua jabonosa. Tiss ingestión: beber abundante agua, evitar vómitos, no efectuar medidas de neutralización.	Análisis químico, producción química.
YODURO DE POTASIO	ACS	Sólido	Incoloro a blanco/ inodoro	680°C / 1330°C	KI	Producto no peligroso según la Directiva 675-48/CEE	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,1mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo 0,1mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco. Tiss contacto con la piel: lavar con agua, eliminar la ropa contaminada. Tiss contacto con los ojos: aclarar con agua. Tiss ingestión (grandes cantidades) consultar al médico si subsiste el malestar.	Análisis químico
TOSULFATO DE SODIO	ACS	Líquido	Incoloro/ inodoro	no disponible / no disponible	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Producto no peligroso según la Directiva 675-48/CEE	Protección de manos contacto pleno: guantes de caucho nitrilo de 0,1mm de espesor. Protección por salpicaduras: guantes de caucho nitrilo 0,1mm de espesor.	Tiss Inhalación: aire fresco. Tiss contacto con la piel: lavar con agua, eliminar la ropa contaminada. Tiss ingestión (grandes cantidades) consultar al médico si subsiste el malestar.	Análisis químico, producción química

---

**Carlos Alberto Tobar Moraga**

---

**Lic. Pedro Alejandro Ordóñez Cruz**  
**Asesor**

---

**Lic. Jhoni Frank Alvarez Castañeda**  
**Director**  
**Escuela de Química**

---

**Dr. Oscar Manuel Cobar Pinto**  
**Decano**  
**Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia**