

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

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE  
ACEITE VEGETAL PARA PRODUCIR BIODIESEL CON ETANOL**



**INFORME DE TESIS  
PRESENTADO POR  
ANA CATALINA PALACIOS OSORIO  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
QUÍMICA**

**GUATEMALA, ENERO DE 2008**

## JUNTA DIRECTIVA

Óscar Cóbar Pinto, Ph. D.	Decano
Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto	Secretario
Licda. Lillian Raquel Irving Antillòn, M.A.	Vocal I
Licda. Lilliana Vides de Urízar	Vocal II
Licda. Beatriz Eugenida Batres de Jiménez	Vocal III
Br. Mariesmeralda Arriaga Monterroso	Vocal IV
Br. José Juan Veja Pérez	Vocal V

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A Dios**

Por llenarme de bendiciones durante toda mi vida

### **A mis padres**

Otto Israel Palacios Caniz y Floridalma Osorio Contreras,  
por darme amor, seguridad y apoyo, no sólo a lo largo de mi carrera universitaria, sino  
en la vida

### **A mis hermanas**

Claudia Lorena, por ser mi confidente y mi amiga  
Gabriela María, por ayudarme cuando necesito

### **A mi tía**

Gloria Argentina Osorio Contreras, por darme siempre una llamada de atención cuando  
lo he necesitado

### **A mis amigas**

Vivian Torres , Patricia Navas, por su gran amistad y apoyo

### **A mis compañeros**

Claudia A., Carmen, Claudia de L., German, Jorge T. Willy, por acompañarme durante  
mi carrera universitaria

### **A mis profesores**

M.A. Idolly Carranza, Lic. Eduardo Robles,  
por sus enseñanzas

## ÍNDICE

I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	3
III. ANTECEDENTES	
A. Biodiesel	5
1. Generalidades	
2. Ventajas y desventajas del uso de biodiesel	5
3. Producción de biodiesel	7
B. Transesterificación	9
C. Aceites vegetales	11
1. Composición	11
2. Procesos de oxidación	13
IV. JUSTIFICACIÓN	15
V. OBJETIVOS	17
VI. HIPÓTESIS	18
VII. MATERIALES Y MÉTODO	19
A. Universo	19
B. Materiales	19
C. Método	
1. Diseño de investigación	20
2. Procedimiento	21
3. Análisis de resultados	22
VIII. RESULTADOS	24
IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
X. CONCLUSIONES	38
XI. RECOMENDACIONES	39
XII. REFERENCIAS	40
XIII. ANEXOS	42

## I. RESUMEN

En este trabajo se realizó una investigación experimental que tuvo como objetivo principal optimizar la reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol con etanol, que produce biodiesel y glicerina. Para esta investigación se tomó como universo aceite nuevo de girasol y como muestra 5 litros de este aceite, obtenido en comercios locales. Para optimizar la reacción de transesterificación, y por lo tanto, mejorar el rendimiento de la reacción, se optimizaron las variables que intervenían en ésta, que son: tiempo de reacción, proporción de etanol, temperatura de reacción y concentración de catalítico (KOH).

La optimización de estas variables se evaluó determinando el porcentaje de rendimiento de la reacción de transesterificación, el cual se logró detectar mediante la cuantificación de glicerina, un subproducto de la reacción, aplicando el método 14-56 de la AOCS (The American Oil Chemist's Society) de donde se realizaron dos análisis por muestra y se determinó el porcentaje de rendimiento utilizando el promedio de éstas.

Para optimizar cada una de las variables de la transesterificación de aceite vegetal con etanol, este trabajo se desarrolló en tres etapas. En la primera se realizaron reacciones de transesterificación a distintas condiciones utilizando únicamente etanol como fuente de alcohol (etanol al 95% y etanol absoluto), de donde se encontró que además de la reacción de transesterificación, ocurría una de saponificación que generó competencia con la primera, lo cual provocó falta de separación de los productos de reacción, biodiesel y glicerina. Por ello se siguió con la segunda fase de este trabajo en donde se optimizaron las variables mencionadas en el primer párrafo, dejando constantes tres de las cuatro variables modificando los valores de la cuarta hasta optimizarla (en función del porcentaje de rendimiento de la reacción y evaluando la segunda derivada), realizando como mínimo 5 experimentos por cada conjunto de condiciones. Para las variables se obtuvieron los siguientes valores optimizados: tiempo de reacción 25 minutos, proporción de etanol absoluto/ metanol 62.14:37.86, temperatura de reacción: 56 ° C y concentración de catalítico 1.0% KOH (g KOH/ 100 ml aceite). A partir de los resultados

anteriores se evaluaron en una tercera fase, reacciones de transesterificación sustituyendo etanol al 95% por etanol absoluto en la proporción etanol/ metanol y el resto de las variables optimizadas, encontrándose que no existe separación de los productos de reacción.

Además, es importante mencionar que a partir de las condiciones para la reacción de transesterificación optimizadas en este trabajo se generó una propuesta menos dañina hacia el medio ambiente para la producción de biodiesel, al utilizar una materia prima menos contaminante, a diferencia de la ruta tradicional que utiliza exclusivamente metanol.

## II. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los combustibles fósiles, así como su alto costo y los efectos en la contaminación que provoca su uso, han causado la búsqueda de combustibles alternativos para suplir las necesidades energéticas actuales. Uno de estos combustibles alternativos es el biodiesel, el cual está siendo fabricado alrededor del mundo como un combustible alternativo al diesel proveniente del petróleo, manteniendo similares características en su desempeño, sin necesidad de realizar adaptaciones extras a los motores diesel, además de mejorar características como lubricidad y efecto torque respecto al diesel y disminuir las emisiones de gases, como óxidos de azufre y de carbono, al ambiente (1).

El biodiesel es producido a partir de aceites vegetales, nuevos o usados y un alcohol, siendo el más utilizado actualmente el metanol, mediante una reacción de transesterificación, que puede ser catalizada en medio ácido o básico, siendo la última la más utilizada (2).

En este trabajo se plantea el uso de etanol como alcohol para la transesterificación, ya que es más barato, menos tóxico que el metanol y proviene de fuentes renovables. Sin embargo, en el proceso de transesterificación de un aceite vegetal con etanol, los productos de la reacción, biodiesel y glicerina, no siempre se separan, por lo que es necesario optimizar las condiciones de reacción para lograr un alto porcentaje de rendimiento y una buena separación de productos. Para la fabricación de biodiesel mediante la reacción de transesterificación, se plantea el uso de aceite de girasol, por la alta disponibilidad de éste en el mercado y su bajo costo.

Por lo anterior, en el presente trabajo se llevó a cabo la optimización de las condiciones de reacción de transesterificación de aceite de girasol, tomando en cuenta las siguientes variables independientes: temperatura de reacción, proporción de etanol/metanol, tiempo de reacción y concentración de catalítico (KOH), evaluando el porcentaje de rendimiento de la reacción (variable dependiente) en función de la glicerina producida

como subproducto de reacción. Cada una de las variables independientes fue optimizada mientras se dejaron constantes las otras tres en una serie de experimentos realizando como mínimo 5 puntos para cada una. Asimismo, se evaluó la reacción de transesterificación al utilizar como fuente de alcohol etanol absoluto y etanol al 95%.

### III. ANTECEDENTES

#### A. BIODIESEL

##### 1. GENERALIDADES

El biodiesel es un combustible elaborado a partir de aceites vegetales (de soja, de algodón, de girasol, de maíz) o grasas animales (sebo, tocino), apto para su empleo como sustituyente parcial o total del diesel en motores diesel, sin que resulten necesarias conversiones, ajustes o regulaciones especiales del motor. Consiste en ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos naturales. (3)

Actualmente es producido y utilizado en toda Europa y ha ido ganando popularidad mundial como energía alternativa. El biodiesel a partir de aceite de canola se denomina comercialmente como RME (Rapeseed Methyl Ester), el cual es utilizado en las máquinas diesel puro o mezclado con aceite diesel, en proporciones que van desde un 5% hasta un 20%, generalmente. Estas proporciones de la mezcla biodiesel -diesel, se denominan así: Bxx, siendo xx la cantidad de Biodiesel puro en la mezcla. Así, el B20, está compuesto por 20% Biodiesel puro y 80% diesel de petróleo, y el B100 es el biodiesel puro. En Alemania y Australia se usa puro para máximo beneficio ambiental. (1,4)

##### 2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE BIODIESEL

Las ventajas que presenta el biodiesel son:

###### a) Funcionamiento

- i. Puede utilizarse directamente sobre motores diesel sin mayores modificaciones
- ii. Posee un índice de cetano<sup>1</sup> mayor que el diesel convencional, y similares niveles de consumo, caballos de fuerza y torque que el combustible diesel (1).
- iii. Aumento en la lubricidad sobre el diesel de petróleo, inclusive en mezclas de hasta 1% de biodiesel en diesel convencional (5)
- iv. Puede utilizarse puro o en mezclas de cualquier proporción con el diesel de petróleo, siendo la más común la B20. (2)

<sup>1</sup> Número que indica la aptitud de un carburante para motor diesel, de inflamarse en condiciones normalizadas. El índice de cetano es tanto más elevado cuanto más corto sea el índice de inflamación

## b) Aspectos ambientales:

Es el único combustible alternativo en cumplir con los requisitos de la EPA (Environmental Protection Agency), bajo la sección 211(b) del Clean Air Act. ( 2 ), lo cual puede verse en la Tabla 1, presentada a continuación, cuyos datos están tomados en comparación con los resultados para el diesel proveniente del petróleo:

Tabla 1: Emisiones de biodiesel respecto al diesel convencional

Tipo de Emisión	B100 (%)	B20 (%)
<b>Reguladas</b>		
Hidrocarburos totales sin quemar	-93	-30
Monóxido de carbono	-50	-13
Partículas en suspensión	-30	-22
Óxidos de Nitrógeno	+13	+2
<b>No Reguladas</b>		
Sulfatos	-100	-20
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH)	-80	-13
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos nitrogenados. (nPAH)	-90	-50
Potencial de destrucción de la capa de Ozono	-50	-10

Fuente: EL BIODIESEL [en línea].

<http://www.panoramaenergetico.com/archivo%20de%20combustibles%20ecologicos/nota%20principal%20biodiesel%20es%20panol.htm> [consulta:25 agosto 2005]

## c) Seguridad de manejo:

- i. El Biodiesel es biodegradable y desaparece en 28 días
- ii. Tiene un flash-point de aproximadamente 150° C comparado al diesel de petróleo cuyo flash-point es de 50° C, por lo que proporciona menor riesgo de incendio. (5)

Las desventajas que el uso del biodiesel puede producir son:

## a) Funcionamiento

El clima frío causa turbidez y gelatinización en el biodiesel, inclusive en mezclas B20.

(4)

b) Compatibilidad con componentes del motor

Degradación de ciertos tipos de elastómeros y caucho natural, ya que altas concentraciones de biodiesel alteran los inyectores de combustible

c) Aspectos ambientales

Proporciona un leve incremento en óxidos de nitrógeno dependiendo del tipo de motor.

d) Costos

La cadena de producción del biodiesel es tan larga que el precio final se incrementa mucho, respecto al diesel convencional. (2)

Para más comparaciones respecto a ventajas y desventajas del biodiesel y otros combustibles alternativos, ver en el Anexo 1.

### 3. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Los aceites vegetales utilizados en la producción de biodiesel se obtienen por procedimientos convencionales a partir de plantas oleaginosas que precisan una preparación consistente en un desengomado y filtración previos. Las semillas son prensadas mecánicamente separándose el aceite y la torta. Normalmente se somete a las semillas a un calentamiento previo y a la acción de un solvente, con lo que se logran rendimientos de extracción de aceite cercanos al 100%. La torta, que se obtiene como residuo del prensado, tiene un alto contenido en proteína y se comercializa para alimentación animal, ayudando a disminuir los costes que el proceso de extracción tiene sobre el precio final del aceite.

La utilización de combustibles vegetales, en motores Diesel, es casi tan antigua como el mismo motor. Su inventor, Rudolf Diesel, utilizó en el año 1900 aceite de maní como combustible, para la demostración de la adaptabilidad del motor. No obstante la industria automovilística ha ido desarrollando los nuevos motores para utilizar diesel por lo que, en los motores actuales, los aceites vegetales sin modificar causan diversos problemas que obligan a la modificación de estos. Para evitar estos problemas, se recurre a transformar los aceites químicamente mediante un proceso de transesterificación capaz de mejorar substancialmente las características como carburante de los aceites vegetales. (6)

El biodiesel se elabora en 25 países, a partir de aceites vegetales obtenidos de semillas, plantas, o algas oleaginosas (7). La siguiente tabla muestra los principales países de Europa productores de Biodiesel:

Tabla 2: Principales Productores De Biodiesel en el año 2000

País	Capacidad (tonelada/año)	Producción (tonelada/año)
Alemania	550.000	415.000
Francia	290.000	286.000
Italia	240.000	160.000
Bélgica	110.000	86.000
Inglaterra	2.000	2.000
Austria	20.000	20.000
Suecia	11.000	6.000
Checoslovaquia	47.000	32.000
<b>Total</b>	<b>1.270.000</b>	<b>1.005.000</b>

Fuente: SAGPyA, en base a "Biodiesel: El pasado del futuro" por Eugenio F. Corradini. Eco2site. Biodiesel en el Mundo. [en línea] <http://www.eco2site.com/informes/biodiesel-m.asp> [Consulta: 25 agosto 2005]

El rendimiento de biodiesel en litros que se obtienen por hectárea, dependerán del cultivo que da origen al aceite vegetal, siendo los cultivos mayormente utilizados como materia prima los mostrados en la tabla 3:

Tabla 3: Cantidad De Biodiesel Producida Por Hectárea

Cultivo	Nombre científico	Litro /hectárea
Soja	<i>Glicine max</i>	420
Arroz	<i>Oriza sativa</i>	770
Tung	<i>Aleurites fordij</i>	880
Girasol	<i>Helianthus agnus</i>	890
Maní	<i>Arachis hipogaea</i>	990
Colza	<i>Brassica napus</i>	1100
Ricino	<i>Ricinus communis</i>	1320

Continúa...

Continuación Tabla 3

Jatropha	<i>Jatropha curcas</i>	1590
Aguacate	<i>Persea americana</i>	2460
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	2510
Cocotero	<i>Acrocomia aculeata</i>	4200
Palma	<i>Elaeis guineensis</i>	5550

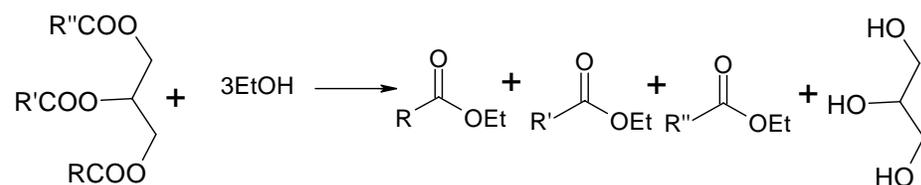
Fuente: Carlstein, R.G. El Biodiesel como solución energética [en línea]  
<http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodisel.htm> [consulta: 03/06/2005]

La producción de biodiesel a mediana o gran escala se puede dar por el esquema en el Anexo 2 (8), el cual muestra que en la cadena de biodiesel pueden intervenir diversas materias primas y puede reutilizarse y recuperarse reactivos como metanol, o procesar el aceite vegetal según su procedencia.

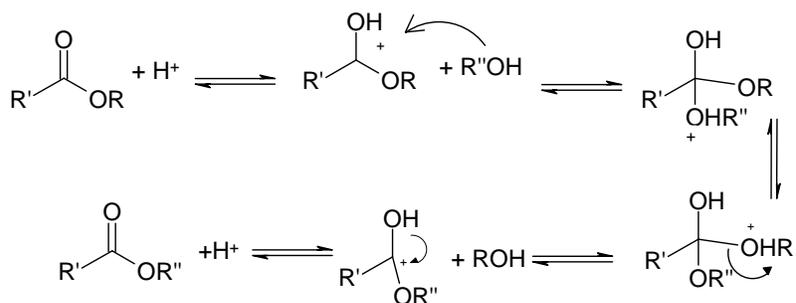
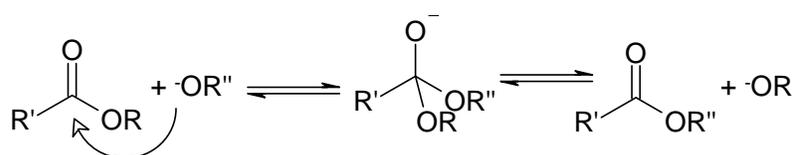
A pesar de el crecimiento del uso de biodiesel como combustible alternativo en el mundo, en Guatemala, no está siendo utilizado como fuente de energía alternativa, según el Anexo 3 (9).

## B. TRANSESTERIFICACIÓN

La reacción de transesterificación, es la conversión de un éster de un ácido orgánico a otro éster de ese mismo ácido, la cual puede ser catalizada en medio ácido, ya sea con ácido sulfúrico o clorhídrico, o por catálisis básica, formando el alcóxido del alcohol con una base fuerte como NaOH o KOH. La reacción global de la transesterificación de una grasa o aceite vegetal es la siguiente:



La cual puede realizarse mediante los siguientes mecanismos:

*Catálisis ácida:**Catálisis básica*

En donde el alcóxido se obtiene aplicando una base fuerte a un alcohol, por ejemplo:



Existen investigaciones que han identificado las variables más importantes que influyen la reacción de transesterificación para fabricar biodiesel, utilizando catálisis básica son: temperatura, tipo y concentración de catalítico, relación alcohol/aceite y agitación, las cuales afectan el proceso en términos de conversión de la sección del éster y tiempo de reacción.(8)

La estequiometría de la reacción de transesterificación requiere por lo menos de tres moles de alcohol por mol de aceite vegetal para producir tres moles de éster de ácido graso y un mol de glicerina. Freedman, et al. (1984) encontraron que las reacciones óptimas para la transesterificación con metanol con aceite de girasol y de soya, en proporciones de 4:1 y 6:1 respectivamente, produjeron un rendimiento de 90-97.8%, a diferencia de un porcentaje de 81% a una relación molar de 3:1. (8)

Los alcoholes utilizados para la transesterificación, pueden ser: metanol, etanol y butanol, y en tiempos de reacción mayores a 1h, la eficiencia de conversión es similar para los tres alcoholes (8).

El catalítico más utilizado en la transesterificación es el hidróxido de sodio o potasio, o el metóxido de sodio. La efectividad del catalítico está determinada por la relación molar de

los reactivos, la presencia de agua y de ácidos grasos en el medio de reacción. A mayor relación molar, se favorece el uso de hidróxidos, mientras que a menor relación molar se favorece el uso del metóxido. Sin embargo, la existencia de agua en el medio baja considerablemente la efectividad del hidróxido como catalítico en la transesterificación (8), ya que este se consume mediante la siguiente reacción:



Una limitación al proceso catalizado por álcali es la sensibilidad de los reactivos y el medio de reacción, ya que la presencia de agua puede causar saponificación de los ésteres en condiciones básicas, y los ácidos grasos también pueden producir jabón y agua, lo cual lleva a la formación de emulsiones, que causa problemas en la separación y recuperación del biodiesel. Es por ello que para la transesterificación en medio básico se ha trabajado más con aceite vegetal con menos del 2% p/p de ácidos grasos, o se realiza un pretratamiento al aceite usado para eliminar el exceso de ácidos grasos mediante una esterificación por catálisis ácida. (11)

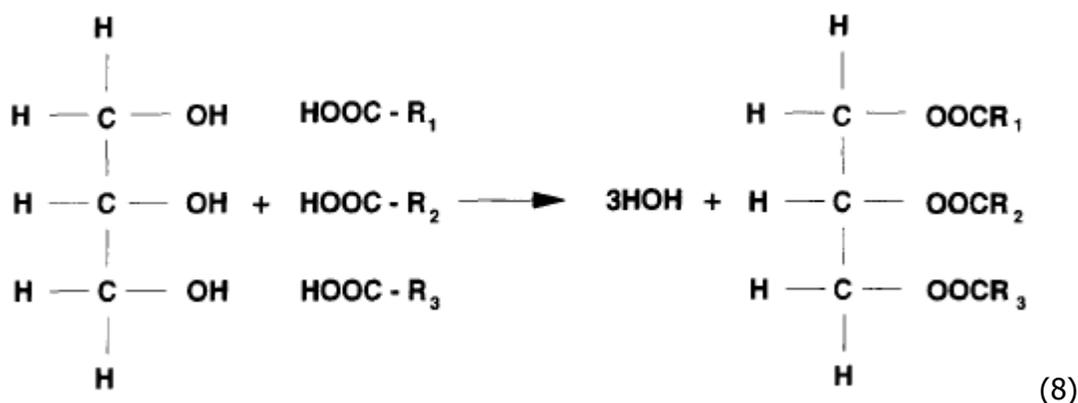
La transesterificación vía catálisis ácida ha sido estudiada en menor proporción que la catálisis básica para la producción de biodiesel, principalmente por su menor velocidad de reacción. Este tipo de transesterificación, necesita más temperatura, alcohol (generalmente metanol), más tiempo de reacción (11).

Además, este proceso necesita de equipo más sofisticado, reactivos de mayor costo y peligrosos, pero se ha encontrado que posee mejores porcentajes de rendimiento al utilizar aceites vegetales con alto contenido de ácidos grasos (12)

## **C. ACEITES VEGETALES**

### **1. COMPOSICIÓN**

Los aceites vegetales son sustancias hidrofóbicas, compuestas primordialmente de ésteres de ácidos grasos con glicerina, o triglicéridos. Estructuralmente, un triglicérido es el producto de reacción de una moléculas de glicerina con tres moléculas de ácidos grasos para producir tres moléculas de agua y una de triglicérido, como se muestra en la siguiente figura :



Glicerina

ácidos grasos

agua

triglicérido

Los ácidos carboxílicos que componen a los triglicéridos, generalmente son de cadena carbonada larga y con una o varias insaturaciones. En los aceites vegetales más conocidos, se encuentran comúnmente los ésteres de los siguientes ácidos, según la Tabla 4:

Tabla 4: Estructura química de ácidos grasos comunes encontrados en estructuras de aceites vegetales

Ácido graso	Estructura*
Mirístico	14:0
Palmítico	16:0
Estearico	18:0
Araquídico	20:0
Behénico	22:0
Lignocérico	24:0
Oleico	18:1
Ricinoleico	18:1
Erúcido	18:2
Linoleico	18:2
Linolénico	18:3

Fuente: Yusuf Ali & M. A. Hanna. 1994. ALTERNATIVE DIESEL FUELS FROM VEGETABLE OILS. Bioresource Technology. (EUA). (50): 153-163. \*: Número de carbonos: número de insaturaciones

La composición de ácidos grasos varía en el largo de la cadena carbonada y el grado de insaturación. Si los ácidos grasos son totalmente saturados, son sólidos a temperatura

ambiente, mientras que si poseen algún grado de insaturación suelen ser líquidos a temperatura ambiente. La composición generalizada de ácidos grasos en los aceites vegetales de uso más común se da en la Tabla 5:

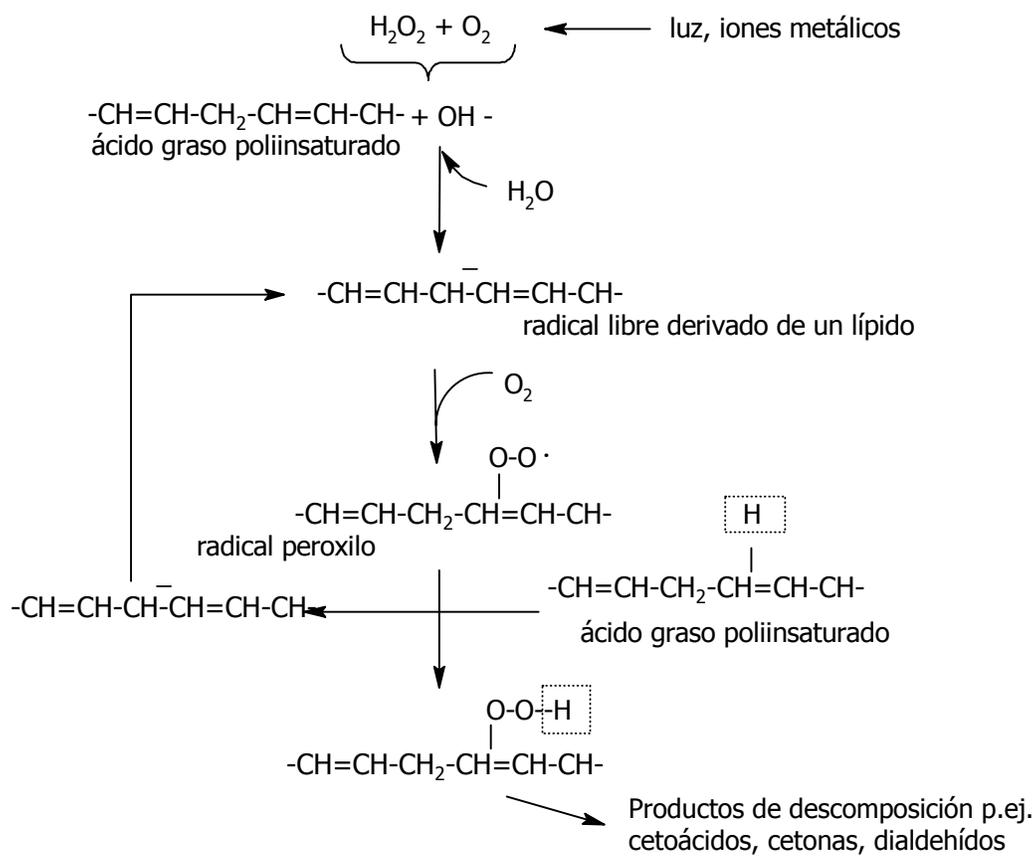
Tabla 5: Composición en ácidos grasos de aceites vegetales

Aceite vegetal	Composición de ácidos grasos (% p/p)								
	palmítico	esteárico	araquídico	behénico	lignocérico	ricinoleico	erúcico	linoleico	Linolénico
Maíz	11- 67	1- 85	0- 24	0- 00	0- 00	25- 16	0- 00	60- 60	0- 48
Algodón	28- 33	0- 89	0- 00	0- 00	0- 00	13- 27	0- 00	57- 51	0- 00
Crambe	2- 07	0 -70	2- 09	0-80	1-12	18: 86	58-51	9- 0	6- 85
Maní	11- 38	2- 39	1- 32	2- 52	1- 23	48: 28	0- 00	31- 95	0- 93
Colza	3- 49	0 -85	0- 00	0- 00	0- 00	0- 00	0- 00	22-30	8- 23
Soya	11- 75	3- 15	0- 00	0- 00	0- 00	0- 00	0- 00	55-23	6- 31
Girasol	6- 08	3 -26	0- 00	0- 00	0- 00	0- 00	0- 00	73- 73	0- 00

Fuente: Yusuf Ali & M. A. Hanna. 1994. ALTERNATIVE DIESEL FUELS FROM VEGETABLE OILS. Bioresource Technology. (EUA). (50): 153-163.

## 2. PROCESOS DE OXIDACIÓN

En los aceites vegetales, el porcentaje de ácidos grasos es alto, por lo que son susceptibles a procesos de oxidación. Se considera que la ruta principal de oxidación de los aceites vegetales es la rancidez, después de un tiempo de almacenaje, resultando de la oxidación de las insaturaciones de los ácidos grasos. (13). Esta se debe a la susceptibilidad de un doble enlace para perder un átomo de hidrógeno y formar un radical libre. La causa inicial de la pérdida de hidrógeno es la acción de radicales libres derivados del oxígeno. La luz y otras radiaciones, así como las altas concentraciones de oxígeno forman el radical superóxido ( $O_2\cdot$ ) y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) que interaccionan con los aceites para formar el radical hidroxilo ( $OH\cdot$ ) que es muy reactivo. (14) El mecanismo de autooxidación es el siguiente:



(14)

## IV. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, el consumo de combustibles fósiles está afectando al medio ambiente, además de poseer precios elevados para el consumidor promedio, es por ello que han surgido combustibles alternativos como el biodiesel. La fabricación del biodiesel puede realizarse mediante una reacción de transesterificación a partir de metanol o etanol y materiales no derivados del petróleo, como aceites y grasas vegetales, nuevas y usadas, lo cual proporciona un reproceso de estos materiales de desecho. Otra de las ventajas de este combustible son sus similitudes con el funcionamiento del diesel, el buen funcionamiento con motores diesel existentes en el mercado y la reducción de emisiones de óxidos de azufre y carbono (gases de invernadero) a la atmósfera durante su combustión (1), que reduciría la contaminación atmosférica. Por otra parte, el subproducto de la reacción de transesterificación es la glicerina, la cual tiene amplios usos en la industria de jabones, edulcorantes, explosivos, lubricantes, etc. (15), por lo que se generará un producto aprovechable para otros procesos.

La producción de biodiesel se puede realizar con distintos alcoholes, como metanol, etanol, isopropanol, etc. (2), siendo el más estudiado y utilizado el metanol; aceite vegetal y como catalítico una base fuerte. Sin embargo, la mayoría de información de más fácil acceso que se encuentra acerca de la producción de biodiesel es empírica o en algunos casos de investigaciones científicas es poco específica respecto a las condiciones óptimas de reacción, por lo que es necesario un estudio que se enfoque en estudiar ciertas variables de la reacción para poder optimizar el proceso de fabricación de biodiesel con etanol y aceite vegetal.

Las variables que se estudiaron para la optimización del aceite vegetal de girasol en este trabajo son: temperatura de reacción, proporción de etanol, tiempo de reacción y concentración de catalítico (KOH), debido a que éstas interfieren directamente en la reacción de transesterificación. Se escogió etanol principalmente porque éste, a diferencia del metanol, es un producto más barato, menos tóxico y puede producirse a partir de rutas alternativas al petróleo, en particular en Guatemala se produce en gran

cantidad como subproducto del proceso azucarero, lo cual generaría un combustible con orígenes más compatibles con el ambiente. Se escogió aceite vegetal de girasol por su alta disponibilidad en el mercado guatemalteco y bajo precio.

Por estas razones y aplicaciones futuras a este combustible alternativo, es importante una investigación que optimice el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal y etanol.

## V. OBJETIVOS

### A. OBJETIVO GENERAL

Optimizar el proceso de transesterificación de aceite vegetal de girasol utilizando etanol.

### B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la temperatura óptima de la transesterificación de aceite vegetal de girasol utilizando etanol.
2. Encontrar la proporción óptima de etanol para la transesterificación de aceite vegetal de girasol.
3. Determinar la concentración de catalítico óptima de la transesterificación de aceite vegetal de girasol utilizando etanol.
4. Determinar el tiempo de reacción óptimo de la transesterificación de aceite vegetal de girasol utilizando etanol.
5. Evaluar el porcentaje de rendimiento de la reacción de transesterificación al utilizar etanol al 95% y las variables optimizadas de temperatura de reacción, concentración de catalítico y tiempo de reacción.
6. Separar efectivamente la mezcla de productos de la reacción de transesterificación de aceite vegetal con etanol.

## **VI. HIPÓTESIS**

En el presente trabajo no se planteó una hipótesis, debido a que se desconoce el efecto de las variables independientes sobre la dependiente, por lo que sólo se plantearon objetivos para tales efectos.

## VII. MATERIALES Y MÉTODO

**A. UNIVERSO:** Aceite vegetal de girasol procedente de la industria de alimentos

**MUESTRA:** 5 L de aceite vegetal nuevo de girasol

### B. MATERIALES

#### 1. Cristalería/ Equipo:

- 10 beakers 250 ml
- 1 baño de temperatura
- 5 estufas eléctricas con agitación magnética marca Ohaus
- 2 agitadores magnéticos
- Papel filtro
- 3 agitadores de vidrio
- 1 bureta de 25 ml
- Pipetas de 50 ml, 100 y 1000 ml
- 4 Erlenmeyers de 400 ml
- 10 erlenmeyers de 250 ml
- Varilla de agitación

#### 2. Reactivos:

- aceite vegetal de girasol
- Etanol al 95%
- Etanol absoluto
- Metanol
- KOH grado reactivo
- Ácido peryódico grado reactivo
- Yoduro de potasio
- Ácido acético glacial
- Tiosulfato de sodio
- Almidón
- Cloroformo
- Dicromato de potasio
- Ácido clorhídrico

## C. MÉTODO

### 1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se llevó a cabo utilizando aceite vegetal de girasol nuevo, adquirido en comercios locales. La composición de este aceite incluye diversidad de ácidos grasos, por poseer aceite de soya u oleína aparte del de girasol en la mezcla comercial, lo cual no afecta en la detección del rendimiento de la reacción, ya que el método para detectar el porcentaje de reacción se basa en la formación de glicerina, y no de ésteres de ácidos grasos, como se puede ver en la reacción general de la transesterificación, en la sección IIB. El proceso de transesterificación se llevó a cabo en medio básico utilizando KOH como catalítico.

La optimización del proceso de transesterificación de aceite vegetal con etanol se llevó a cabo en tres fases, evaluando el porcentaje de rendimiento a través de la cuantificación de glicerina formada como subproducto de reacción:

1. Inicialmente se realizó una serie de reacciones de prueba utilizando como alcohol etanol al 95% y etanol absoluto a diferentes valores de las variables bajo estudio (tiempo de reacción, temperatura de reacción y concentración de catalítico) esperando observar si había reacción, lo cual se manifiesta por la separación de dos fases, la fase orgánica que consta del biodiesel y la fase acuosa que es la glicerina. Debido a que en ninguna de las reacciones de prueba hubo separación de fases, se procedió a evaluar la reacción de transesterificación utilizando metanol y una mezcla etanol absoluto/metanol 50:50, determinándose que en ésta sí hubo separación de fases de los productos de reacción.
2. Luego de verificar que sí había reacción y separación de fases, se continuó con la optimización de las variables de tiempo de reacción, proporción de etanol/ metanol, temperatura de reacción y concentración de catalítico (KOH), dejando para ello, constantes tres de las cuatro variables mencionadas modificando la cuarta hasta optimizarla, realizando como mínimo 5 experimentos por cada conjunto de condiciones en función de los resultados, evaluando la tendencia del porcentaje de rendimiento hasta que fuera constante.

3. Finalmente, se evaluó el porcentaje de rendimiento, utilizando las cuatro variables optimizadas en el paso anterior, pero utilizando etanol al 95% en lugar de etanol absoluto.

El porcentaje de rendimiento de la reacción se siguió mediante la aplicación del método 14-56 de la AOCS (The American Oil Chemist's Society) para cuantificación de glicerina (Anexo 4). Para ello se realizó primero el análisis de glicerina total en la muestra (que corresponde al 100% del porcentaje de rendimiento de la reacción) y luego para las muestras se aplicó el procedimiento de glicerina libre.

## 2. PROCEDIMIENTO

- a. Se adquirió aceite vegetal de girasol nuevo, procedente de un comercio local, y se almacenó en un lugar seco, fresco y sin contacto con la luz.
- b. Se realizó el procedimiento para glicerina total y glicerina libre, de acuerdo con el procedimiento indicado en el Anexo 4, directamente al aceite vegetal nuevo.
- c. Para la reacción de transesterificación de aceite vegetal, se llevó a cabo el siguiente procedimiento, variando los valores de temperatura, proporción de etanol/ metanol, tiempo de reacción y concentración de catalítico según los valores indicados en la Tabla 6:
  - i. Se calentaron 100 ml de aceite vegetal nuevo a 45 °C hasta desaparición de burbujeo, en un beacker de 250 mL, para lograr eliminación de agua en el aceite. Luego, se llevó a la temperatura requerida según la Tabla 6.
  - ii. Se agregó lentamente una mezcla de X g de KOH, dentro del rango de la Tabla 6, en 28 mL de alcohol (etanol al 95%, etanol absoluto o mezcla de etanol absoluto y metanol) manteniendo el sistema con agitación vigorosa y constante.
  - iii. La mezcla de reacción se mantuvo a una temperatura adecuada, según la Tabla 6.
  - iv. El tiempo de reacción se mantuvo dentro del rango de valores de la Tabla 6.
  - v. La mezcla se dejó separar por 24 horas.

Tabla 6: Rangos de valores que se trabajaron en la reacción de transesterificación de aceite vegetal con etanol

PROPORCIÓN ETANOL /METANOL	TEMPERATURA (°C)	CONCENTRACIÓN CATALÍTICO (%)*	TIEMPO DE REACCIÓN (min)
0/100 – 100/0	25- 65	0.5- 1.5	10-50

\* Se trabajó con KOH como catalítico en porcentaje peso/ volumen (g KOH/100 ml aceite vegetal)

- vi. Se evaluó el porcentaje de rendimiento en cada una de las reacciones, mediante el método de glicerina libre (Anexo 4)

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la primera fase de este trabajo no se analizó el porcentaje de rendimiento, debido a la falta de separación de fases en el sistema de reacción, la glicerina y el biodiesel, siendo la glicerina necesaria para el análisis de los resultados.

En la segunda fase se llegó a la optimización de las variables de tiempo de reacción, proporción de etanol/ metanol, temperatura de reacción y concentración de catalítico, graficando el porcentaje de rendimiento (en función de la glicerina producida) contra cada una de las variables en sus diferentes valores, evaluando la tendencia de la Gráfica obtenida, así mismo, se calculó la segunda derivada mediante la relación:  $(var_2 - var_1) / (conc_2 - conc_1)$ . El punto en donde la relación fue igual a 0, fue tomado como equivalente al valor óptimo para la variable dada. Para evaluar la tendencia del porcentaje de rendimiento con cada variable, se realizaron como mínimo 5 puntos, a diferentes valores para las variables estudiadas, realizando cada análisis por duplicado.

Para la tercera fase se tenía planteado evaluar el porcentaje de rendimiento utilizando el valor optimizado de la proporción de etanol absoluto/ metanol, comparándolo con reacciones con las condiciones optimizadas, variando el etanol absoluto por etanol al 95%. Esto se hubiera analizado mediante la aplicación de la prueba de T student, comparando la media aritmética de los procesos, planteando:

Nivel de confianza = 95%

$H_i: X_1 \neq X_2$

$X_1$  : % rendimiento utilizando etanol absoluto

$H_o: X_1 = X_2$

$X_2$ : % rendimiento utilizando etanol al 95%

Para las repeticiones para esta fase se tomaría en cuenta:

$$\Delta = \sigma$$

$$n_j = 2NC^2\sigma^2/\Delta^2$$

$$NC = Z (1-\alpha/2) = 1.96$$

$$n_j = 2 NC^2 = 2(1.96)^2 = 7.68 \approx 8 \text{ repeticiones}$$

Sin embargo, este análisis no fue posible realizarlo, debido a la falta de separación de fases en las reacciones utilizando etanol al 95%.

## VIII. RESULTADOS

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo la optimización de las siguientes variables en el proceso de transesterificación de aceite vegetal de girasol: tiempo de reacción, proporción de etanol absoluto/ metanol, temperatura de reacción y concentración de catalítico (KOH), tal como se describe en el diseño de investigación, utilizando el procedimiento indicado en la sección VI, apartado 2.

Los resultados se dividen en tres fases, en la primera se presentan las pruebas realizadas utilizando etanol al 95% y etanol absoluto a diferentes valores de las otras tres variables bajo estudio. La segunda fase presenta los resultados de la optimización de la reacción de transesterificación de aceite vegetal, utilizando mezcla de etanol absoluto/ metanol, optimizando las cuatro variables: tiempo de reacción, proporción de etanol absoluto/ metanol, temperatura de reacción y concentración de catalítico. En la tercera fase se evalúa el rendimiento de la reacción utilizando las tres variables optimizadas en la fase anterior, sustituyendo el etanol absoluto por etanol al 95%.

### PRIMERA FASE:

Los resultados de esta fase se presentan en la Tabla 7, y consisten en una serie de reacciones de prueba utilizando etanol al 95% y etanol absoluto:

Tabla 7: Reacciones de transesterificación de aceite vegetal de girasol utilizando etanol al 95% y etanol absoluto a diferentes condiciones de reacción

Alcohol	Temperatura (° C)	Tiempo (min)	% KOH *	Observaciones**
etanol 95%	35.5 -36.6	30	0.5	no hubo separación de fases
etanol 95%	35.6-36.2	30	1.03	no hubo separación de fases, se observa formación de espuma
etanol 95%	37.7-37.0	15	0.5	No hubo separación de fases
etanol 95%	34.5-35.0	15	1	No hubo separación de fases
etanol 95%	36.5-36.8	20	0.5	No hubo separación de fases
etanol 95%	48.0-49.0	20	0.5	No hubo separación de fases
etanol 95%	36.3-36.7	10	1	No hubo separación de fases
etanol 95%	37.7-38.3	10	1	no hubo separación de fases

Continúa...

Continuación Tabla 7

Alcohol	Temperatura (° C)	Tiempo (min)	% KOH *	Observaciones**
etanol 95%	45.3-46	20	0.7	no hubo separación de fases
Etanol absoluto	44.9-45.4	20	0.7	no hubo separación de fases
Etanol absoluto	67-71	20	0.7	no hubo separación de fases
Etanol absoluto	55-62	60	0.7	no hubo separación de fases

\*Las concentraciones de catalítico se trabajaron en porcentaje peso/ volumen respecto a los 100 ml de aceite vegetal. (g KOH/ ml aceite).

\*\* No hubo separación de fases después de 24 horas

Fuente: datos obtenidos experimentalmente

## SEGUNDA FASE

Los resultados de esta fase se presentan en las Tablas 8 a la 12 y en las Gráficas 1 a la 8. En esta fase se realizó una primera serie de reacciones para evaluar si los alcoholes, metanol y etanol absoluto, utilizados puros o en mezcla 50:50 producían la reacción de transesterificación y separación de fases. El porcentaje de rendimiento de estas reacciones se calculó únicamente en función de la glicerina total del aceite, tomada como el 100% (ver Anexos 4 y 5), en vista que el aceite no contenía una cantidad de glicerina por encima del límite de cuantificación del método. Los resultados de esto se pueden observar en la Tabla 8:

Tabla 8: Reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol utilizando etanol absoluto y metanol a distintas proporciones

Proporción etanol absoluto/ metanol	% rendimiento *	Observaciones	Condiciones de reacción
100/ 0	-----	No hay separación de fases	Tiempo 20 minutos
0/ 100	92.2	Separación de dos fases completa	Temperatura: 50 ° C
50/ 50	80.4	Separación de dos fases completa	Concentración de catalítico 0.7% p/ v KOH

\*Cálculos en Anexo 5, sección 1.

Fuente: datos obtenidos experimentalmente

Una vez determinado que la mezcla de etanol absoluto/ metanol sí producía reacción, se procedió a optimizar el tiempo de reacción, dejando constantes las variables de temperatura de reacción, proporción de etanol absoluto/ metanol y concentración de catalítico. Los resultados se pueden observar en la Tabla 9. En la Gráfica 1 se puede observar la tendencia del comportamiento de la reacción y en la Gráfica 2 el comportamiento de la segunda derivada para este sistema y el punto en el cual se vuelve 0, que indica el valor de tiempo óptimo, en este caso, 25 minutos.

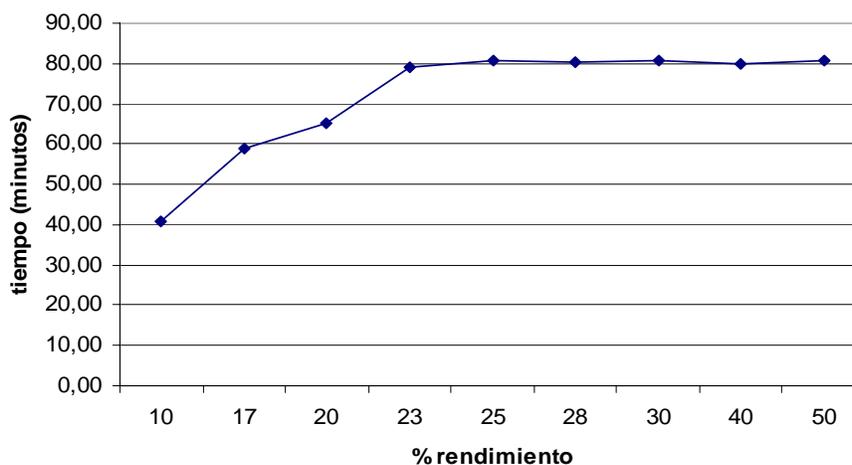
**Tabla 9: Optimización de la variable de Tiempo de Reacción de la transesterificación de aceite vegetal de girasol**

Tiempo (minutos)	% rendimiento *	Segunda derivada	Condiciones de reacción
10	40,9	2,6	Proporción etanol absoluto/ metanol 50/50 Temperatura 50 ° C Concentración 0.7% de de catalítico KOH
17	59,1	2,0	
20	65,0	4,6	
23	78,9	0,9	
25	80,7	0,0	
28	80,7	0,0	
30	80,7	0,0	
40	80,7	0,0	
50	80,7	0,0	

\*Cálculos en Anexo 5, sección 2.

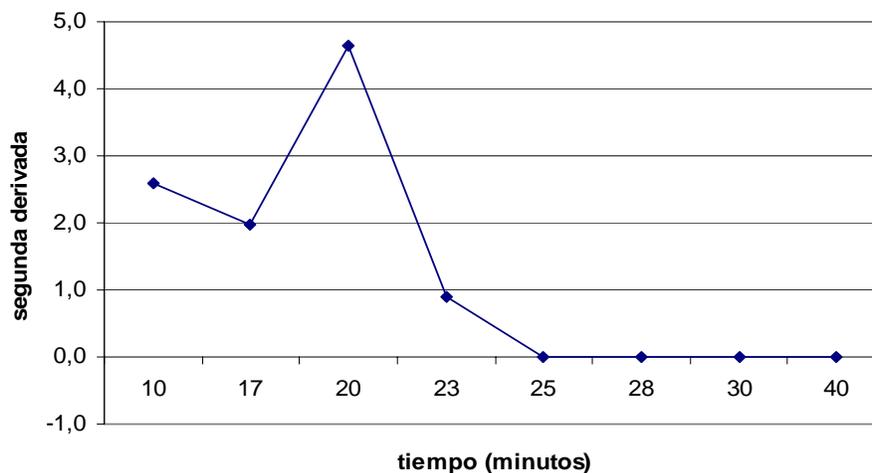
Fuente: datos obtenidos experimentalmente

**Gráfica 1: Optimización de la variable Tiempo de Reacción en la transesterificación de aceite vegetal de girasol**



Fuente: datos tomados de la Tabla 9

Gráfica 2: Segunda derivada de la optimización de la variable Tiempo de Reacción en la transesterificación de aceite vegetal de girasol



Fuente: datos tomados de la Tabla 9

La siguiente variable a optimizar fue la proporción de etanol absoluto/ metanol, dejando constante las variables de tiempo de reacción en 25 minutos (optimizada), temperatura y concentración de catalítico. En la Tabla 10 y las Gráficas 3 y 4 se presentan los datos obtenidos para la optimización de la variable: Proporción de etanol absoluto/ metanol, para la reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol, donde se observa que la mayor proporción de etanol, con separación de fases, se alcanza con la proporción de 62.14% de etanol absoluto y 37.86 de metanol.

Tabla 10: Optimización de la variable Proporción de Etanol Absoluto/ Metanol en la transesterificación de aceite vegetal de girasol

% Etanol absoluto/ metanol*	% Rendimiento **	Segunda derivada	Condiciones de reacción	
0/ 100	90,5	-0,2	Tiempo:	25 minutos
50/ 50	80,7	-0,2	Temperatura	50 ° C
60/40	79,2	-0,3	Concentración de Catalítico	0.7% KOH
62.14/ 37.86	78,5	-4,4		
64.29/ 35.71	69,0			
66.43/ 33.57	0.00			
67.86/ 32.14	0.00			

Continúa...

...continuación Tabla 10

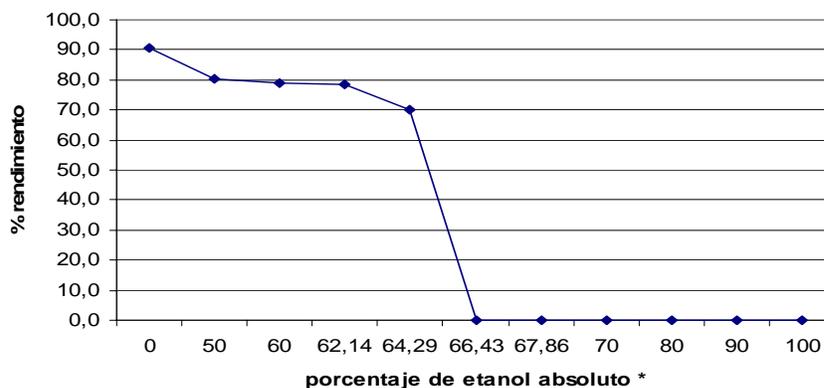
% Etanol absoluto/ metanol *	% Rendimiento **	Segunda derivada
70/30	0.00	
80/20	0.00	
90/10	0.00	
100/0	0.00	

\*\*Cálculos en Anexo 5, sección 3.

\*Los valores que corresponden a 0.00%, se deben a falta de separación de fases.

Fuente: datos obtenidos experimentalmente

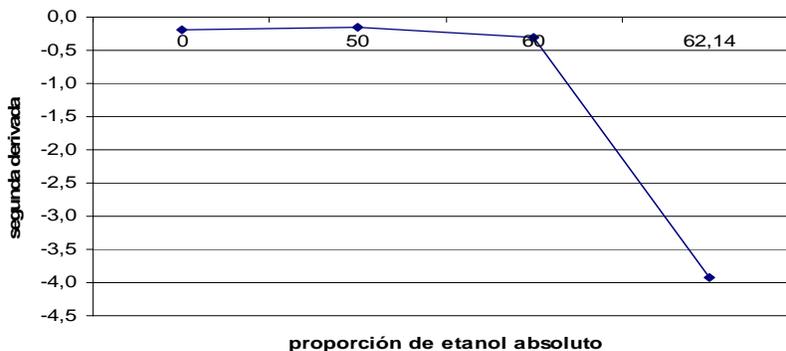
Gráfica 3: Optimización de la variable Proporción de Etanol Absoluto/ Metanol en la reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol\*



\*Los porcentajes presentados en el eje horizontal de la Gráfica 3 son de etanol, el resto del porcentaje es de metanol.

Fuente: datos obtenidos de la Tabla 10

Gráfica 4: Segunda derivada de la optimización de la variable Proporción de Etanol Absoluto/ Metanol en la transesterificación de aceite vegetal de girasol



Fuente: datos obtenidos de la Tabla 10

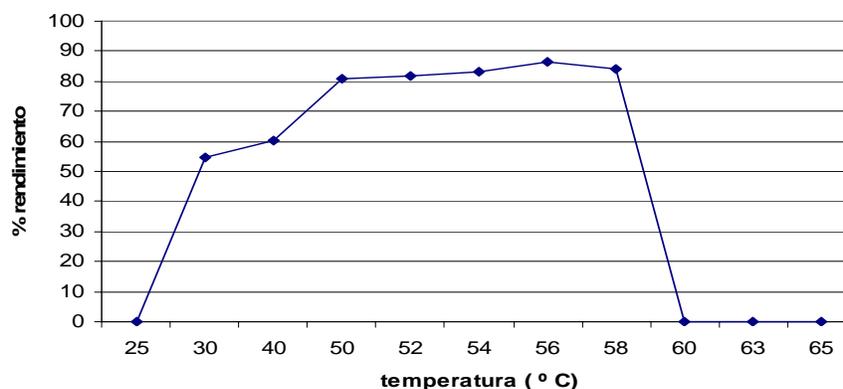
Los resultados para la optimización de la variable de Temperatura de reacción en la transesterificación de aceite vegetal de girasol se presentan en la Tabla 11 y en las Gráficas 5 y 6. En esta serie de reacciones se dejaron las variables de tiempo: 25 minutos (optimizada), proporción de etanol absoluto/ metanol: 62.14/ 37.86 (optimizada) y concentración de catalítico. En estas reacciones se puede observar que la temperatura óptima de reacción es de 56 ° C.

Tabla 11: Optimización de la variable de Temperatura en la transesterificación de aceite vegetal de girasol

Temperatura (°C)	% Rendimiento*	Segunda derivada	Condiciones de reacción	
25	0		Tiempo	25 minutos
30	54,9	0,6	Proporción de etanol absoluto/ metanol	62.14/ 37.86
40	60,5	1,8	Concentración de catalítico	0.7% de KOH p/v
50	78,5	1,3		
52	81,2	0,9		
54	82,9	1,7		
56	86,4	-1,1		
58	84,3			
60	0,00			
63	0,00	*Cálculos en Anexo 5, sección 4		
65	0,00			

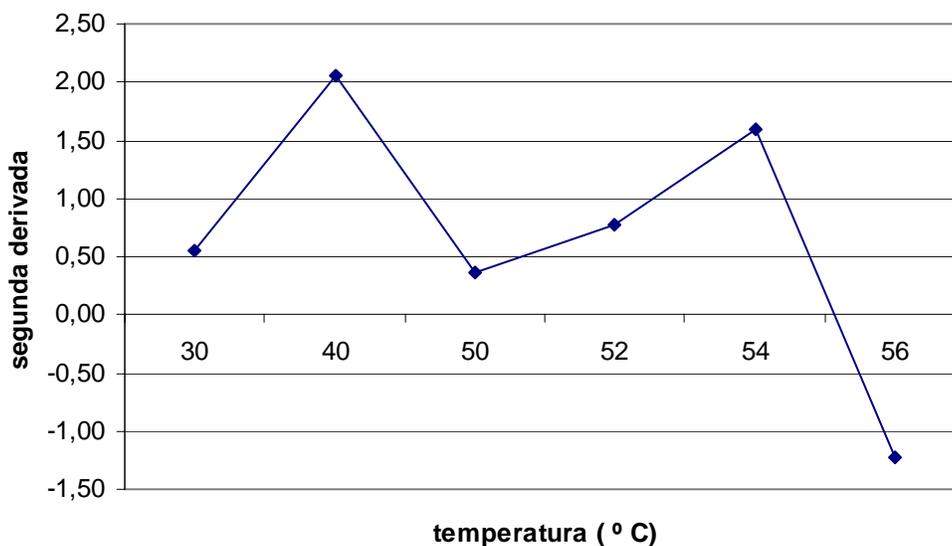
Fuente: datos obtenidos experimentalmente

Gráfica 5: Optimización de la variable Temperatura en la transesterificación de aceite vegetal de girasol



Fuente: datos obtenidos de la Tabla 11

Gráfica 6: Segunda derivada de la optimización de la variable Temperatura en la transesterificación de aceite vegetal de girasol



Fuente: datos obtenidos de la Tabla 11

Los resultados para la optimización de la variable Concentración de Catalítico (KOH) para la transesterificación de aceite vegetal de girasol se presentan en la Tabla 12 y Gráficas 7 y 8. En esta serie de reacciones se utilizaron los valores optimizados de las variables de: tiempo, proporción de etanol absoluto/ metanol y temperatura. Se puede observar que el valor óptimo para la variable de concentración de catalítico es de 1.0 %

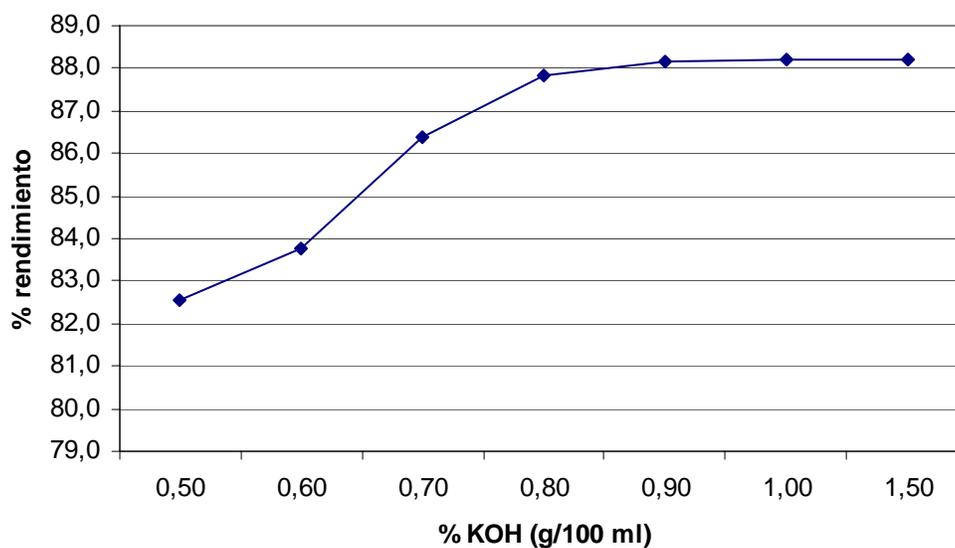
Tabla 12: Optimización de la variable Concentración de Catalítico de la transesterificación de aceite vegetal de girasol

% KOH	% Rendimiento*	Segunda derivada	Condiciones de reacción
0.5	82,6	12,1	Tiempo 25 minutos
0.6	83,8	26,2	Proporción de etanol absoluto/ metanol 62.14/ 37.86
0.7	86,4	14,4	
0.8	87,8	3,2	Temperatura 56 ° C
0.9	88,2	0,3	
1.0	88,2	0,0	
1.5	88,2		

\*Cálculos en Anexo 5, sección 5.

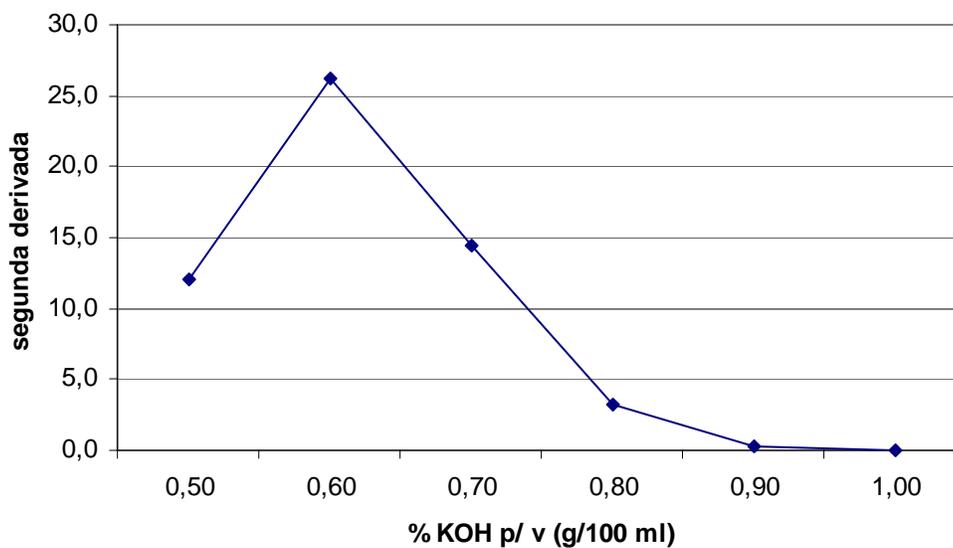
Fuente: datos obtenidos experimentalmente

Gráfica 7: Optimización de la variable Concentración de Catalítico de la transesterificación de aceite vegetal de girasol



Fuente: datos obtenidos de la Tabla 12

Gráfica 8: Segunda derivada de la optimización de la variable Concentración de Catalítico en la transesterificación de aceite vegetal de girasol



Fuente: datos obtenidos de la Tabla 12

### TERCERA FASE

En la tercera fase de este trabajo se realizaron 4 reacciones de transesterificación de aceite vegetal de girasol con las variables optimizadas de tiempo de reacción, temperatura de reacción y concentración de catalítico, sustituyendo etanol absoluto por etanol al 95% en la proporción etanol/ metanol para evaluar si había separación de fases. Los resultados se observan en la Tabla 13, donde se puede apreciar que no hubo separación de fases en la mezcla de reacción:

Tabla 13: Evaluación de la reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol utilizando etanol al 95%/ metanol en proporción 62.14/ 37.86 y las variables optimizadas de tiempo, temperatura y concentración de catalítico

No. experimento	% Rendimiento	Observaciones	Condiciones de reacción
1	-----	No hay separación de fases, se observa formación de burbujas en todas las mezclas de reacción.	Tiempo 25 minutos
2	-----		Proporción etanol 95%/ metanol 62.14/ 37.86
3	-----		Temperatura 56 ° C
4	-----		Concentración de catalítico 1.0 % KOH p/ v

Fuente: datos obtenidos experimentalmente

## IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los resultados de las reacciones de transesterificación de aceite vegetal de girasol presentados en la primera fase de este trabajo, en la Tabla 7, no se determinó el porcentaje de rendimiento, debido a la falta de separación de las dos fases del medio de reacción, glicerina y biodiesel, siendo la glicerina necesaria para tal análisis, según el método propuesto para la cuantificación de glicerina (Anexo 4). La falta de separación de fases en las reacciones indicadas en la Tabla 7, tanto al utilizar etanol al 95% como etanol absoluto, puede ocurrir debido a la competencia de la reacción de transesterificación con la reacción de saponificación, la segunda se da en similares condiciones de reacción a la primera (10), con la variante que la saponificación necesita la presencia de agua en el medio, lo cual ocurre con el etanol al 95%, que se observó experimentalmente como la formación de espuma en el medio de reacción (ver Tabla 7). La reacción de saponificación en medio básico tiene como productos de reacción sales de ácido carboxílico (10), las cuales se componen de una parte polar y otra apolar. Éstas moléculas actúan como agente emulsificante entre las fases de glicerina, polar, y la de biodiesel, apolar, por lo que la separación de las dos fases no ocurre. Es importante notar que la reacción no ocurrió aún al utilizar etanol absoluto por un tiempo de reacción largo (60 minutos) y con suficiente calentamiento (55-62 ° C) lo cual indica que probablemente el catalítico utilizado (KOH) no es una base lo suficientemente fuerte para generar el ión etóxido (aún en pequeñas cantidades) que es el nucleófilo que llevará a cabo la reacción de transesterificación. En el caso del metanol el KOH sí genera el ión metóxido, probablemente debido a la leve diferencia en los valores de pKa de los dos alcoholes (16 para etanol y 15 para metanol) (21).

Dada la falta de separación de fases se procedió a evaluar en la segunda fase de este trabajo, la reacción de transesterificación utilizando diferentes proporciones de etanol absoluto/metanol, donde se observa que en una proporción 50:50 (ver Tabla 8) sí hay reacción y separación de fases aunque el porcentaje de rendimiento es menor que utilizando metanol exclusivamente. Debido a que el porcentaje de rendimiento de la reacción con la mezcla de etanol absoluto/ metanol 50:50 fue de 80.4, mucho mayor a

46.1%, que corresponde estequiométricamente a la glicerina que se hubiera formado si la reacción hubiera procedido exclusivamente con el metanol de la muestra usada, se determinó que ocurre reacción de transesterificación con el etanol que se encuentra en la mezcla. Debido a que esta reacción ocurre con la mezcla etanol absoluto/ metanol, es necesario lograr la proporción óptima de esta mezcla, por lo que esta condición de reacción se trabajó como una variable a optimizar en este trabajo. A partir de esto, se realizó la optimización de cada una de las siguientes variables para la transesterificación de aceite vegetal de girasol: tiempo de reacción, proporción de etanol absoluto/ metanol, temperatura de reacción y concentración de catalítico.

La primera variable que se optimizó para la transesterificación de aceite vegetal de girasol fue el tiempo de reacción, para ello se utilizaron las condiciones de reacción que se muestran en la Tabla 9. En este proceso, se dejaron constantes las variables de temperatura, proporción de etanol absoluto/ metanol y concentración de catalítico. A partir de las reacciones realizadas, se determinó que el porcentaje de rendimiento máximo de la reacción se consigue con el valor de 25 minutos en la variable de tiempo, según los datos de la Tabla 9, a partir del cual el porcentaje de rendimiento se vuelve constante. Esto se manifiesta en la Gráfica 1 como un punto de inflexión en los 25 minutos, a partir de donde la pendiente de la gráfica es igual a 0, siendo un indicio de que el valor óptimo de tiempo es de 25 minutos. A los datos de porcentaje de rendimiento para la optimización de la variable de tiempo, se les realizó el análisis de la segunda derivada, siendo el valor más cercano a 0 el correspondiente a los 25 minutos, como se puede observar en la Tabla 9 y en la Gráfica 2, por lo que este análisis comprueba que 25 minutos es el valor optimizado para la variable tiempo de reacción.

Para la optimización de la variable Proporción de etanol absoluto/ metanol en la transesterificación de aceite vegetal de girasol, se utilizaron las condiciones de reacción mostradas en la Tabla 10, utilizando el valor optimizado del tiempo de reacción. El análisis de resultados se basó el porcentaje de rendimiento de la reacción, sin embargo, este análisis se realizó de manera diferente a los resultados para la optimización de tiempo de reacción, ya que para la optimización de la proporción de etanol absoluto/ metanol, se

persigue utilizar el menor porcentaje de metanol posible en la mezcla, como se determinó en los objetivos de este trabajo. Debido a esto, la proporción óptima de la mezcla se determinó que era 62.14/ 37.86 de etanol absoluto/ metanol. Este valor se basa en que a proporciones más altas de etanol absoluto en la mezcla, 64.29/ 35.71, se observó que el porcentaje de rendimiento decrece rápidamente y con proporciones mayores de etanol, no hubo separación de fases, por lo que además se comprueba que la presencia de metanol es crítica para este proceso. En el análisis de la segunda derivada, según los datos en la Tabla 10 y Gráfica 3, el valor correspondiente al porcentaje de 62.14/ 37.86 no es el valor más cercano a 0, pero sí corresponde a la mayor proporción de etanol alcanzada para que la reacción de transesterificación se realice y exista una separación de fases. Por estas razones, se siguió trabajando con este valor como el valor óptimo para la proporción de etanol absoluto/ metanol.

En la optimización de la variable temperatura de reacción, se trabajó en un rango desde temperatura ambiente hasta 65 ° C, con los valores optimizados para las variables de tiempo de reacción y proporción de etanol absoluto/ metanol, como está indicado en la Tabla 11. En este caso, se observó que la temperatura óptima alcanzada es a los 56 ° C, ya que el porcentaje de rendimiento para este valor de temperatura es el máximo alcanzado, como se puede observar en la Tabla 11 y en la Gráfica 5. Además, se puede observar que el porcentaje de rendimiento decrece al aumentar la temperatura en 58 ° C, hasta llegar a un punto que no hay separación de fases, desde 60 a 65 ° C (ver Tabla 11), lo cual se debe a la evaporación paulatina del metanol en el medio de reacción al aumentar la temperatura, ya que su temperatura de ebullición se encuentra a 64 ° C (10) a 1 atmósfera de presión, y, debido a que en Guatemala la presión se encuentra alrededor de 0,96 atmósferas, disminuye la temperatura a la cual ebulle el metanol. Esta evaporación de metanol hace que la proporción de éste decrezca en la mezcla de etanol absoluto/ metanol, y, como se observa en los datos para la optimización de la proporción de etanol absoluto/ metanol de la Tabla 9, si aumenta la proporción de etanol en la mezcla, el porcentaje de rendimiento disminuye o no hay separación de fases. En el análisis de la segunda derivada puede observarse que, aunque el valor obtenido de -1.2 para 56 ° C está más alejado de 0 que los valores a temperaturas menores, éste es el

valor de temperatura a la cual se alcanza un mayor porcentaje de rendimiento de la reacción, y en donde no se altera la proporción de etanol absoluto/ metanol, por lo que se concluye que a 56 ° C se encuentra el valor óptimo para la variable de temperatura de reacción.

Para la optimización de la variable Concentración de Catalítico, en este caso hidróxido de potasio, se realizaron reacciones utilizando los valores optimizados de tiempo de reacción, proporción de etanol absoluto/ metanol y temperatura de reacción. En la Tabla 12 se pudo observar que el porcentaje óptimo de KOH se alcanzó en 1.0 % p/v, ya que a partir de este punto el porcentaje de rendimiento se vuelve constante, lo que se puede observar en la Gráfica 7. En el análisis de la segunda derivada, se puede observar en la Gráfica 8 que el valor se vuelve 0 en el punto correspondiente al 1.0% de KOH, lo cual confirma que este es el valor óptimo de concentración de catalítico para la reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol.

En la tercera fase de este trabajo, se evaluó la reacción de transesterificación utilizando etanol 95%/ metanol y las variables optimizadas de tiempo, temperatura y concentración de catalítico, donde se puede observar que a pesar de tener todas las variables optimizadas de tiempo de reacción, proporción de etanol absoluto/ metanol, temperatura de reacción y concentración de catalítico, no hubo separación de fases en las reacciones de transesterificación al sustituir etanol al 95 % en la proporción de etanol absoluto/ metanol (ver Tabla 13), ello por la presencia de agua en el medio (5% debido a la concentración del etanol), por lo que hubo competencia con la reacción de saponificación, manifestándose además por la formación de burbujas en todos los medios de reacción, por lo que la presencia de agua en el medio hace que la reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol no ocurra con estas condiciones.

Un aspecto muy importante del proceso de transesterificación de aceite vegetal de girasol en este trabajo es el uso de una proporción mayor de etanol que de metanol, ya que este alcohol puede obtenerse a partir de fuentes vegetales y biodegradables, por lo que produce menos contaminación al ambiente en el proceso de su obtención, a diferencia

del metanol que se obtiene de derivados del petróleo (1,3) a partir de un proceso más contaminante para el ambiente. La optimización de todas las variables de la transesterificación de aceite vegetal se logró alcanzando un porcentaje de rendimiento de la reacción de 88.2 %, que comparándolo con el metanol, 92.2, ligeramente menor, pero debe tomarse en cuenta los beneficios que se obtienen en el proceso debido a la fuente de la materia prima, disminuyendo la contaminación ambiental, lo que es importante implementar en todos los procesos industriales en la actualidad.

## X. CONCLUSIONES

1. La reacción de saponificación y su competencia con la reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol en las condiciones de reacción estudiadas provoca la falta de separación de las fases en la mezcla de reacción utilizando exclusivamente etanol como fuente de alcohol.
2. Las condiciones óptimas para la reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol son: tiempo de reacción 25 minutos, proporción de etanol absoluto/metanol 62.14:37.86, temperatura de reacción: 56 ° C y concentración de catalítico 1.0% KOH (g KOH/ 100 ml aceite)
3. La obtención de biodiesel a partir de las condiciones de reacción optimizadas en este trabajo es una propuesta menos dañina hacia el medio ambiente en comparación con la ruta tradicional que utiliza exclusivamente metanol.

## **XI. RECOMENDACIONES**

1. Estudiar o desarrollar catalizadores que permitan la transesterificación de aceite vegetal utilizando exclusivamente etanol.
2. Realizar estudios para el aprovechamiento de la glicerina obtenida como subproducto de la reacción de transesterificación.
3. Realizar estudios de otras reacciones de transesterificación utilizando otros alcoholes que provengan de fuentes agrícolas o renovables.
4. Desarrollar otros métodos de análisis en espectroscopia UV/VIS para el análisis de glicerina que sean menos trabajosos y que utilicen sustancias menos tóxicas y contaminantes.

## XII. REFERENCIAS

1. Biodiesel Association of Australia. Biodiesel Fact Sheet [en línea]: <<http://www.biodiesel.org.au/>> [Consulta: 25 agosto 2005]
2. Journey to forever. Make your own biodiesel [en línea] <[http://journeytoforever.org/Makeyourownbiodiesel-page2Journey to Forever.htm](http://journeytoforever.org/Makeyourownbiodiesel-page2Journey%20to%20Forever.htm)> [consulta: 12 septiembre 2005]
3. Biodiesel, una alternativa de combustión limpia y eficiente. [en línea] Barramedasoft Corporation. <<http://www.barrameda.com.ar/noticias/jun03/biodie01.htm>> [Consulta: 03/06/2005]
4. Eco2site. Biodiesel en el Mundo. [en línea] <<http://www.eco2site.com/informes/biodiesel-m.asp>> [Consulta: 25 agosto 2005]
5. Clarín Digital y Publicaciones de Internet extraídas de <http://www.biodiesel.com.ar>. EL BIODIESEL [en línea]. <<http://www.panoramaenergetico.com/archivo%20de%20combustibles%20ecologicos/nota%20principal%20biodiesel%20espanol.htm>> [consulta:25 agosto 2005]
6. Ballesteros, M. Biocombustibles para el transporte. [en línea]: Producción Y Utilización De Biocarburantes. <<http://www.agroinformacion.com/leer-articulo.aspx?not=131>> [consulta: 13 septiembre 2005]
7. Carlstein, R.G. El Biodiesel como solución energética [en línea] <<http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodisel.htm>> [consulta: 03/06/2005]
8. Yusuf Ali & M. A. Hanna. 1994. ALTERNATIVE DIESEL FUELS FROM VEGETABLE OILS. Bioresource Technology. (EUA). (50): 153-163.
9. World Resources Institute. Energy and Resources—Guatemala. [en línea] Country Profiles. <[http://earthtrends.wri.org/pdf\\_library/country\\_profiles/eco\\_cou\\_320.pdf](http://earthtrends.wri.org/pdf_library/country_profiles/eco_cou_320.pdf)> [Consulta: 01 septiembre 2005]

10. Morrison, R. Boyd, R. 1998. QUÍMICA ORGÁNICA. Trad. Zugazagoitia, R., Fiedler, P. 5° edición. México. Addison Wesley Longman de México, S.A. de C.V. 1474 p.
11. Zhang, Y. et. al. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil 1. Process design and technological assessment. Bioresource Technology. (EUA). (89): 1–16.
12. Aleks Kac. The FOOLPROOF way to make Biodiesel [en línea] Free fatty acid to ester conversion. <[http://journeytoforever.org/biodiesel\\_aleksnew.html](http://journeytoforever.org/biodiesel_aleksnew.html)> [consulta: 1 septiembre 2005]
13. Fortuny, M.A. 2000. IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO POR CROMATOGRAFÍA DE GASES PARA LA DETERMINACIÓN DE ANTIOXIDANTES EN ACEITES COMESTIBLES. Guatemala. P. Tesis de Licenciada en Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Escuela de Química.
14. Agios F. et.al. Lípidos [en línea]: Autooxidación de ácidos grasos <http://www.fagro.edu.uy/bioquim/web/docencia/basico/lipidos.pdf> [consulta 23 octubre 2005]
15. Glicerina, [en línea] : <<http://journeytoforever.org/energiaweb/glicerina.htm>> [consulta: 3 agosto 2005]
16. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Biodiesel, Production. Base oils [en línea] [http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel#Base\\_oils](http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel#Base_oils)
17. Make your own biodiesel (contd.):[en línea] Deacidifying WVO. <[http://journeytoforever.org/biodiesel\\_make2.html#deacid](http://journeytoforever.org/biodiesel_make2.html#deacid)> [consulta: 13 Septiembre 2005]
18. Tecnología Ambiental. Glosario de términos. [en línea] <<http://www.tecnologiambiental.com/glosario/Glosario.php?letra=I>> [consulta: 3 septiembre 2005]
19. Sampieri, R. et. Al. 1998. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. 2ª edición. México. McGraw- Hill.. págs:158-165
20. Test Method For Determination of Total and Free Glycerol Ca 14-56. American Oil Chemist's Society. AOCS. 1997.
21. Pine, et.al. 1980. QUÍMICA ORGÁNICA. 2ª edición en español, traducido de 4ª ed en inglés. México. McGraw-Hill.

## **XIII. ANEXOS**

## Anexo 1:

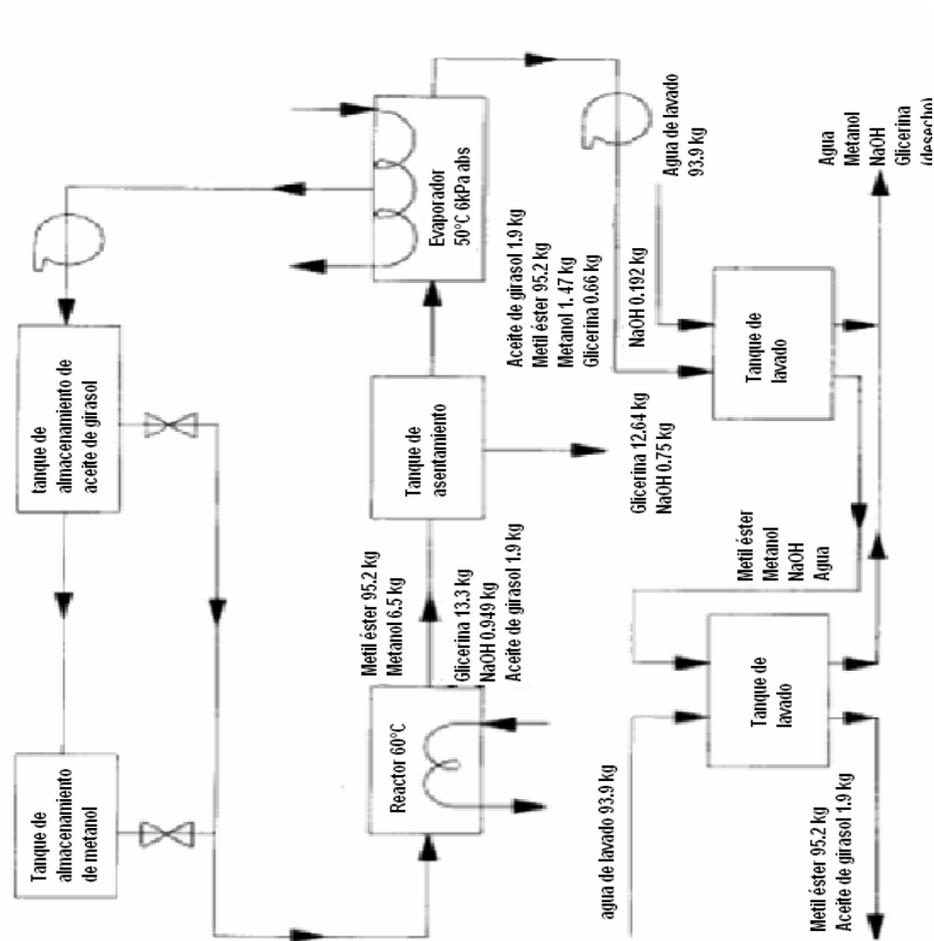
Comparación de biodiesel con otros combustibles alternativos

	<b>Favorables</b>	<b>No Favorables</b>
<b>Naftero</b>	Posibilidad de usar catalizadores para anular casi totalmente la contaminación.	Monóxido de carbono. Combustible no renovable. Bajo rendimiento
<b>Diesel</b>	No contamina con monóxido de carbono Económico. Bajo consumo.	Contaminantes pesados: Ácido sulfúrico, cadmio, aluminio, etc.
<b>Gas Natural</b>	Solo emite dióxido de carbono y agua, y muy bajo nivel de contaminantes como el CO y el N2O3. Económico.	Al ser un derivado del petróleo, sus reservas están acotadas, se calculan existencias solo hasta 2050. Bajo rendimiento
<b>Gas Licuado de petróleo</b>	Silencioso. Funciona también en nafteros con una mínima reforma. menor contaminación.	Derivado de petróleo, sus reservas están acotadas. Pocas estaciones de servicios que lo expendan.
<b>Etanol (Bioalcohol)</b>	Es renovable de origen agrícola. Puede obtenerse a partir de muchas clases de vegetales. Poco contaminante, emite menos compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos que la nafta	El motor a nafta necesita grandes cambios para ser adaptado. No sirve con temperaturas menores de 10° C. Bajo rendimiento. Costoso.
<b>BIOACEITES (vegetales)</b>	Proceden del cultivo por lo que son renovables. Muy poco contaminante.	Materia prima cara. Los motores convencionales de combustión necesitan grandes cambios para que funcionen con este tipo de aceite.
<b>BIODIESEL (aceite modificado ester metílico)</b>	Es su producción se obtiene harina de alto contenido en proteínas para la ganadería, procedente de los restos de las cáscaras de semillas. Reduce el humo negro y las emisiones en motores Diesel. No emite óxido de azufre responsable de la lluvia ácida.	El costo tres veces superior al diesel. Se debe cambiar el aceite con mas frecuencia porque se diluye en el carter. Necesita aditivos para arrancar a bajas temperaturas
<b>HIDROGENO</b>	No contamina, solo emite vapor de agua. puede ser usado tanto en motores de combustión como en los eléctricos. Alto rendimiento.	Tiene problemas técnicos de almacenamiento, se deben controlar su temperatura para evitar riesgos de explosión y los depósitos deben ser mas grandes

Fuente: EL BIODIESEL [en línea].

<<http://www.panoramaenergetico.com/archivo%20de%20combustibles%20ecologicos/nota%20principal%20biodiesel%20espanol.htm>> [consulta:25 agosto 2005]

## Anexo 2:

Esquema de producción de biodiesel con aceite de girasol y metanol

Fuente: Carlstein, R.G. El Biodiesel como solución energética [en línea] <<http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodisel.htm>> [consulta: 03/06/2005]

## Anexo 3:

Consumo de energía por fuente, 1999 (en miles de toneladas métricas equivalentes a petróleo)

	GUATEMALA	CENTROAMÉRICA Y EL CARIBE	EL MUNDO
Total combustibles fósiles	2,812	169,759	7,689,047
Carbón y productos de carbón	0	6,773	2,278,524
Petróleo crudo y gas natural	923	113,220	3,563,084
Gas natural	0	39,308	2,012,559
Nuclear	0	2,607	661,901
Hidroeléctrica	229	4,236	222,223
Renovables, no hidroeléctrica	3,053	28,821	1,097,889
Biomasa primaria sólida	3,053	22,586	1,035,139
Geotérmica	0	60	14,931
Solar	0	6,129	43,802
Eólica	0	10	1,748
Oleaje y marítima	0	0	53

Fuente: [http://earthtrends.wri.org/pdf\\_library/country\\_profiles/eco\\_cou\\_320.pdf](http://earthtrends.wri.org/pdf_library/country_profiles/eco_cou_320.pdf)

[Consulta: 01 septiembre 2005]

## ANEXO 4:

Procedimiento 14-56 de la AOCS (The American Oil Chemist's Society)

## 1. Preparación de reactivos:

- i. Solución de ácido peryódico: disolver 5.4g de ácido peryódico en 100 ml de agua destilada y agregar 1900 ml de ácido acético glacial, mezclando. Almacenar en la oscuridad y en un recipiente ámbar con sello de vidrio.
- ii. Solución de tiosulfato de sodio 0.1N: disolver 24.8 g de tiosulfato de sodio en un litro de agua destilada. Estandarizar pipeteando 25 ml de solución de dicromato de potasio hacia un erlenmeyer, agregar 5 ml de HCl [ ], 10 ml de solución de KI y mezclar. Dejar reposar por 5 minutos y agregar 5 ml de agua destilada. Titular con la solución de tiosulfato hasta un amarillo pálido, luego agregar 1-2 ml de solución de almidón y continuar la titulación hasta desaparición de color.
- iii. Solución de yoduro de potasio: disolver 150g de KI en 1 L y proteger de la luz.
- iv. Indicador de almidón: disolver 10g de una pasta homogénea de almidón en agua destilada fría, agregar rápidamente 1L de agua destilada en ebullición, mezclar rápidamente y dejar enfriar. Puede agregarse 1.25g/L de ácido salicílico para preservar la solución. Almacenar en temperaturas de 4-10°C.
- v. Solución estándar de dicromato de potasio 0.1 N: disolver 4.9035g de dicromato de potasio finamente pulverizado y previamente secado en 1L de agua destilada a 25°C.
- vi. KOH en etanol: disolver 40g de KOH en 1L de etanol al 95% a 25°C.

## 2. Procedimiento para glicerina total

- i. Pesar por duplicado con una precisión de  $\pm 0.1$  mg en un erlenmeyer la cantidad indicada en la Tabla siguiente:

*Tamaño de muestra para porcentaje aproximado de glicerina total:*

Glicerina total (%)	Tamaño aprox. de muestra (g)	Exactitud en peso (g)	mL de KOH alcohólico	mL de CHCl <sub>3</sub>
10-40	2	$\pm 0.001$	50	99
5-20	4	$\pm 0.003$	50	96
9-8	10	$\pm 0.01$	100	91

Fuente: método 14-56 de la AOCS, "Total, Free and Combined Glycerol"

- ii. Agregar la cantidad indicada de KOH alcohólico, según la Tabla anterior, colocar un condensador y hervir por 30 min.
- iii. Agregar la cantidad indicada en la Tabla 7 de cloroformo a un recipiente de 1L. luego, agregar 25 ml de ácido acético.
- iv. Remover el erlenmeyer de saponificación del calor, lavar el condensador con agua destilada, transferir cuantitativamente y lavar con 500 ml de agua destilada.
- v. Agitar el recipiente vigorosamente por 30-60 seg.
- vi. Agregar agua destilada, agitar e invertir hasta que se separe la fase acuosa y de cloroformo

- vii. Pipetear 50 ml de ácido peryódico en beackers de 400 ml y preparar dos blancos agregando 50 ml de agua destilada.
- viii. Pipetear 50 ml de la fase acuosa obtenida en el paso 6 en un beacker con 50 ml de ácido peryódico y mezclar. Cubrir con vidrio de reloj y dejar reposar por 30 minutos. Nota: si la solución acuosa contiene materia suspendida, filtrar antes de pipetearla.
- ix. Agregar 20 ml de solución de KI, mezclar y dejar reposar por 1 minuto (no más de 5 min.) evitando luz brillante o luz solar directa.
- x. Diluir la muestra aproximadamente con 200 ml de agua destilada y titular con tiosulfato de sodio estándar hasta que el color café esté casi desaparecido. Agregar 2 ml de solución de almidón y continuar la titulación hasta que desaparezca el color azul
- xi. Tomar el volumen de la bureta
- xii. Determinar los blancos como en el paso ix y x

### 3. Procedimiento para glicerina libre:

- i. Pesar aproximadamente  $10 \pm 0.01g$  de muestra
- ii. Fundir la muestra y verter en un recipiente volumétrico de 1L, lavar con 90 ml de cloroformo medidos con bureta.
- iii. Agregar 500ml de agua destilada, mezclar por 30-60 seg., separando las dos fases.
- iv. Pipetear 50 ml de ácido peryódico y preparar un blanco
- v. Pipetear 100 ml de la fase acuosa obtenida en el paso iii y verter en el recipiente con ácido peryódico. Mezclar vigorosamente y dejar reposar por 30 min.
- vi. Agregar 20 ml de solución de KI, mezclar y dejar reposar por 1 min. No dejar con luz directa
- vii. Diluir con 200 ml de agua destilada y titular con tiosulfato 0.1N hasta color amarillento, luego agregar solución de almidón y titular hasta desaparición de color.
- viii. Tomar volumen de la bureta
- ix. Determinar el blanco con el mismo procedimiento que las muestras

### 4. Cálculos: Reportar lo más cercano a 0.1%

Glicerina total (%) =  $[(B-S) \times N \times 2.302]/W$ , en donde

S= volumen de titulante de la muestra= particular para cada muestra

B= volumen de titulante del blanco = 48.8 ml

N= normalidad del tiosulfato de sodio = 0.101 N

W= peso de la muestra representada por

$W = \text{masa de la muestra}^a \times \text{ml de muestra}^b/900$

<sup>a</sup> : del procedimiento de glicerina total, paso i = particular para cada muestra

<sup>b</sup> : del procedimiento de glicerina total, Anexo 4, sección 3.iv = 50 ml para todas las muestras

Fuente: Test Method For Determination of Total and Free Glycerol Ca 14-56. American Oil Chemist's Society. AOCS. 1997.

ANEXO 5: Datos para obtención de porcentajes de rendimiento en las reacciones para la optimización de las variables de tiempo, proporción de etanol absoluto/ metanol, temperatura y concentración de catalítico de la transesterificación de aceite vegetal de girasol

	S1*	S2	PRO	A	W	** % GT	%R	% R "	
GLICERINA TOTAL (aceite vegetal de girasol)	45,60	45,55	45,58	2,10	0,12	6,4	promedio		
	45,80	45,80	45,80	1,96	0,11	6,4	6.4 = 100% rendimiento		
GLICERINA LIBRE (aceite vegetal de girasol)	48,80	48,80	48,80	10,04	0,56	0,00	Promedio		
	48.75	48,80	48,80	10,15	0,56	0,00	0.00		
5.1. Reacción de transesterificación de aceite vegetal de girasol utilizando etanol absoluto y metanol a distintas proporciones									
100/0	NO SEPARACIÓN							0	
0	34,50	35,00	34,75	10,10	0,56	5,8	90,5		
50	36,20	36,10	36,15	10,20	0,57	5,2	80,7		
5.2. Optimización de la variable de Tiempo de Reacción de la transesterificación de aceite vegetal de girasol									
<i>minutos</i>									
10	42,60	42,50	42,55	9,99	0,56	2,6	40,9	2,6	
17	39,50	39,40	39,45	10,30	0,57	3,8	59,1	2,0	
20	38,70	38,90	38,80	10,01	0,56	4,2	65,0	4,6	
23	36,60	36,50	36,55	10,10	0,56	5,1	78,9	0,9	
25	36,20	36,10	36,15	10,20	0,57	5,2	80,7	0,0	
28	36,30	36,40	36,35	10,04	0,56	5,2	80,7	0,0	
30	36,40	36,45	36,43	9,98	0,55	5,2	80,7	0,0	
40	36,55	36,65	36,60	9,84	0,55	5,2	80,7	0,0	
50	36,00	36,00	36,00	10,32	0,57	5,2	80,7		
5.3. Optimización de la variable Proporción de Etanol Absoluto/ Metanol en la transesterificación de aceite vegetal de girasol									
% etanol absoluto									
0	34,50	35,00	34,75	10,10	0,56	5,8	90,5	-0,2	
50	36,20	36,10	36,15	10,20	0,57	5,2	80,7	-0,2	
60	36,65	36,65	36,65	9,99	0,56	5,1	79,2	-0,3	
62,14	36,70	36,70	36,70	10,03	0,56	5,0	78,5	-4,4	
64,29	38,10	38,05	38,08	10,12	0,56	4,4	69,0	-32,2	
66,43	NO SEPARACIÓN							0	
67,86	NO SEPARACIÓN							0	
70	NO SEPARACIÓN							0	
80	NO SEPARACIÓN							0	
90	NO SEPARACIÓN							0	
100	NO SEPARACIÓN							0	

Continúa...

... continuación Anexo 5

	S1	S2	PRO	A	W	** % GT	%R	% R "
5.4.Optimización de la variable de Temperatura en la transesterificación de aceite vegetal de girasol								
25	NO SEPARACIÓN						0	
30	40,20	40,50	40,35	10,02	0,56	3,5	54,9	0,6
40	39,50		39,50	10,01	0,56	3,9	60,5	1,8
50	36,70	36,70	36,70	10,03	0,56	5,0	78,5	1,3
52	36,35	36,30	36,33	10,00	0,56	5,2	81,2	0,9
54	36,00	36,10	36,05	10,01	0,56	5,3	82,9	1,7
56	35,50	35,55	35,53	10,00	0,56	5,6	86,4	-1,1
58	35,90	35,80	35,85	10,00	0,56	5,4	84,3	
60	NO SEPARACIÓN						0,00	
63	NO SEPARACIÓN						0,00	
65	NO SEPARACIÓN						0,00	
5.5. Optimización de la variable Concentración de Catalítico de la transesterificación de aceite vegetal de girasol								
0,50	36,10	36,00	36,05	10,05	0,56	5,3	82,6	12,1
0,60	35,80	35,90	35,85	10,06	0,56	5,4	83,8	26,2
0,70	35,50	35,55	35,53	10,00	0,56	5,6	86,4	14,4
0,80	35,40	35,45	35,43	9,91	0,55	5,6	87,8	3,2
0,90	35,20	35,20	35,20	10,04	0,56	5,7	88,2	0,3
1,00	35,30	35,20	35,25	10,00	0,56	5,7	88,2	0,0
1,50	35,25	35,25	35,25	10,00	0,56	5,7	88,2	
5.6. Reacciones con etanol 95%/ metanol y las variables optimizadas de tiempo, temperatura y concentración de catalítico en la transesterificación de aceite vegetal de girasol								
1	NO SEPARACIÓN							
2	NO SEPARACIÓN							
3	NO SEPARACIÓN							
4	NO SEPARACIÓN							

Cálculos y claves para cada columna:

S = volumen tiosulfato de sodio en la titulación

PRO= promedio de S

W= peso de la muestra representada por

$$W = \text{masa de la muestra}^a \times \text{ml de muestra}^b / 900$$

<sup>a</sup>: del procedimiento de glicerina total, paso i = particular para cada muestra

<sup>b</sup>: del procedimiento de glicerina total, Anexo 4, sección 3.iv = 50 ml para todas las muestras

% R = porcentaje de rendimiento de la reacción de transesterificación

% R " = segunda derivada

Para el cálculo de glicerina en cada muestra se tomó en cuenta:

$$GT = GL + GRXN, \quad GL = 0 \quad GT = GRXN$$

En donde:

GT: glicerina total en la muestra, GL: glicerina libre en el aceite

GRXN: glicerina formada en la reacción de transesterificación

Fuente: datos obtenidos experimentalmente, Test Method For Determination of Total and Free Glycerol Ca 14-56. American Oil Chemist's Society. AOCS. 1997.

---

BR. ANA CATALINA PALACIOS OSORIO  
CARNÉ: 200012419  
CARRERA: QUÍMICA

---

M.A. IDOLLY NEFERTITI CARRANZA FORKEL  
ASESORA

---

LIC. JHONI ÁLVAREZ  
DIRECTOR  
ESCUELA DE QUÍMICA