Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A ESCALA PLANTA PILOTO A PARTIR DE ACEITE OBTENIDO COMO SUBPRODUCTO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HARINAS PROVENIENTES DEL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DEL BENEFICIADO DEL POLLO

Erick Roberto Orellana Sandoval
Asesorado por la Inga. Telma Maricela Cano Morales y
el Ing. Mario José Mérida Meré

Guatemala, noviembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A ESCALA PLANTA PILOTO A PARTIR DE ACEITE OBTENIDO COMO SUBPRODUCTO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HARINAS PROVENIENTES DEL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DEL BENEFICIADO DEL POLLO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ERICK ROBERTO ORELLANA SANDOVAL
ASESORADO POR LA INGA. TELMA MARICELA CANO MORALES Y
EL ING. MARIO JOSÉ MÉRIDA MERÉ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galvan Estrada
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeseña
EXAMINADOR	Ing. Victor Herbert de León Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A ESCALA PLANTA PILOTO A PARTIR DE ACEITE OBTENIDO COMO SUBPRODUCTO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HARINAS PROVENIENTES DEL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DEL BENEFICIADO DEL POLLO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de mayo de 2012.

Erick Roberto Orellana Sandoval

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 31 de Octubre de 2012

Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdez
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente.

Ingeniero Monzón:

Por medio de la presente HACEMOS CONSTAR que hemos revisado y dado nuestra aprobación al informe final del trabajo de graduación titulado **"Producción de biodiesel a escala planta piloto a partir de aceite obtenido como subproducto en el proceso de producción de harinas provenientes del aprovechamiento de los desechos del beneficiado del pollo"**, del estudiante de Ingeniería Química Erick Roberto Orellana Sandoval quien se identifica con el carné número 2005-16030.

Sin otro particular nos suscribimos de usted.

Atentamente,

Ing. Qco. Mario José Mérida Meré
Coordinador
Laboratorio de Investigación
de Extractos Vegetales –LIEXVE-
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE EXTRACTOS VEGETALES - LIEXVE -
COORDINACIÓN
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA

Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales
Directora
Centro de Investigaciones de Ingeniería / CII
Asesora

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
DIRECCION

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 16 de noviembre de 2012
Ref. EIQ.TG-IF.055.2012

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-**023**-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Erick Roberto Orellana Sandoval**

Identificado con número de carné: **2005-16030**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A ESCALA PLANTA PILOTO A PARTIR DE ACEITE OBTENIDO COMO SUBPRODUCTO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HARINAS PROVENIENTES DEL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DEL BENEFICIADO DEL POLLO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por los Ingenieros Químicos: **Telma Maricela Cano Morales y Mario José Mérida Meré.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA
AREA TRABAJOS DE GRADUACION
FIUSAC

Ing. Víctor Manuel Monzón
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2009 - 2012

ACAAI
Agencia Centroamericana de Acreditación de Programas de Arquitectura y de Ingeniería

Ref.EIQ.TG.226.2012

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **ERICK ROBERTO ORELLANA SANDOVAL** titulado: **"PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A ESCALA PLANTA PILOTO A PARTIR DE ACEITE OBTENIDO COMO SUBPRODUCTO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HARINAS PROVENIENTES DEL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DEL BENEFICIADO DEL POLLO** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

FACULTAD DE INGENIERÍA DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA U.S.A.C.

Guatemala, Noviembre de 2012

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala

Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.631.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A ESCALA PLANTA PILOTO A PARTIR DE ACEITE OBTENIDO COMO SUBPRODUCTO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HARINAS PROVENIENTES DEL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DEL BENEFICIADO DEL POLLO**, presentado por el estudiante universitario **Erick Roberto Orellana Sandoval**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 26 de noviembre de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser siempre el guía de mí camino, permitirme obtener una meta más y por darme la sabiduría necesaria para alcanzar el éxito.
Mis padres	Byron Orellana y Gulnara Sandoval, gracias por enseñarme a luchar por mis sueños, y por el esfuerzo que han hecho para alcanzar esta meta.
Mis hermanos	Byron Rafael y Sergio Omar Orellana Sandoval, por su cariño, apoyo y por acompañarme en todo momento.
Mi novia	Alejandra Espina, por su cariño y el apoyo incondicional brindado en todo momento.
Mis amigos	Humberto Preti, Eliseo y Edson Salazar, Daniel Ortiz, Marlon y Juan José Barrera, Roberto González, Omar y Juan Orellana, Luis Andrade, Ricardo Sandoval, Luis Rizzo, Sergio Suram, José Lira, José Fuentes, Alejandro Díaz, Mauricio Rivera, Juan Carlos y Luis Vivar, Pedro García, Aroldo Mazariegos, José Herincx, José Palacios, Rafael Álvarez, Luis López, amigos en general, por la amistad brindada y compartir momentos de alegría y éxito.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme el don de la vida y estar a mi lado en todo momento.
Mis padres	Por todos los buenos consejos y toda su enseñanza a lo largo de mi vida.
Mis asesores	Inga. Química Telma Maricela Cano e Ing. Químico Mario Mérida, por compartir sus conocimientos y todo su entusiasmo y dedicación durante la investigación.
Ingenieros	César García, por el apoyo brindado durante la elaboración de esta investigación. Victor Monzón y Otto Raúl de León, por el apoyo brindado durante el transcurso de la carrera.
QF. Ana Luisa Mendizábal	Por su valiosa colaboración para la elaboración de esta investigación.
Personal del Laboratorio LIEXVE	Inga. Cynthia Ortiz, Edwin Saravia, Wagner Alonzo y Lee Hernández, por el agradable ambiente de trabajo y por todo su apoyo brindado a esta investigación.

Facultad de Ingeniería	Por todos los conocimientos adquiridos a lo largo de mi carrera profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme sus puertas y permitir formarme como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTA DE SÍMBOLOS IX
GLOSARIO XI
RESUMEN XIII
OBJETIVOS/HIPÓTESIS XV
INTRODUCCIÓN XIX

1. ANTECEDENTES 1

2. MARCO TEÓRICO 5
2.1. Combustibles 5
2.2. Combustibles fósiles 6
2.2.1. Petróleo 6
2.2.2. Diesel 7
2.3. Biocombustibles 7
2.3.1. Biodiesel 8
2.4. Métodos de producción de biodiesel 10
2.4.1. Proceso de producción por lotes 10
2.4.2. Proceso supercrítico 11
2.4.3. Reactor ultrasónico 11
2.4.4. Método de microondas 12
2.4.5. Usando enzimas lipasas 12
2.5. Materias primas y productos de la producción de biodiesel 12
2.5.1. Aceites y grasas de origen animal 13
2.5.2. Propiedades fisicoquímicas de grasas y aceites 13

2.5.2.1. Índice de acidez 14
2.5.3. Lípidos 15
2.5.4. Ácido graso 16
2.5.5. Acilglicérido 16
2.5.6. Alcohol 17
2.5.6.1. Metanol 18
2.5.6.2. Etanol 18
2.5.7. Glicerina 18
2.6. Esterificación 19
2.7. Transesterificación 20
2.7.1. El proceso de transesterificación 21
2.8. Especificaciones del biodiesel 24
2.8.1. Punto de inflamabilidad, °C 24
2.8.2. Contenido de azufre total, porcentaje de masa 24
2.8.3. Corrosión tira de cobre, 3 horas a 50 °C 25
2.8.4. Calor de combustión, MJ/kg 25
2.8.5. Gravedad API, °API 25
2.8.6. Viscosidad cinemática, 40 °C, mm^2/s 26
2.8.7. Ceniza, porcentaje de peso 26
2.8.8. Índice de cetano 26
2.8.9. Agua y sedimentos, porcentaje de volumen 27
2.8.10. Destilación, 760 mm Hg con base a recuperado, °C 27

3. DISEÑO METODOLÓGICO 29
3.1. Variables 29
3.2. Delimitación de campo de estudio 31
3.3. Recursos humanos disponibles 33
3.4. Recursos materiales disponibles 33

3.5. Técnica cuantitativa o cualitativa 35
3.5.1. Técnica cualitativa 35
3.5.2. Técnica cuantitativa 36
3.6. Recolección y ordenamiento de la información 38
3.6.1. Procedimiento para la producción de biodiesel a base de aceite animal 40
3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información 46
3.8. Análisis estadístico 46

4. RESULTADOS 49

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS 63

CONCLUSIONES 73
RECOMENDACIONES 75
BIBLIOGRAFÍA 77
APÉNDICES 81
ANEXO 113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Tipos de acilglicéridos 17
2. Reacción de esterificación 19
3. Mecanismo de reacción de esterificación en medio ácido 20
4. Reacción de transesterificación 21
5. Mecanismo de reacción de transesterificación en medio básico 23
6. Diagrama de recolección y ordenamiento de los datos para la reacción con metanol 39
7. Diagrama de recolección y ordenamiento de los datos para la reacción con etanol 39
8. Procedimiento para la producción de biodiesel 45
9. Relación entre la cantidad de NaOH utilizado para neutralizar las muestras y el tiempo de reacción de esterificación 51
10. Relación entre la cantidad de aguas residuales del proceso de esterificación y el tiempo de reacción 51
11. Relación del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite y el tiempo de reacción de esterificación utilizando metanol como reactivo 53
12. Relación del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite y el tiempo de reacción de esterificación utilizando etanol como reactivo 53
13. Relación del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite y el tiempo de reacción de esterificación 54
14. Relación entre el rendimiento de reacción de esterificación y el tiempo de reacción de esterificación 54

15. Relación entre la cantidad de agua residual obtenida del proceso de lavado y el tiempo de reacción..... 57
16. Relación entre la cantidad de agua residual obtenida de la producción de biodiesel y el tiempo de reacción 57
17. Relación entre el porcentaje de recuperación de biodiesel y el tiempo de reacción..... 58
18. Relación entre el biodiesel obtenido y el tiempo de reacción 58

TABLAS

I. Perfil de ácidos grasos de grasas animales 14
II. Acidez aproximada de algunas materias primas baratas 15
III. Cuadro de análisis de variables..... 31
IV. Cristalería utilizada durante la etapa experimental..... 33
V. Equipo utilizado durante la etapa experimental 34
VI. Reactivos y materia prima 35
VII. Distribución y ordenamiento de lotes escogidos al azar 37
VIII. Relación entre el porcentaje de ácidos grasos libres y la concentración de la solución 42
IX. Pruebas de los efectos inter-sujetos..... 46
X. Medias marginales..... 47
XI. DHS de Tukey[a,b] 47
XII. Resultados obtenidos en la determinación del porcentaje de ácidos grasos libres en las muestras de aceite residual..... 49
XIII. Resultados obtenidos del proceso de esterificación ácida, variando el alcohol reactante y el tiempo de reacción 50
XIV. Resultados obtenidos de la determinación del porcentaje de AGL al finalizar la etapa de esterificación del aceite..... 52

XV. Lavado del biodiesel obtenido de esterificación ácida neutralizado 55
XVI. Tabla resumen de producción de biodiesel..... 56
XVII. Resultados obtenidos del proceso de esterificación ácida, variando el alcohol reactante a nivel planta piloto..... 59
XVIII. Resultados obtenidos de la determinación de % AGL al finalizar la etapa de esterificación del aceite a nivel planta piloto..... 59
XIX. Lavado del biodiesel obtenido de esterificación ácida neutralizado a nivel planta piloto 60
XX. Tabla resumen de producción de biodiesel a nivel planta piloto 60
XXI. Resumen del análisis en cromatografía de gases efectuado al biodiesel utilizando metanol 61
XXII. Resumen del análisis en cromatografía de gases efectuado al biodiesel utilizando etanol 61
XXIII. Resultados de análisis fisicoquímicos del aceite residual y los biodiesel a partir de metanol y etanol..... 62

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AGL	Ácidos grasos libres
°API	Grados API (Gravedad API)
°C / °F	Grados centígrados / grados Fahrenheit
Kg/m^3	Kilogramo por metro cúbico
Máx	Máximo
Mg/kg	Miligramos por kilogramo de muestra
Mm^2/s	Milímetro cuadrado por segundo
Mín	Mínimo
Min	Minuto
%	Porcentaje

GLOSARIO

Ácidos grasos	Grupo de ácidos orgánicos, con un único grupo carboxilo (RCOOH), entre los que se encuentran los ácidos saturados (hidrogenados) de cadena lineal producidos por la hidrólisis de las grasas.
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
Biocombustible	Cualquier combustible sólido, líquido o gaseoso producido a partir de materia orgánica.
Brown greases	En español, grasas grises, se refiere a las grasas que contienen un porcentaje de ácidos grasos libres mayor a 40%.
Coeficiente de distribución	Relación entre la proporción de soluto en el extracto y en el refinado.
Concentración	Cantidad de soluto por unidad de volumen o masa de disolvente o de solución.
Densidad	Peso específico.
Éster	Compuesto formado (junto con agua) por la reacción de un ácido y un alcohol.

Esterificación	Proceso unitario que consiste en la producción de un éster por la reacción de un alcohol con un ácido.
Plantas oleaginosas	Plantas que de su semilla o fruto puede extraerse aceite, en algunos casos comestibles o de uso industrial.

RESUMEN

El presente estudio es una investigación en la producción de biodiesel a escala laboratorio y a escala planta piloto en las instalaciones del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE) sección Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, utilizando como materia prima aceite FH5 obtenido como subproducto en el proceso de producción de harinas provenientes de los desechos del beneficiado del pollo, proporcionado por la empresa Avícola Villalobos, S.A. realizando variaciones en el tipo de alcohol y el tiempo de reacción a utilizar para el proceso de esterificación.

La empresa Avícola Villalobos, S.A., con el fin de aprovechar al máximo los desechos del beneficiado del pollo, dando un valor agregado a éstos, produce harinas, las cuales son empleadas para la producción de concentrados para animales, de donde se obtiene el aceite residual como subproducto, el cual es utilizado como aceite combustible en las calderas de la empresa.

El aceite residual es de color oscuro y de olor característico desagradable, el cual contiene un alto porcentaje de acidez lo que dificulta en gran medida la producción de biodiesel por los métodos convencionales, por lo que se utilizó el proceso de esterificación en medio ácido, obteniendo los mejores resultados al aumentar el tiempo de reacción. Los resultados obtenidos demuestran un mayor rendimiento en la reacción de esterificación utilizando metanol alcanzando un rendimiento de 97%, en comparación a cuando se utilizó etanol, donde se alcanzó un rendimiento de 85%, en la reducción de ácidos grasos libres en el aceite residual.

En la producción de biodiesel mediante esterificación ácida se obtuvieron buenos resultados, pues se alcanzaron rendimientos de recuperación de biodiesel que van desde el 66,33% para un tiempo de reacción de treinta minutos hasta alcanzar un 96,33% para un tiempo de reacción de noventa minutos, para las pruebas efectuadas a nivel laboratorio. En las pruebas efectuadas a escala planta piloto se alcanzaron rendimientos de recuperación de biodiesel de 80% y 92,50% de acuerdo al aceite residual utilizado al inicio del proceso de esterificación.

Se enviaron muestras del aceite residual y de biodiesel producido utilizando metanol y etanol, al Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas, donde se determinaron las propiedades fisicoquímicas de cada una de las muestras según normativas ASTM y luego fueron analizadas obteniendo buenos resultados.

OBJETIVOS

General

Evaluar la producción de biodiesel a partir del aceite obtenido como subproducto en el proceso de fabricación de harinas provenientes de los desechos del beneficiado del pollo a escala planta piloto.

Específicos

1. Caracterizar fisicoquímicamente el aceite obtenido como subproducto del beneficiado del pollo, identificado como FH5 en la producción de harinas en la empresa Avícola Villalobos, S.A. en Escuintla, como combustible según Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

2. Evaluar la producción de biodiesel a partir de la reutilización del aceite obtenido como subproducto del beneficiado del pollo, en la empresa Avícola Villalobos S.A.

3. Caracterizar fisicoquímicamente el biodiesel obtenido de la reutilización del aceite obtenido como subproducto del beneficiado del pollo, en la empresa Avícola Villalobos S.A., cumpliendo con el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

4. Comparar las características fisicoquímicas obtenidas del aceite y el biodiesel obtenido y determinar sus diferencias significativas.

5. Determinar el porcentaje de recuperación de biodiesel a partir de la producción de biodiesel provenientes del aceite obtenido como subproducto del beneficiado del pollo variando el tipo de alcohol (metanol o etanol) y el tiempo de agitación (30, 60, 90 minutos) en el proceso de esterificación.

6. Determinar el porcentaje de recuperación de subproductos a partir de la producción de biodiesel proveniente del aceite obtenido como subproducto del beneficiado del pollo variando el tipo de alcohol (metanol o etanol) y el tiempo de agitación (30, 60, 90 minutos) en el proceso de esterificación.

HIPÓTESIS

El aceite obtenido como subproducto en el proceso de producción de harinas provenientes del aprovechamiento de los desechos del beneficiado de pollo, puede ser utilizado como materia prima en la producción de biodiesel mediante el proceso de esterificación ácida a escala planta piloto, determinando su rendimiento variando el tiempo de mezclado del aceite con metanol o etanol.

Hipótesis nula

H_o: no existen diferencias significativas en las características fisicoquímicas del biodiesel producido con metanol y el biodiesel producido con etanol, ambos a escala planta piloto.

Hipótesis alternativa

H_a: existen diferencias significativas en las características fisicoquímicas del biodiesel producido con metanol y el biodiesel producido con etanol, ambos a escala planta piloto.

INTRODUCCIÓN

La investigación en la producción de biodiesel se realizo a partir del aceite residual obtenido como subproducto en el proceso de producción de harinas, provenientes del aprovechamiento de los desechos del beneficiado del pollo de la empresa Avícola Villalobos S.A. Durante la producción de biodiesel se estudiaron dos variables: una de ellas fue el tipo de alcohol a utilizar en la reacción variando entre metanol y etanol y en la otra variable el tiempo de reacción variando en treinta, sesenta y noventa minutos.

El aceite residual es de color pardo oscuro con un olor característico y a altas temperaturas resulta desagradable, es un aceite combustible el cual es utilizado como combustible en las calderas de la empresa en donde es originado, solidifica a temperaturas por debajo del ambiente y durante el estudio se determinó que posee un alto contenido de ácidos grasos libres equivalente al 82%, por lo que fue necesario trabajar la producción de biodiesel por el método de esterificación ácida.

La producción de biodiesel creció a medida en que aumentó el tiempo de reacción durante el proceso de esterificación ácida, y se obtuvieron mejores resultados después de noventa minutos de reacción; alcanzando para el biodiesel obtenido a partir de metanol, un 97% de rendimiento en la reacción de esterificación, reduciendo el porcentaje de ácidos grasos libres hasta un 2,57%, obteniendo un porcentaje de recuperación de 77,33% y para el biodiesel obtenido a partir de etanol, un 85% de rendimiento en la reacción de esterificación, reduciendo el porcentaje de AGL hasta un 12,22%, obteniendo un porcentaje de recuperación de 96,33% con base en el aceite residual inicial.

La reducción del porcentaje de ácidos grasos libres en función del tiempo de reacción en el aceite residual mediante el proceso de esterificación se ajustó a modelos matemáticos exponenciales negativos, los cuales cuentan con un coeficiente de correlación múltiple de 0,97 para el biodiesel producido utilizando metanol y 0,89 para el biodiesel producido utilizando etanol.

El aceite esterificado fue neutralizado con una solución de hidróxido de sodio y luego lavado con una relación de 10:2 con agua con base en la mezcla neutralizada, luego se separó el agua residual y el biodiesel. El biodiesel obtenido de cada uno de los lotes fue lavado en dos ciclos, utilizando una relación 10:1 de biodiesel:agua para eliminar impurezas presentes obteniendo un biodiesel con una mejor calidad.

Las muestras de biodiesel producido por los métodos de esterificación en medio ácido, y el aceite residual proveniente del beneficiado del pollo fueron trasladadas a las instalaciones de los laboratorios técnicos del Ministerio de Energía y Minas en donde se determinaron sus propiedades fisicoquímicas, para poder caracterizarlo, determinando que la viscosidad cinemática, el porcentaje en masa de ceniza y el porcentaje en volumen de agua y sedimentos en el aceite residual; que la viscosidad cinemática, la destilación y el porcentaje en masa de ceniza en el biodiesel producido a partir de metanol; y el punto de inflamabilidad, la viscosidad cinemática y el porcentaje en masa de ceniza en el biodiesel producido a partir de etanol están por arriba de lo permitido en la normativa establecida por el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07.

1. ANTECEDENTES

Actualmente, la producción de combustibles alternativos de los fósiles a partir de sustancias renovables, ha aportando una materia prima económica en los últimos tiempos, causando gran interés, a escala mundial, la elaboración de biodiesel es una de estas alternativas, actualmente los países con mayor producción de biodiesel son: Brasil, Estados Unidos, Alemania, Francia, entre otros como: Argentina, España e Italia.

En Guatemala, el biodiesel empezó a desarrollarse con proyectos como el de la Municipalidad de La Antigua Guatemala y la embajada de Suiza en Guatemala, con el objetivo de implementar un proceso de energía renovable en la ciudad colonial, el título del proyecto es: Reciclaje de aceite quemado y su uso como biodiesel (B-20, B-50, B-100) en los vehículos de grupos objetivo, Guatemala, Centro América, en el 2009 participaban 190 restaurantes de Antigua Guatemala y de la ciudad capital para proveer la materia prima y permitir así el reciclaje del aceite quemado, produciendo alrededor de 320 litros cada hora a un ritmo de cinco tandas diarias en una maquinaria adaptada para la fabricación de grandes cantidades.

En la Universidad de San Carlos de Guatemala se han elaborado investigaciones realizando tesis relacionadas con el tema de biocombustibles, por ejemplo en el 2005, el Ing. Herber Roberto Romero Erazo realizó la investigación de tesis titulada: Elaboración, análisis y comparación de biodiesel a partir de aceite de palma usado (*Elaeis Guineensis*) mediante dos procesos, a nivel planta piloto.

En la Universidad Rafael Landívar se elaboró una investigación por parte de la Facultad de Ingeniería, realizando una tesis en el Departamento de Ingeniería Química Industrial, realizada en el 2008, por el Ing. José Rodrigo Cuéllar Martínez, titulada: Diseño de un proceso para producir biodiesel a partir de grasa de cerdo para su utilización en vehículos de distribución.

La Asociación de Combustibles Renovables en Guatemala (ACR), describe a la industria del biodiesel como reciente en el país, por lo que la producción aún se realiza a pequeña escala especialmente para autoconsumo en motores estacionarios o vehículos que usan diesel, Las materias primas para la producción local pueden ser la palma africana, *Jatropha Curcas* (piñón), *Reicinus Communis* (higuerillo), aceites reciclados y grasas animales.

Sin embargo, en otras partes del mundo existe el interés por el tema de producción de biodiesel utilizando aceite de origen animal como lo demuestra un equipo de ingenieros químicos de la Universidad de Arkansas, en Estados Unidos en enero del 2008, quienes desarrollaron un método para convertir la grasa de pollo en combustible biodiesel; el biodiesel lo consiguieron usando metanol supercrítico en el proceso de producción, obteniendo biodiesel con un rendimiento del 89%, a una temperatura de 325 ºC con una proporción molar de cuarenta a uno en lo que se refiere a la cantidad de metanol aplicada.

En Brasil, la empresa Intech Engenharia & Medio Ambiente comenzó a producir biodiesel con base en la grasa de pollo en octubre del 2006, en Santa Catarina al sur de este país.

Para desarrollar el método de número de acidez que se realizara en el proceso de producción de biodiesel se propone el presentado por Karen Vásquez Villeda, en su trabajo de graduación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala en mayo del 2012, quien realizó la investigación de tesis titulada: Caracterización del aceite de fritura obtenido de la manufactura de productos de pollo y la evaluación del proceso de esterificación de ácidos grasos a escala laboratorio.

El método de lavado de biodiesel en el proceso de biodiesel es bastante variado, existiendo una gran cantidad de métodos para su elaboración, en este caso se utilizó el método presentado por María Gabriela Hernández Castellanos en su trabajo de graduación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala en mayo del 2009, quien realizó la investigación de tesis titulada: Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg, para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida. El cual establece la obtención del biodiesel con una calidad que satisface las especificaciones de la Norma ASTM 6751.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Combustibles

Un combustible es cualquier cantidad de materia prima capaz de liberar energía química por medio de una reacción de combustión al oxidarse de forma violenta, la cual busca ser aprovechada, por lo general son sustancias susceptibles de quemarse con algunas excepciones, la principal característica de un combustible es su capacidad para desprender calor por la combustión completa de una unidad de masa del combustible, el cual es llamado poder calorífico, en el sistema internacional de medidas se mide en julios partido por kilogramo, los combustibles más frecuentes son los materiales orgánicos compuestos en su mayoría por los elementos carbono e hidrógeno, La importancia de los combustibles es que su energía química se puede convertir en energía calorífica, eléctrica o mecánica con el equipo adecuado.

Existen combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, entre los combustibles sólidos se encuentran el carbón, la madera y la turba. El carbón se quema en calderas para calentar agua que puede vaporizarse para mover máquinas a vapor o directamente para producir calor utilizable en usos térmicos (calefacción). La turba y la madera se utilizan principalmente para la calefacción doméstica e industrial, aunque la turba se ha utilizado para la generación de energía y las locomotoras que utilizaban madera como combustible eran comunes en el pasado. Entre los combustibles líquidos, se encuentran: el gasóleo, el queroseno o la gasolina (o nafta), biodiesel, entre otros, y los combustibles gaseosos pueden ser el gas natural o los gases licuados de petróleo (GLP), representados por el propano y el butano, entre otros.

Las gasolinas, gasóleos y hasta los gases, se utilizan para motores de combustión interna normalmente. Se le llama también combustibles a las sustancias empleadas para producir la reacción nuclear en el proceso de fisión, aunque este proceso no es propiamente una combustión.

2.2. Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son sustancias ricas en energía que se han formado a partir de plantas y microorganismos enterrados durante mucho tiempo. Estos combustibles proporcionan la mayor parte de la energía que actualmente mueve la moderna sociedad industrial, existen varios tipos de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural, de los cuales se obtienen subproductos como la gasolina o el gasóleo provenientes del petróleo que son utilizados en su mayoría por los automóviles, el carbón es el combustible más utilizado para la generación de energía eléctrica y el gas natural es empleado sobre todo en la calefacción, la generación de agua caliente y el aire acondicionado de edificios y residenciales.

2.2.1. Petróleo

El petróleo es una mezcla homogénea de compuestos orgánicos, principalmente compuesto por hidrocarburos insolubles en agua, usualmente es conocido como petróleo crudo o simplemente crudo. Es un compuesto de origen fósil, producto de la transformación de materia orgánica depositada en grandes cantidades que posteriormente fueron enterradas bajo pesadas capas de sedimentos. Es un líquido bituminoso espeso formado por muchos compuestos en su mayoría parafinas, naftenos y aromáticos.

El petróleo natural es sometido al proceso de refinamiento por medio de destilación fraccionada, en donde es separado en mezclas más simples de hidrocarburos que tienen usos específicos, de este proceso se obtienen diferentes productos como: gasolina, queroseno, asfalto, diesel, aceite, entre otros aprovechados en la industria para la fabricación de nuevos productos y como combustible para abastecer de energía a su maquinaria y equipo.

2.2.2. Diesel

El Diesel de petróleo, también llamado petrodiesel, o diesel fósil se produce a partir de la destilación fraccionada de petróleo crudo entre 200 °C y 350 °C a presión atmosférica, lo que resulta en una mezcla de hidrocarburos de cadenas que normalmente contienen entre ocho y veintiún átomos de carbono por molécula.

El diesel tiene un alto poder calorífico (48,81 MJ/kg) y presenta poca volatilidad, propiedades que lo hacen un combustible más eficiente que la gasolina, que presenta un poder calorífico levemente menor (47,19 MJ/kg) y presenta mayor volatilidad, la utilización de diesel en los motores de combustión interna dio inicio en 1892 con la creación del motor impulsado por diesel como combustible, un motor más eficiente que el impulsado por gasolina.

2.3. Biocombustibles

Los biocombustibles provienen de la biomasa, obtenidos del procesamiento de materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, es utilizado como fuente de energía y, a diferencia de los combustibles fósiles, son una fuente de energía renovable.

Los biocombustibles fueron la primera fuente de energía que conoció la humanidad, al utilizar la madera para producir energía mediante la quema de ésta. Las fuentes de biocombustibles pueden ser biomasa tradicional quemada directamente, tecnología a base de biomasa para generar electricidad, y biocombustibles líquidos para el sector de motores a combustión interna o calderas y equipos industriales. Los biocombustibles líquidos más utilizados en la actualidad son el etanol y el biodiesel, el etanol puede ser utilizado en motores que utilizan gasolina, mientras que el biodiesel puede ser utilizado en motores que utilizan diesel.

2.3.1. Biodiesel

El biodiesel es un combustible líquido obtenido a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, luego de ser utilizados o sin usos previos, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, el cual puede ser utilizado como sustituto total o parcial del petrodiesel o gasóleo obtenido del petróleo. Se denomina biodiesel al éster que se produce a partir de diversos tipos de grasas o aceites, que pueden ser tanto de origen vegetal, como los aceites de soja, colza o girasol, como de origen animal, como la grasa del pollo o el cebo de la res.

La ASTM lo define como: ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplean en los motores de ignición de compresión (motores diesel) o en calderas de calefacción.

La elaboración del biodiesel está basada en la llamada transesterificación de los glicéridos, mediante la utilización de catalizadores. Desde el punto de vista químico, los aceites vegetales son triglicéridos, es decir, tres cadenas moleculares largas de ácidos grasos unidas a un alcohol, el glicerol. En la reacción de transesterificación, una molécula de un triglicérido reacciona con tres moléculas de metanol o etanol para dar tres moléculas de monoésteres y una de glicerol.

Estos ésteres metílicos o etílicos (biodiesel) se mezclan con el combustible diesel convencional en cualquier proporción o se utilizan como combustible puro (biodiesel 100%) en cualquier motor diesel. El glicerol desplazado se recupera como un subproducto de la reacción.

El biodiesel puede mezclarse con gasóleo procedente del refino de petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiesel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla.

El biodiesel tiene un sin número de beneficios para el medio ambiente, este combustible tiene 50% menos emisiones de monóxido de carbono y 78% menos emisiones de dióxido de carbono que el petrodiesel.

Dado que los cultivos de plantas aceitosas usados para producir el biodiesel absorben el dióxido de carbono presente en la atmósfera, el uso del biodiesel tiene un promedio de cero emisiones de gases contribuyentes al calentamiento global, dándole otra gran ventaja sobre los combustibles basados en el petróleo.

2.4. Métodos de producción de biodiesel

Actualmente existen muchos métodos de producción de biodiesel, entre los cuales se pueden mencionar: la producción por lotes, proceso supercrítico, reactor ultrasónico, método de microondas, enzimas lipasas, los cuales se describen a continuación:

2.4.1. Proceso de producción por lotes

Preparación: tener precaución con la cantidad de agua y ácidos grasos libres presentes en el lípido (aceite o grasa), si los niveles son muy altos, puede ocurrir una saponificación y obtener jabón. El catalizador es disuelto en el alcohol usando un mezclador común, la mezcla de alcohol y catalizador es puesta en un contenedor y, más tarde, el aceite o grasa, el sistema es cerrado herméticamente para prevenir la pérdida del alcohol.

La mezcla se mantiene unos pocos grados abajo del punto de ebullición del alcohol (60 °C) para acelerar la reacción, el tiempo estimado de finalización es de 1 a 8 horas; bajo condiciones normales, el tiempo disminuye a la mitad cada 10 °C incrementados. Se usa un exceso de alcohol para asegurar que la reacción se complete totalmente (generalmente en proporción 4:1 alcohol:triglicérido), la capa de glicerina formada es más densa que la del biodiesel, por eso se pueden separar por gravedad a veces se usa un centrifugador para separar los dos materiales más rápido.

Una vez separados la glicerina del biodiesel, el exceso de alcohol en cada capa es removido por destilación, hay que cuidar que el alcohol extraído no tenga agua.

Los productos extraídos con la glicerina pueden ser separados para obtener glicerina pura, el biodiesel es a veces purificado lavándolo cuidadosamente con agua tibia para remover los restos de catalizador y del jabón, luego se seca y se almacena.

2.4.2. Proceso supercrítico

Un método alternativo de transesterificación sin catalizador usa metanol supercrítico a temperaturas y presiones altas continuamente, en estado supercrítico, el aceite y el metanol forman una única fase y la reacción ocurre espontánea y rápidamente, además tolera que la materia prima contenga agua, el paso de remoción del catalizador es suprimido, a pesar de las altas temperaturas y presiones, los costes energéticos son similares y hasta menores que el proceso anterior.

2.4.3. Reactor ultrasónico

En este método, las ondas ultrasónicas hacen que la mezcla produzca burbujas que chocan entre sí constantemente, esta cavitación provee simultáneamente el movimiento y el calentamiento requerido para la transesterificación, consecuentemente, usar un reactor ultrasónico reduce significantemente el tiempo, las temperaturas y la energía necesarios, por consiguiente, este proceso puede cubrir varias etapas en un mismo período de tiempo en vez del proceso por lotes.

2.4.4. Método de microondas

Se está investigando actualmente el uso de hornos de microondas para proveer la energía necesaria en la transesterificación, las microondas proveen calor intenso concentrado que puede ser mayor que el mismo dentro del recipiente en una reacción por lotes. Un proceso de 6 litros por minuto con una conversión de 99% ha demostrado que consume un cuarto de la energía requerida en el proceso por lotes. El proceso sigue siendo para uso científico y en etapa de desarrollo.

2.4.5. Usando enzimas lipasas

La lipasa es una enzima que se usa en el organismo para disgregar las grasas de los alimentos para que se puedan absorber, se han hecho una gran cantidad e investigaciones usando enzimas como catalizador. Las mismas muestran que se pueden obtener un muy buen rendimiento.

2.5. Materias primas y productos de la producción de biodiesel

Los aceites y las grasas constituyen las materias primas esenciales para la producción de biodiesel. El biodiesel puede ser producido a partir de cualquier materia que contenga triglicéridos, la mayor fuente de materia prima para la producción de biodiesel a nivel internacional son los aceites extraídos de plantas oleaginosas; sin embargo, existen otras fuentes de materias primas como los aceites usados (aceites de frituras), en donde se reciclan los residuos de las frituras, o las grasas de origen animal, que son subproductos de la producción de carne.

2.5.1. Aceites y grasas de origen animal

En comparación con los aceites vegetales, los aceites y las grasas animales tienen costos más bajos, pero su disponibilidad en el mercado es más limitada, pues son subproductos de la industria cárnica, los mayores depósitos de grasas en animales se encuentran bajo la piel, ocupando espacios entre los muslos y en la cavidad abdominal. La composición química de dichas grasas aun para la misma clase de animal puede variar, ya que depende de diversos factores como el sexo, el tipo de alimentación y las condiciones ambientales del medio en que viven.

En la tabla I se presenta el perfil de ácidos grasos de las grasas animales más representativas. El cebo de res y la manteca de cerdo son más ricos en ácidos grasos saturados que la grasa de pollo, llegando a tener proporciones de dichos ácidos similares o superiores a las del aceite de palma y sus fracciones semisólidas.

2.5.2. Propiedades fisicoquímicas de grasas y aceites

Los aceites y grasas pueden ser caracterizados según sus propiedades físicas como: densidad, viscosidad, punto de fusión, índice de refracción o por sus propiedades químicas como: índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación, índice de éster.

Tabla I. **Perfil de ácidos grasos de grasas animales**

Tipo de ácido graso		Contenido de ácidos grasos en porcentaje por peso (%p/p)		
		Cebo de res	**Manteca de cerdo**	**Grasa de pollo**
Saturados	C10:0	0-0,1	0,1	---
	C12:0	0,1	0,1	---
	C14:0	2,7-4,8	1,4-1,7	1,3
	C16:0	20,9-28,9	23,1-28,3	23,2
	C17:0	1	0,5	0,3
	C18:0	7,0-26,5	11,7-24,0	6,4
	C20:0	0,9	0,2-0,3	---
	C22:0	0-0,1	0-0,4	---
	C24:0	0-trazas	0-0,5	---
			Saturados totales	**31,2**
Mono insaturados	C14:1	0,8-2,5	0-0,1	0,2
	C16:1	2,3-9,1	1,8-3,3	6,5
	C18:1	30,4-48,0	29,7-45,3	41,6
	C20:1	0,3-1,7	0,8-1,3	---
	C22:1	0-trazas	Trazas-0,1	---
	C24:1	0	0-0,5	---
		Total		48,3
Poli insaturados	C18:2	0,6-1,8	8,1-12,6	18,9
	C18:3	0,3-0,7	0,7-1,2	1,3
	Total			20,2
			Insaturados totales	**68,5**

Fuente: BENJUMEA, Pedro. Biodiesel: producción, calidad y caracterización. p. 18.

2.5.2.1. Índice de acidez

El índice de acidez (IA) es el número de mg de KOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres de 1 g de aceite. Se determina mediante la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución estándar de KOH. Un valor elevado para este índice muestra que el aceite contiene una alta cantidad de ácidos grasos libres, ya que ha sufrido un alto grado de hidrólisis. Puede expresarse también como porcentaje de ácido oleico, palmítico o láurico, según el ácido graso que predomine en la grasa en cuestión.

Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiesel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH o KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiesel. La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel. El valor de acidez se define como el número de miligramos de KOH o NaOH necesario para neutralizar 1 g de muestra. Para convertir el porcentaje de ácidos grasos libres (como oleico) a valor de acidez, multiplicar el porcentaje de ácidos grasos libres por 1,99.

Tabla II. **Acidez aproximada de algunas materias primas baratas**

Materia Prima	Rango de Acidez
Aceites de cocina usados	2 – 7 %
Grasas animales	5 – 30 %
Grasas de trampas de grasa	Cerca de 100 %

Fuente: CASTRO, Paula. Opciones para la producción y uso del biodiesel en Perú. p. 115.

2.5.3. Lípidos

Los lípidos son un conjunto de moléculas orgánicas, la mayoría son biomoléculas, compuestas principalmente por carbono e hidrógeno y en menor medida oxígeno, aunque también pueden contener fósforo, azufre y nitrógeno, tienen como característica principal el ser hidrofóbicas o insolubles en agua y sí en solventes orgánicos como la bencina, el benceno y el cloroformo. En el uso coloquial, a los lípidos se les llama incorrectamente grasas, ya que las grasas son sólo un tipo de lípidos procedentes de animales.

Los lípidos cumplen funciones diversas en los organismos vivientes, entre ellas la de reserva energética (triglicéridos), la estructural (fosfolípidos de las bicapas) y la reguladora (esteroides). Los lípidos son un grupo muy heterogéneo que usualmente se clasifican en dos grupos, atendiendo a que posean en su composición ácidos grasos (lípidos saponificables) o no lo posean (lípidos insaponificables).

2.5.4. Ácido graso

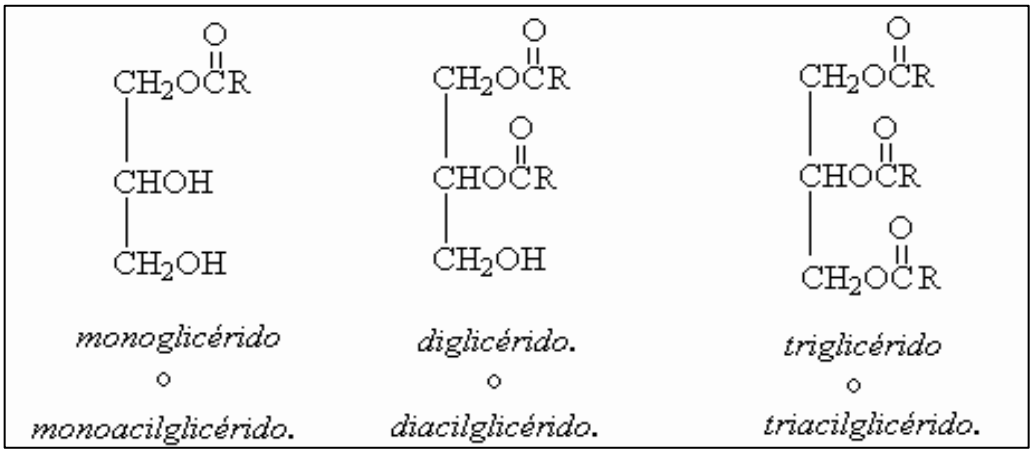
Son las unidades básicas de los lípidos saponificables, y consisten en moléculas formadas por una larga cadena hidrocarbonada con un número par de átomos de carbono (12 – 24) y un grupo carboxilo terminal. La presencia de dobles enlaces en el ácido graso reduce el punto de fusión. Los ácidos grasos se dividen en saturados e insaturados, saturados, sin dobles enlaces entre átomos de carbono; insaturados, los ácidos grasos insaturados se caracterizan por poseer dobles enlaces en su configuración molecular. Éstas son fácilmente identificables, ya que estos dobles enlaces hacen que su punto de fusión sea menor que en el resto, se presentan como líquidos, llamados aceites.

2.5.5. Acilglicérido

Los acilglicéridos o acilgliceroles son ésteres de ácidos grasos con glicerol (glicerina), formados mediante una reacción de condensación llamada esterificación, una molécula de glicerol puede reaccionar con hasta tres moléculas de ácidos grasos, puesto que tiene tres grupos hidroxilo. Según el número de ácidos grasos que se unan a la molécula de glicerina, existen tres tipos de acilgliceroles: monoglicéridos, sólo existe un ácido graso unido a la molécula de glicerina; diacilglicéridos, la molécula de glicerina se une a dos ácidos grasos.

Triacilglicéridos, llamados comúnmente triglicéridos, puesto que la glicerina está unida a tres ácidos grasos; son los más importantes y extendidos de los tres. Los triglicéridos constituyen la principal reserva energética de los animales, en los que constituyen las grasas; en lo vegetales constituyen los aceites, el exceso de lípidos es almacenado en grandes depósitos en el tejido adiposo de los animales.

Figura 1. **Tipos de acilglicéridos**



Fuente: ARTEAGA, Yasiel; CARBALLO, Leila R. http://www.monografias.com/trabajos31/lipidos/lipidos.shtml. Consulta: 22 de febrero de 2012.

2.5.6. Alcohol

En química se denomina alcohol a aquellos compuestos químicos orgánicos que contienen un grupo hidroxilo (-OH) en sustitución de un átomo de hidrógeno enlazado de forma covalente a un átomo de carbono, si contienen varios grupos hidroxilos se denominan polialcoholes, los alcoholes suelen ser líquidos incoloros de olor característico, solubles en el agua en proporciones variables y menos densos que ella.

2.5.6.1. Metanol

El compuesto químico metanol, también conocido como alcohol metílico o alcohol de madera, es el alcohol más sencillo, a temperatura ambiente se presenta como un líquido ligero (de baja densidad), incoloro, inflamable y tóxico que se emplea como anticongelante, disolvente y combustible. Su fórmula química es CH_3OH (CH_4O).

2.5.6.2. Etanol

El compuesto químico etanol, conocido como alcohol etílico, es un alcohol que se presenta en condiciones normales de presión y temperatura como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78 °C, mezclable con agua en cualquier proporción; a la concentración de 95% en peso se forma una mezcla azeotrópica, su fórmula química es CH_3-CH_2-OH (C_2H_6O), principal producto de las bebidas alcohólicas como el vino (alrededor de un 13%), la cerveza (5%) o licores (hasta un 50%).

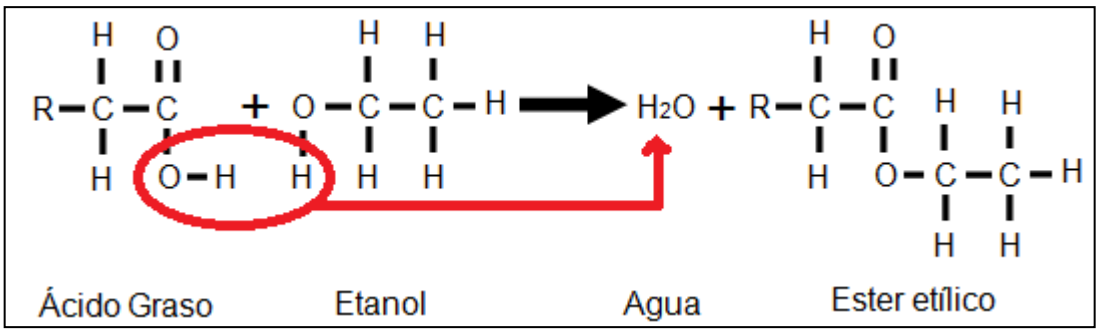
2.5.7. Glicerina

La glicerina o glicerol, es un líquido incoloro e inodoro, de sabor dulce, el termino glicerol proviene del vocablo *glikis*, que significa dulce. Los términos glicerin y glicerina se utilizan comúnmente para describir soluciones comerciales concentradas de glicerol en agua, la densidad del glicerol anhidro es 1,261 kg/m^3 y sus puntos de ebullición y fusión a presión atmosférica son 290 °C y 18,17 °C, respectivamente.

2.6. Esterificación

Se denomina esterificación al proceso por el cual se sintetiza un éster. Un éster es un compuesto derivado formalmente de la reacción química entre un ácido carboxílico y un alcohol, comúnmente cuando se habla de ésteres se hace alusión a los ésteres de ácidos carboxílicos, substancias cuya estructura es R-COOR', donde R y R' son grupos alquilo, sin embargo, se pueden formar en principio ésteres de prácticamente todos los oxácidos inorgánicos. El mecanismo de reacción del proceso de esterificación es una sustitución nucleofílica, catalizada por un ácido.

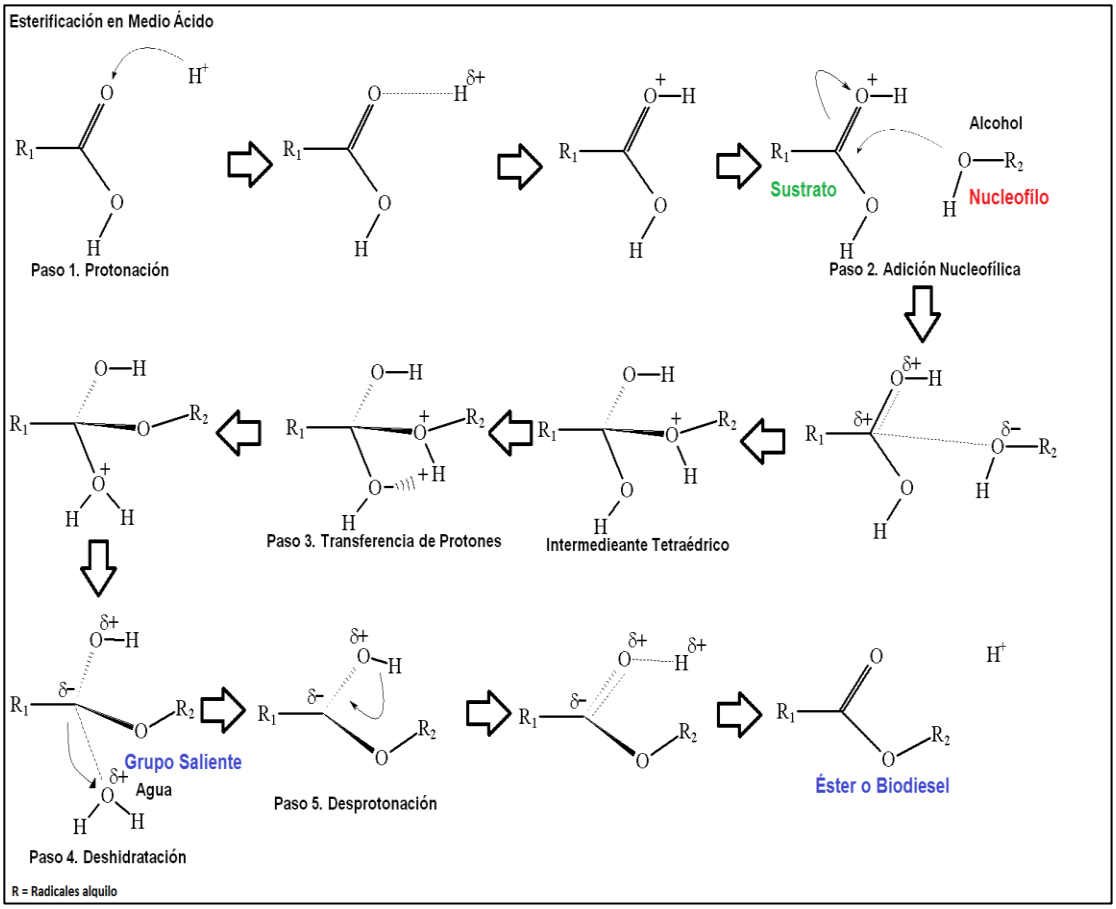
Figura 2. **Reacción de esterificación**



Fuente: elaboración propia.

El mecanismo de reacción del proceso de esterificación es una sustitución nucleofílica, catalizada por un ácido, esto se debe a que el grupo carbonilo de un ácido graso, no es lo suficientemente electrofílico para poder ser atacado por un alcohol, por lo que el catalizador ácido protona al grupo carbonilo y lo activa hacia el ataque nucleofílico, la pérdida de un protón forma el hidrato de un éster, la protonación de los grupos hidroxilo permite que se elimine como agua, formando un catión estabilizado. La pérdida de un protón del segundo grupo hidroxilo forma el éster, como se muestra en la figura 3.

Figura 3. **Mecanismo de reacción de esterificación en medio ácido**



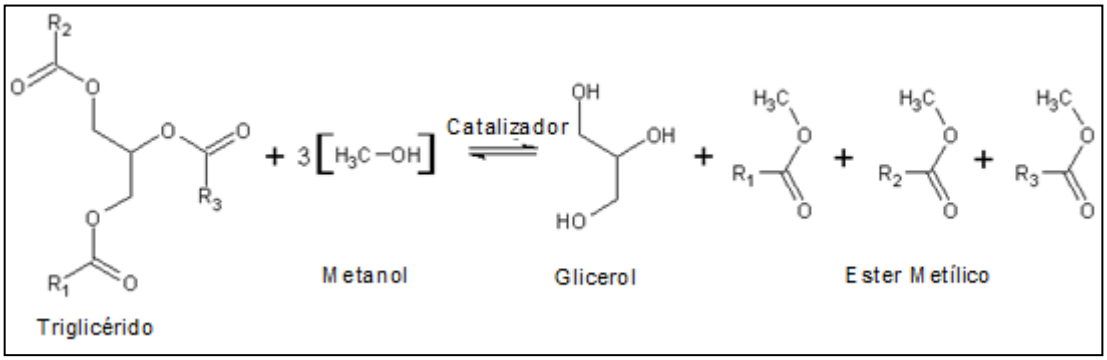
Fuete: SEREDA, Grigoriy. http://people.usd.edu/~gsereda/Ester.html. Consulta: 24 de mayo de 2012.

2.7. Transesterificación

Uno de los métodos más utilizados para la obtención de biodiesel es mediante la reacción de transesterificación, reacción bien conocida y descrita como hidrólisis alcalina, se basa en la reacción de triglicéridos o triacilglicéridos, en presencia de un alcohol de bajo peso molecular, de modo general, la transesterificación es la reacción de un lípido con un alcohol, produciéndose un éster y un subproducto, o glicerol.

El proceso global de transesterificación de aceites vegetales y grasas es una secuencia de tres reacciones reversibles y consecutivas, en que los monoglicéridos y los diglicéridos son los intermediarios, los triglicéridos son convertidos a diglicéridos, los cuales son convertidos en monoglicéridos y posteriormente, en glicerol.

Figura 4. **Reacción de transesterificación**



Fuente: FRANCO, Alexander. http://es.wikipedia.org/wiki/Biodiesel. Consulta: 07 de mayo de 2011.

Cada etapa produce una molécula de éster de un ácido graso. Si la reacción es incompleta, habrá triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos mezclados, cada uno de estos componentes todavía contiene una molécula de glicerol que puede ser liberada, este glicerol se denomina glicerol ligado, cuando este último es sumado al glicerol libre obtenemos el glicerol total.

2.7.1. El proceso de transesterificación

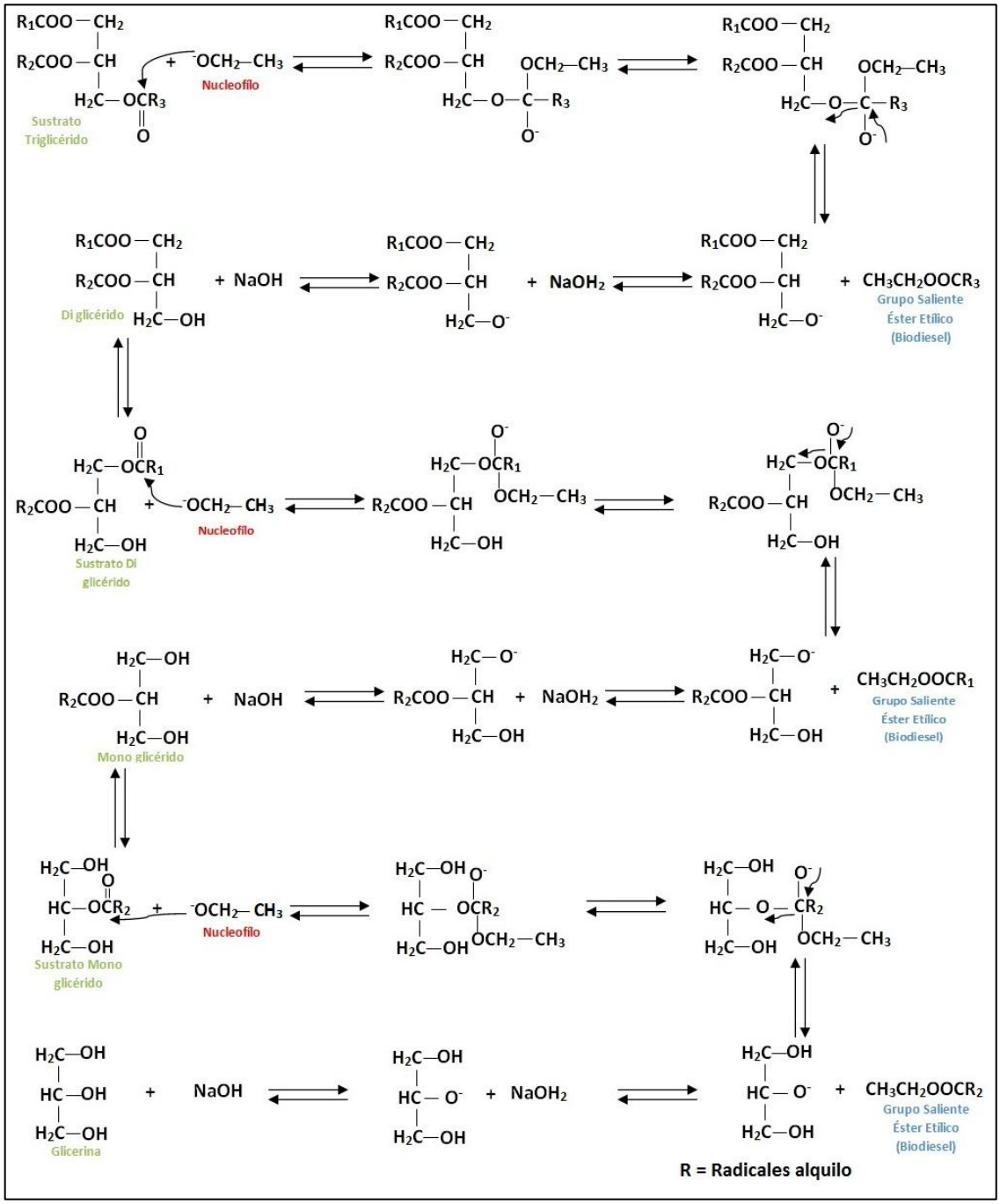
Es el proceso que convierte los aceites y grasas en biodiesel, para que la reacción química se produzca sin problemas, se calentará el aceite hasta aproximadamente los 48-54 ºC (120-130 ºF).

El proceso de alcohólisis (escisión mediante un alcohol) de un éster se denomina transesterificación, es una reacción de sustitución nucleofílica en la cual un alcohol actúa como reactivo nucleofílico en la esterificación de un ácido; en la hidrólisis de un éster, un reactivo nucleofílico desplaza a un alcohol.

Si se tiene esto presente, no es de sorprender que un alcohol pueda desplazar a otro de un éster, en esta reacción un éster reacciona con otros alcoholes en condiciones básicas para producir nuevos ésteres, transformando un éster en otro éster de cadena carbonada más corta, en este caso el catalizador básico es la base alcóxido del alcohol correspondiente, dependiendo del lote en proceso, puede ser metóxido o etóxido de sodio, el mecanismo de reacción se dividirá en tres etapas en las cuales el nucleofílo atacara a un triglicérido, a un diglicérido y a un monoglicérido, obteniendo en cada etapa una molécula de éster metílico o etílico, obteniendo como subproducto al finalizar la reacción glicerina, como se puede observar en la figura 9 que muestra el mecanismo de reacción de transesterificación.

Durante la reacción de transesterificación se forman metilésteres (si se utiliza metanol) o etilésteres (si se utiliza etanol), y el hidróxido de sodio estabiliza la glicerina que es un subproducto de la reacción.

Figura 5. **Mecanismo de reacción de transesterificación en medio básico**



Fuente: elaboración propia.

2.8. Especificaciones del biodiesel

Los respectivos Comités Técnicos de Normalización o Reglamentación Técnica a través de los entes de normalización o Reglamentación Técnica de los países miembros de la región Centroamericana y sus sucesores, han establecido los parámetros de calidad para el biodiesel mediante el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07, Biocombustibles. Biodiesel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel. Especificaciones, dichos parámetros se resumen en los anexos.

2.8.1. Punto de inflamabilidad, °C

Para que se produzca la reacción de combustión, la mezcla de combustible y comburente debe alcanzar una temperatura mínima necesaria, que recibe el nombre de punto de inflamación o temperatura de ignición. Una vez que se alcanza dicha temperatura, el calor producido mantendrá la temperatura por encima de la de ignición y la reacción continuará hasta que se agote el combustible o el comburente.

2.8.2. Contenido de azufre total, porcentaje de masa

Es importante conocer el contenido de azufre de los combustibles ya que esto determina la cantidad de SO2 que aparecerá en los humos, como resultado de la combustión. El SO2 se oxida lentamente a SO3 (trióxido de azufre) que es el responsable de las llamadas lluvias ácidas. Una forma de reducir la formación de SO3 es controlar el exceso de aire, de forma tal que se emplee el “mínimo” exceso de aire posible.

2.8.3. Corrosión tira de cobre, 3 horas a 50 °C

La presencia de azufre o compuestos de azufre es indicado por la corrosión o coloración de la lámina de cobre expuesta a una temperatura y comparada con una lámina recientemente pulida.

2.8.4. Calor de combustión, MJ/kg

El calor de combustión es la cantidad de calor que se libera cuando se quema cierta cantidad de masa de un combustible, las unidades están dadas en energía por unidades de masa, es decir, KJ/Kg o Kcal/Kg ó BTU/lb.

2.8.5. Gravedad API, °API

La gravedad API es una medida de densidad que describe cuán pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua. Si los grados API son mayores a 10, es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en ésta. La gravedad API es también usada para comparar densidades de fracciones extraídas del petróleo.

Por ejemplo, si una fracción de petróleo flota en otra, significa que es más liviana, y por lo tanto su gravedad API es mayor, la gravedad API es medida con un instrumento denominado densímetro.

2.8.6. Viscosidad cinemática, 40 °C, mm^2/s

Se define como la resistencia a fluir de un fluido bajo la acción de la gravedad, en el interior de un fluido, dentro de un recipiente, la presión hidrostática (la presión debida al peso del fluido) está en función de la densidad. La viscosidad cinemática puede definirse como el tiempo requerido por un volumen dado de fluido en fluir a través de un tubo por acción de la gravedad.

2.8.7. Ceniza, porcentaje de peso

Los materiales que forman cenizas en un biodiesel se pueden presentar de tres formas: sólidos abrasivos, jabones metálicos solubles, catalizadores no eliminados en el proceso.

2.8.8. Índice de cetano

La facilidad con la que se inflama el combustible en los motores diesel, es el índice de cetano, que tiene al cetano como combustible de referencia, el índice de cetano guarda relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión, denominado intervalo de encendido. Una combustión de calidad ocurre cuando se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante. Cuanto más elevado es el número de cetano, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión.

2.8.9. Agua y sedimentos, porcentaje de volumen

El agua se puede formar por condensación en el tanque de almacenamiento, la presencia de agua y sólidos de desgaste normalmente pueden obstruir filtros y darle al combustible unas propiedades de lubricidad menores, el biodiesel puede absorber hasta 40 veces más agua que el diesel.

2.8.10. Destilación, 760 mm Hg con base a recuperado, °C

La destilación (volatilidad) en los hidrocarburos tiene una gran importancia en el desempeño especialmente en el caso de combustibles y solventes, el rango de ebullición brinda la información de la composición, de propiedades y del comportamiento del combustible al ser usado en el futuro, la volatilidad es el mejor determinante de la tendencia de un hidrocarburo que produce potencialmente vapores explosivos.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Durante la producción del biodiesel obtenido como resultado del uso del aceite residual del beneficiado de pollo en la industria harinera, como materia prima, se involucran las siguientes variables:

- Variables de operación

  - Temperatura

Las reacciones de esterificación en medio ácido se llevaron a cabo a temperaturas dentro del rango de 55 - 60 °C.

  - Presión

Se trabajó a la presión atmosférica local de 0,845 atm de la ciudad de Guatemala a 1530 msnm, en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE) sección Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).

  - Volumen de control

El volumen de aceite utilizado por lote en el laboratorio fue de 500 mL y a escala planta se utilizaron lotes de 20 litros.

- Acidez

La calidad del biodiesel producido puede comprobarse midiendo su pH, el biodiesel obtenido tuvo un pH dentro del rango de 7 – 7,5 luego de la neutralización con hidróxido de sodio.

- Variables de proceso

  - Volumen de reactivos

Las cantidades se trabajaron en porcentaje volumen/volumen de los componentes de la mezcla: aceite, alcoholes, catalizador y aguas de lavado.

  - Reactivos

Se utilizaron dos tipos diferentes de alcohol: metanol y etanol; los cuales fueron sustituidos en el proceso de esterificación.

  - Tiempo de agitación

El tiempo de agitación se varió según la muestra y tuvo una de tres opciones entre treinta, sesenta y noventa minutos de reacción.

Tabla III. **Cuadro de análisis de variables**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de estudio		Factores perturbadores	
			Independiente	Dependiente	Controlable	No controlable
Análisis de ambiente externo						
1	Temperatura	°C	X			X
2	Presión	Atm	X			X
Análisis de experimentación						
3	Ph	----		X		X
4	Densidad	$^{g}/_{ml}$		X		X
5	Viscosidad	Cp		X		X
6	Proporción	% $(^{v}/_{v})$	X		X	
7	Velocidad de Agitación	RPM	X		X	
8	Volumen	L	X		X	
9	Tiempo	Min		X	X	
10	Concentración	Mol/L	X		X	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Industria

El campo de estudio de esta investigación está delimitado a la empresa dedicada al beneficiado del pollo Avícola Villalobos, S.A. ubicada en el Km 34,5 carretera al Pacifico, finca la Compañía, colonia los Sauces, Palín, Escuintla, Guatemala, proporcionando las muestras necesarias de aceite para la elaboración del estudio.

- Proceso

Producción de biodiesel a escala laboratorio y a escala planta piloto a partir de aceite animal residual proveniente del aprovechamiento de los desechos del beneficiado del pollo por el método de esterificación ácida utilizando ácido sulfúrico como catalizador de la reacción.

- Producción

La producción de biodiesel a partir de aceite obtenido en el beneficiado del pollo se llevo a cabo en el laboratorio y la planta piloto de producción de biodiesel del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), sección Química Industrial del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Biodiesel obtenido

Las pruebas para la caracterización fisicoquímica del biodiesel obtenido se realizarán en los laboratorios técnicos en la sección de hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala y las cromatografías de gases en el Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala

- Caracterización

Caracterización fisicoquímica del biodiesel obtenido se realizará mediante los parámetros establecidos por el reglamento técnico centroamericano RTCA 75.02.43:07.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Erick Roberto Orellana Sandoval

- Asesora: Inga. Telma Maricela Cano Morales
  Colegiado No. 433

- Asesor: Ing. Mario José Mérida Meré
  Colegiado No. 1411

3.4. Recursos materiales disponibles

Durante la realización de ésta investigación se utilizaron en el laboratorio y a escala planta piloto los siguientes materiales:

Tabla IV. **Cristalería utilizada durante la etapa experimental**

Descripción	Especificaciones
Beaker	100, 250 y 600 mL
Pipeta volumétrica	1,2,5 y 10 mL
Varilla de agitación	
Condensador	De bolas
Erlenmeyer	125, 250 y 1000 mL
Balón aforado	250 y 1000 mL
Probetas	5, 10, 25, 100, 250, 500 y 1000 mL
Vidrio de reloj	
Embudos	
Ampollas de decantación	125, 250, 500, 1000 mL
Buretas	25 y 50 mL
Reactor de tres bocas	Con capacidad de 1 Litro

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Equipo utilizado durante la etapa experimental**

Descripción	Especificaciones
Marmita de agitación	De acero inoxidable, marca LAQUIPAR, con capacidad de 40 litros
Caldera Columbia	Caldera piro tubular de 10 Hp
Campana de extracción	Marca Serproma, modelo APV-655 serie 120, motor con capacidad de ¾ Hp
Planchas de calentamiento con agitador	Marca VWR Hotplace/stirrer F10A de 250 v
Balanza analítica	Marca Adventur, Serie G123120204013
Cubetas de plástico	Con capacidad de 10, 15 y 20 L.
Recipientes de plástico con tapa	Con capacidad de 50 L.
Soportes universales	De hierro
Potenciómetro	pH de 0,00 – 14,00
Bomba para agua de recirculación	Marca CRYSTAL POND DP80A, 120v, 60 Hz
Mascarilla	Marca Dura Mask
Guantes	De látex y para altas temperaturas
Bata de laboratorio	De tela
Papel filtro	
Espátula	De metal con mango de madera
Agitadores	Magnéticos

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Reactivos y materia prima**

Descripción	Especificaciones
Aceite residual de origen animal	Aceite residual obtenido del aprovechamiento de los residuos del beneficiado del pollo en fábrica de harinas
Metanol	Grado reactivo con 99,93% de pureza
Etanol	Grado industrial con 95% de pureza
Ácido sulfúrico	Grado reactivo con 95-97% de pureza
Hidróxido de sodio	Grado reactivo (ACS)
Agua desmineralizada	Proporcionada por la empresa Salvavidas
Fenolftaleína	Al 5% en peso en solución de etanol

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cuantitativa o cualitativa

En el transcurso de la investigación se utilizaron técnicas cuantitativas y cualitativas que facilitaron la elaboración de la misma.

3.5.1. Técnica cualitativa

Se determinaron las cualidades y propiedades del aceite residual y del biodiesel obtenido mediante esterificación acida utilizando como reactivo metanol o etanol, tales como punto de inflamabilidad, contenido de azufre total, corrosión tira de cobre, calor de combustión, gravedad API, viscosidad cinemática, ceniza, índice de cetano, agua y sedimentos, destilación, entre otras que rige el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

3.5.2. Técnica cuantitativa

Se procedió a realizar la producción de biodiesel mediante un diseño de lotes de medio litro de aceite (500 mL) para la etapa a nivel laboratorio y lotes de 20 litros de aceite para la etapa a escala planta piloto, la producción se realizó en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE) Sección Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), en donde se produjo biodiesel mediante el proceso de esterificación en medio ácido, en el cual se varió el tipo de alcohol a utilizar en el proceso, variando entre metanol y etanol según el lote evaluado, y a su vez se varió el tiempo de reacción utilizando tres tiempos, de treinta, sesenta, y noventa minutos, la reacción fue catalizada por ácido sulfúrico.

Luego de la reacción se obtuvo un aceite con menor porcentaje de ácidos grasos libres disueltos en él, el cual fue neutralizado añadiéndole hidróxido de sodio a una concentración de 5 N, obteniendo una solución con un pH neutro, la cual fue lavada con agua desmineralizada agitándola constante durante un periodo de tiempo, luego se deja decantar la solución y se separan las aguas residuales del biodiesel, y este último fue lavado mediante dos ciclos de lavado, realizando para cada lote tres repeticiones; la selección de lotes se realizó al azar escogiendo uno de los lotes entre las opciones establecidas, el orden con que se produjeron los lotes se detalla en la tabla XX.

Luego de la producción de biodiesel se procedió a cuantificar los productos obtenidos evaluando así la cantidad de producción de biodiesel independientemente de cada lote, dichos resultados fueron analizados mediante el análisis de varianza, utilizando el método de Diferencia Honestamente Significativa de Tukey (HSD de Tukey).

Tabla VII. **Distribución y ordenamiento de lotes escogidos al azar**

Distribución de lotes		Lote	Orden	Lote
Esterificación del aceite	Metanol	1	1	3
		2	2	2
		3	3	5
		4	4	4
		5	5	10
		6	6	17
		7	7	12
		8	8	7
		9	9	15
	Etanol	10	10	6
		11	11	1
		12	12	18
		13	13	11
		14	14	16
		15	15	8
		16	16	13
		17	17	14
		18	18	9

Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La recolección y ordenamiento de los datos se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), sección Química Industrial del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).

Para determinar el número de corridas se utilizó el siguiente modelo matemático, basándose en la siguiente ecuación estadística:

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q}{e^2} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

n = número de corridas

z = confiabilidad (90%) según tablas (1,65)

p = probabilidad de éxito

q = probabilidad de fracaso

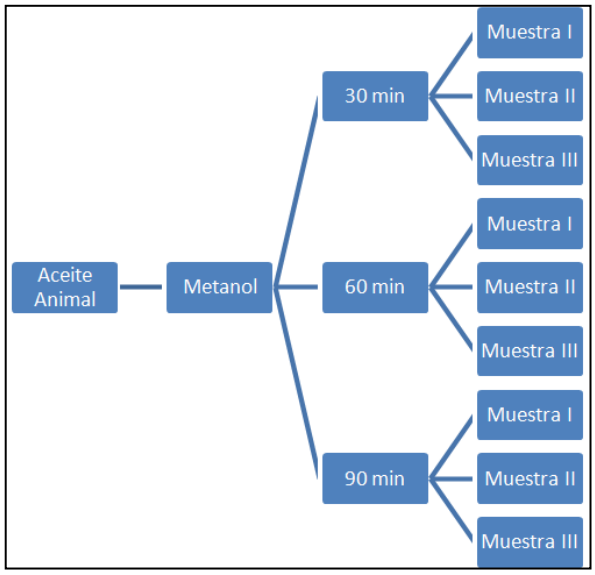
e = error a utilizar (20%)

Sustituyendo datos se obtiene:

$$n = \frac{(1{,}65)^2(95)(5)}{(20)^2} = 3{,}23 \cong 3$$

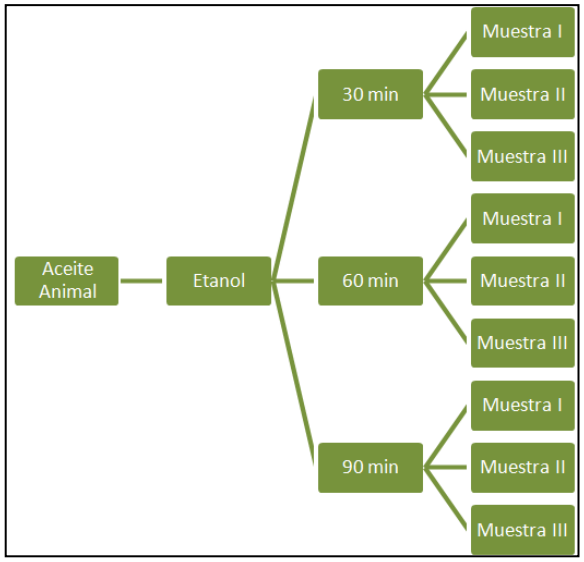
Por lo tanto se utilizaron 3 corridas, variando el tipo de alcohol y los tiempos de reacción de la mezcla. Los resultados obtenidos poseen un rango de error del 20% con una confiabilidad del 90%.

Figura 6. **Diagrama de recolección y ordenamiento de los datos para la reacción con metanol**



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Diagrama de recolección y ordenamiento de los datos para la reacción con etanol**



Fuente: elaboración propia.

3.6.1. Procedimiento para la producción de biodiesel a base de aceite animal

- Etapa 1: pretratamiento del aceite residual utilizado como materia prima para la producción de biodiesel.

  En la etapa de pretratamiento se calentó el aceite residual eliminando el agua contenida en éste, y luego se filtró eliminando los residuos sólidos dentro del mismo.

  - Calentar el aceite residual a una temperatura entre los 100 y 105 °C manteniendo esta temperatura hasta que se deje de observar la formación de burbujas.

  - Agitar el aceite residual evitando que salpique aceite caliente debido a la formación de burbujas por la ebullición del agua presente en el aceite.

  - Luego se aumentó la temperatura hasta un rango entre los 125 y 130 °C durante 15 minutos y se dejó de calentar esperando que disminuyera la temperatura lentamente.

  - El aceite residual se filtró utilizando un filtro prensa (para planta piloto) o un embudo con papel filtro de tamaño de poro entre 1 y 5 micrómetros a una temperatura entre los 50 y 40 °C (para el laboratorio).

- Etapa 2: determinación de la acidez del aceite por medio del método oficial AOCS Ca 5ª – 40

La determinación de la acidez del aceite es un punto muy importante pues determinará si es necesario realizar la etapa de esterificación ácida del aceite, puesto que si el aceite cuenta con un porcentaje de acidez menor o igual a el 2% se procederá a realizar la etapa de transesterificación evitando realizar le etapa de esterificación.

- Calentar la muestra de aceite residual hasta que esté completamente líquida.

- Pesar la muestra utilizando la tabla VIII; y colocarla en un erlenmeyer.

- Agregar la cantidad de alcohol etílico neutralizado (al 95%) de acuerdo a tabla VIII; y agregar dos gotas de fenolftaleína.

- Luego titular la muestra utilizando hidróxido de sodio de concentración indicada en la tabla VIII, hasta que aparezca un color rosado permanente.

- El porcentaje de ácidos grasos libres en la mayoría de tipos de grasa y aceites se calcula como ácido oleico mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ AGL} = \frac{(\text{mL x N x 28.2})}{\text{PM}} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

%AGL = Porcentaje de ácidos grasos libres
mL = mL de Solución de NaOH empleados para la neutralización
N = Concentración de la solución de NaOH
28.2 = Peso Molecular del ácido oleico
PM = Peso de muestra en gramos

El valor de acidez se define como el número de miligramos de hidróxido de sodio necesario para neutralizar 1 g de muestra. Para convertir el valor de AGL a valor de acidez multiplicar el valor obtenido de AGL por 1.99.

Tabla VIII. **Relación entre el porcentaje de ácidos grasos libres y la concentración de la solución**

Rango AGL (%)	Muestra (g)	Alcohol (mL)	Concentración alcalina (N)
0,00 a 0,2	56,4 ± 0,2	50	0,1
0,2 a 1,0	28,2 ± 0,3	50	0,1
1,0 a 3,0	7,05 ± 0,05	75	0,25
3,0 a 50,0	7,05 ± 0,05	100	0,25 a 1,0
50,0 a 100	3,525 ± 0,001	100	1

Fuente: MILLAR, James C. Estadística para química analítica, p. 51.

- Etapa 3: esterificación ácida del aceite residual con variación de temperatura y variación de alcoholes en la reacción

La etapa de esterificación ácida del aceite residual fue realizada para disminuir el porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite, variando entre alcoholes reactantes, determinando el reactivo con mejor desempeño para reducir los ácidos grasos presentes en el aceite, obteniendo así un aceite apto para la reacción de transesterificación.

  - Se colocaron muestras de 500 mL (para Laboratorio) o 20 L (para planta piloto) de aceite residual (previamente seco y filtrado) en el reactor de tres bocas o en la marmita y se calentaron hasta la temperatura de reacción entre los 55 y 60 °C la cual se mantuvo durante el resto de esta etapa.

  - Se agregaron 60% del alcohol estudiado (metanol o etanol) con respecto al volumen inicial de aceite, y se agitó la mezcla.

  - Se agrego el 5% de ácido sulfúrico lentamente a la mezcla anterior, con respecto al volumen inicial de aceite (precaución, la reacción es exotérmica).

  - Se agitó la muestra durante los tiempos de reacción estudiados (30, 60 y 90 minutos).

  - Se dejó reposar hasta que la mezcla alcanzó la temperatura ambiente.

- Etapa 4: neutralización de la solución de aceite esterificado

La etapa de neutralización fue utilizada para neutralizar la solución obteniendo un pH neutro.

  - Se agregaron pequeñas cantidades de hidróxido de sodio con una concentración de 5 N, hasta que el potenciómetro registrara una lectura de pH entre 7,00 a 7,30.

- Etapa 5: lavado de la solución resultante

La etapa de lavado de la solución fue utilizada para separar los compuestos existentes en la mezcla tales como: jabones y sales de sulfato, acelerando el proceso de separación de las fases agua, jabones, sales de sulfato y biodiesel.

  - Se agregaron 180 mL de agua para las muestras a nivel laboratorio y 7 Litros para las pruebas a nivel planta piloto, tomando como base una relación 10:2 referentes a cantidad de mezcla:agua.

  - Se agitó la mezcla durante 15 minutos a una velocidad de 500 rpm.

  - Se dejó reposar la muestra toda la noche en una ampolla de decantación, en el caso de las pruebas a nivel laboratorio y en la marmita en el caso de las pruebas a nivel planta piloto, y se separaron las fases de aguas residuales y biodiesel al siguiente día.

- Etapa 6: lavado del biodiesel

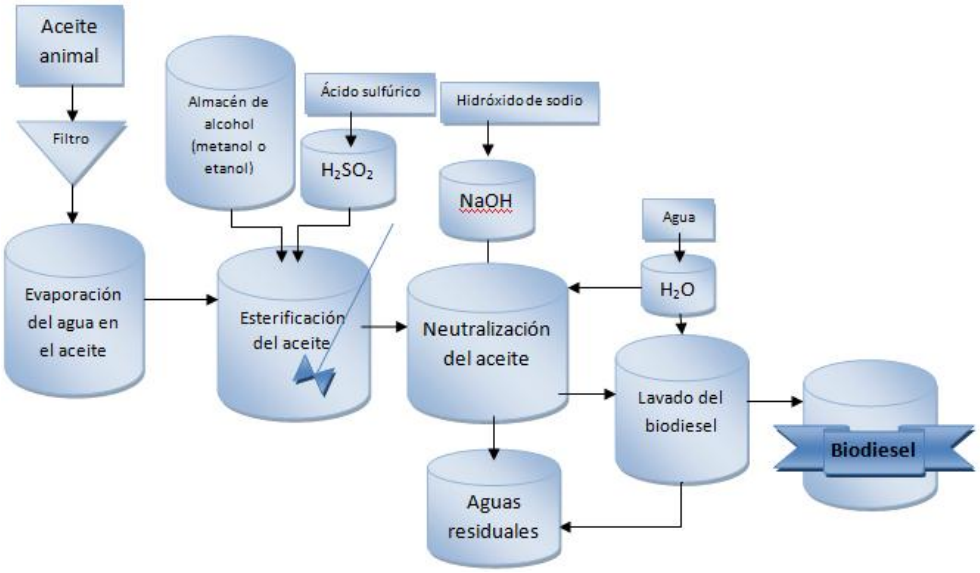
La etapa de lavado del biodiesel se utilizó para eliminar la presencia de jabón en el biodiesel, obteniendo así un biodiesel de mejor calidad.

- Se agregó agua a el biodiesel a una relación de 10:1 con respecto a biodiesel:agua, a 300 rpm

- Se dejó reposar el biodiesel lavado en una ampolla de decantación por 3 horas y luego se separaron las soluciones de aguas residuales y biodiesel lavado.

- Se realizó un lavado de dos ciclos repitiendo el mismo proceso anterior en una segunda etapa de lavado.

Figura 8. **Procedimiento para la producción de biodiesel**



Fuente: elaboración Propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos recolectados durante y al finalizar el proceso de producción de biodiesel fueron procesados y ordenados en tablas, procediendo al análisis y la realización de gráficas utilizando el programa Microsoft Office Excel con lo cual se llegó a las conclusiones del estudio realizado.

3.8. Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico se utilizó el método HSD de Tukey que es una técnica de comparaciones múltiples y, a la vez, de rangos, utilizada para grupos equilibrados de datos y de varianzas similares. Es un test que se suele utilizar cuando se quiere comparar cada lote con todos los demás y el número de lotes es alto (seis o más). Los resultados del análisis se presentan a continuación:

Tabla IX. **Pruebas de los efectos inter-sujetos**

	Variable dependiente % AGL			Biodiesel obtenido (mL)			Variable dependiente agua residual del proceso (mL)		
Origen	Media cuadrática	F	Sig.	Media cuadrática	F	Sig.	Media cuadrática	F	Sig.
Solvente	352,805	223,678	0,000	55001,389	825,021	0,000	22955,102	247,629	0,000
Tiempo	271,470	172,112	0,000	2151,389	32,271	0,000	2740,922	29,568	0,000
Solvente y tiempo	8,122	5,149	0,024	476,389	7,146	0,009	237,561	2,563	0,118
Error	1,577			66,667			92,699		
R^2	R cuadrado= 0,980 (R cuadrado corregida= 0,971)			R cuadrado= 0,987 (R cuadrado corregida= 0,981)			R cuadrado= 0,963 (R cuadrado corregida= 0,948)		

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Ing. Marino Barrientos.

Tabla X. **Medias marginales**

Variable dependiente		% AGL			Biodiesel obtenido (mL)			Agua residual del proceso (mL)		
Solvente	Tiempo	Media	Límite inferior	Límite superior	Media	Límite inferior	Límite superior	Media	Límite inferior	Límite superior
Etanol	30	25,76	24,183	27,343	461,67	451,396	471,938	789,2	777,06	801,278
	60	14,13	12,553	15,713	473,33	463,062	483,604	767,3	755,22	779,445
	90	12,22	10,640	13,800	481,67	471,396	491,938	760,2	748,06	772,278
Metanol	30	15,09	13,507	16,667	331,67	321,396	341,938	874,3	862,16	886,378
	60	7,90	6,320	9,480	366,67	356,396	376,938	836,2	824,06	848,278
	90	2,57	0,987	4,147	386,67	376,396	396,938	820,5	808,39	832,611
Error típico				0,725			4,714			5,559

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Ing. Marino Barrientos.

Tabla XI. **DHS de Tukey[a,b]**

Variable dependiente		% AGL			Biodiesel obtenido (mL)			agua residual del proceso (mL)	
Tiempo	N	Subconjunto			Subconjunto			Subconjunto	
		1	2	3	1	2	3	1	2
90	6	7,393			434,17			790,333	
60	6		11,017			420,00		801,750	
30	6			20,425			396,67		831,717
Sig.		1	1	1	1	1	1	0,142	1

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Ing. Marino Barrientos.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante la investigación en la producción de biodiesel a escala laboratorio y planta piloto, se presentan en las siguientes tablas y figuras.

Tabla XII. **Resultados obtenidos en la determinación del porcentaje de ácidos grasos libres en las muestras de aceite residual**

	Muestra	Peso de la muestra (g)	Cantidad de etanol (mL)	Cantidad de NaOH 0.25 N (mL)	% Ácidos grasos libres	Promedio de % AGL
Aceite residual	1	7,0500	75	84,50	84,50	**82,79**
	2	7,0600	75	20,30	81,08	
	3	3,5266	100	10,40	83,16	**81,99**
	4	3,5259	100	10,15	81,18	
	5	3,5239	100	10,20	81,63	

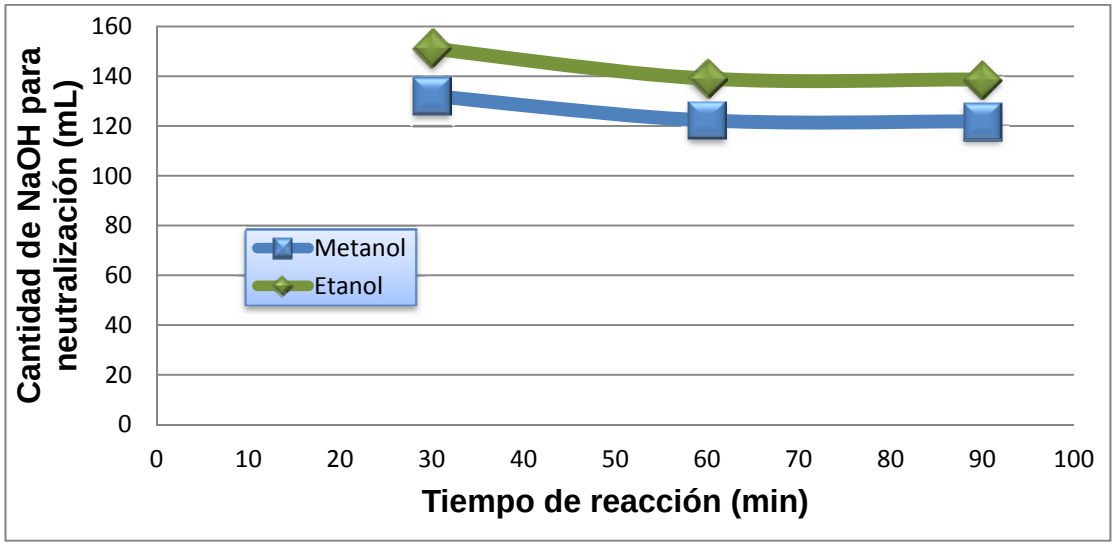
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Tabla XIII. **Resultados obtenidos del proceso de esterificación ácida, variando el alcohol reactante y el tiempo de reacción**

Alcohol	Tiempo (min)	Lote	Cantidad grasa (mL)	Cantidad de metanol (mL)	Cantidad de H2SO4 (mL)	mL de NaOH 5 N	Promedio de mL de NaOH 5 N	Agua para lavado (mL)	Aceite esterificado (mL)	Promedio de aceite esterificado	Aguas residuales (mL)	Promedio de aguas residuales
Metanol	30	1	500	300	25	130,30	132,10	180	355	356,67	780,30	780,43
		2	500	300	25	134,00		180	365		774,00	
		3	500	300	25	132,00		180	350		787,00	
	60	4	500	300	25	125,00	122,17	180	385	385,00	745,00	742,17
		5	500	300	25	120,00		180	380		745,00	
		6	500	300	25	121,50		180	390		736,50	
	90	7	500	300	25	125,00	121,83	180	405	411,67	725,00	715,17
		8	500	300	25	124,00		180	420		709,00	
		9	500	300	25	116,50		180	410		711,50	
Etanol	30	10	500	300	25	156,00	157,17	180	475	480,00	686,00	676,17
		11	500	300	25	155,50		180	480		680,50	
		12	500	300	25	142,00		180	485		662,00	
	60	13	500	300	25	133,00	139,00	180	490	488,33	648,00	655,67
		14	500	300	25	146,00		180	490		661,00	
		15	500	300	25	138,00		180	485		658,00	
	90	16	500	300	25	137,00	138,67	180	495	495,00	647,00	646,67
		17	500	300	25	137,00		180	500		642,00	
		18	500	300	25	142,00		180	490		657,00	

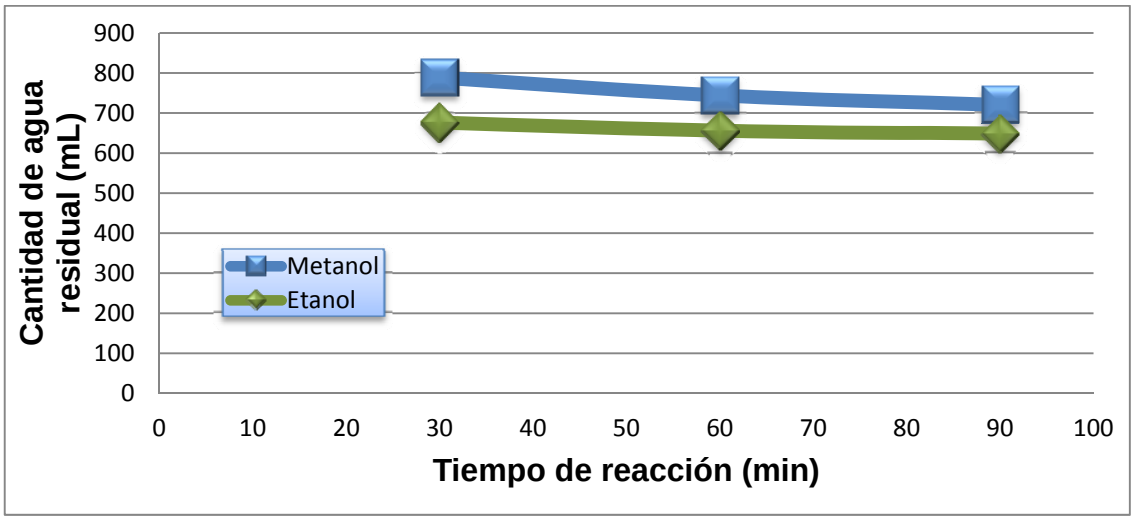
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 9. **Relación entre la cantidad de NaOH utilizado para neutralizar las muestras y el tiempo de reacción de esterificación**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 10. **Relación entre la cantidad de aguas residuales del proceso de esterificación y el tiempo de reacción**



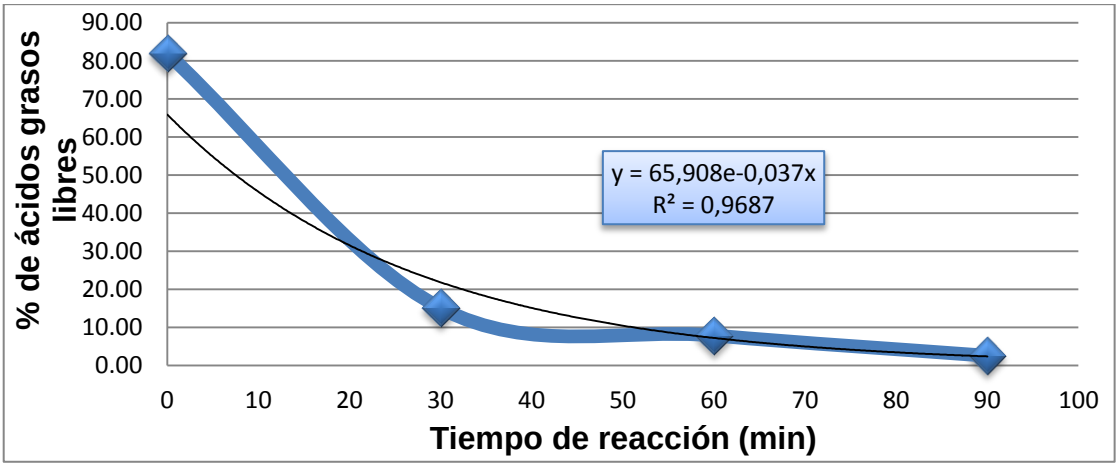
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Tabla XIV. **Resultados obtenidos de la determinación del porcentaje de AGL al finalizar la etapa de esterificación del aceite**

Alcohol	Tiempo (min)	Lote	Peso de la muestra (g)	Cantidad de etanol (mL)	Cantidad de NaOH 0.25 N (mL)	% AGL	Promedio %AGL	% de rendimiento de reacción
Metanol	30	1	7,05	75	13,60	13,60	15,09%	82%
		2	7,05	75	17,50	17,50		
		3	7,07	75	14,20	14,16		
	60	4	7,06	75	6,80	6,79	7,90%	90%
		5	7,04	75	8,10	8,11		
		6	7,05	75	8,80	8,80		
	90	7	7,04	75	3,30	3,30	2,57%	97%
		8	7,05	75	2,50	2,50		
		9	7,06	75	1,90	1,90		
Etanol	30	10	7,07	75	25,50	25,43	25,76%	69%
		11	7,06	75	27,50	27,46		
		12	7,05	75	24,40	24,40		
	60	13	7,06	75	15,00	14,98	14,13%	83%
		14	7,05	75	13,10	13,10		
		15	7,04	75	14,30	14,32		
	90	16	7,05	75	12,40	12,40	12,22%	85%
		17	7,06	75	12,50	12,48		
		18	7,06	75	11,80	11,78		

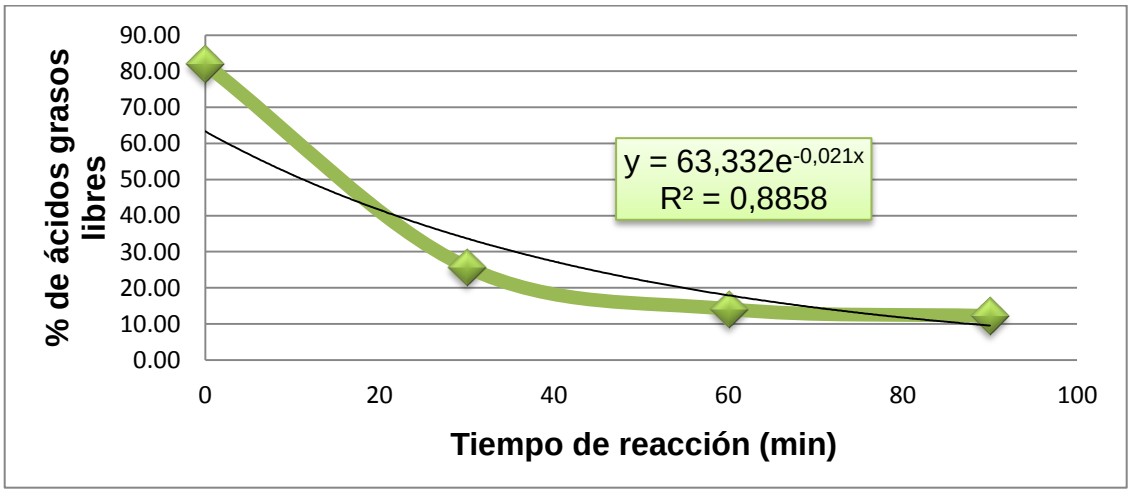
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 11. **Relación del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite y el tiempo de reacción de esterificación utilizando metanol como reactivo**



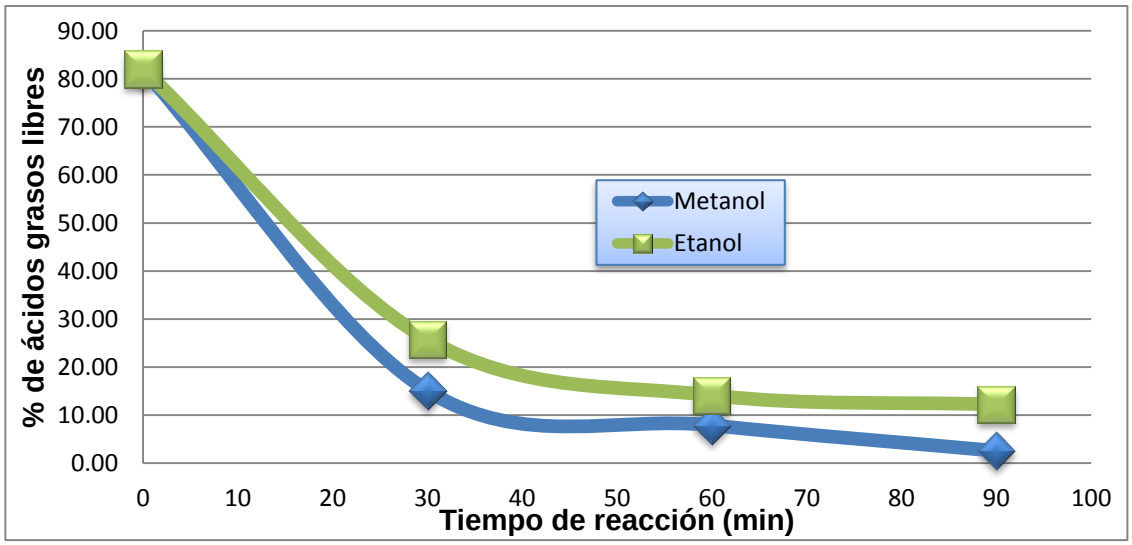
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 12. **Relación del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite y el tiempo de reacción de esterificación utilizando etanol como reactivo**



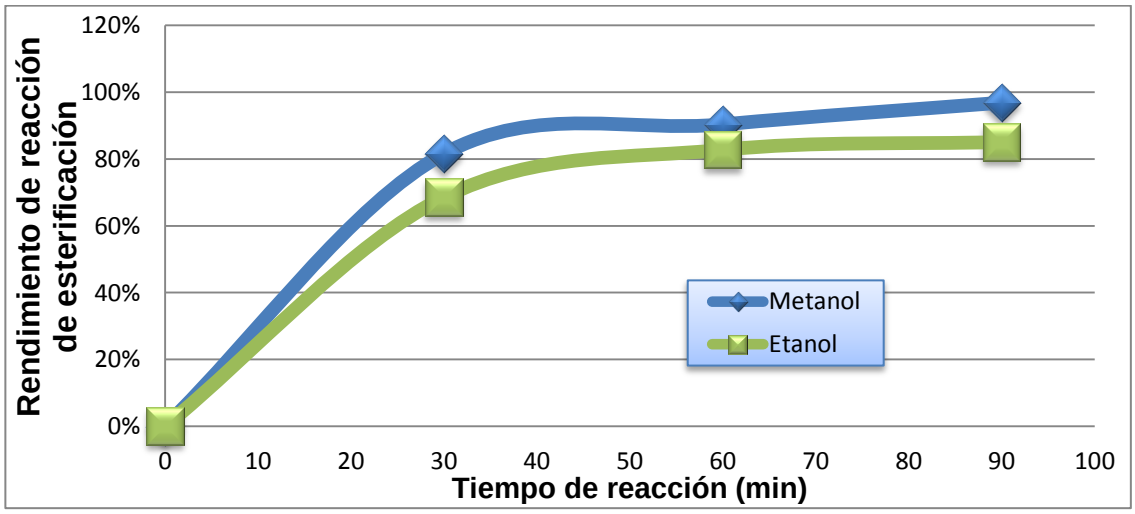
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 13. **Relación del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite y el tiempo de reacción de esterificación**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 14. **Relación entre el rendimiento de reacción de esterificación y el tiempo de reacción de esterificación**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Tabla XV. **Lavado del biodiesel obtenido de esterificación ácida neutralizado**

	Tiempo (min)	Lote	Lavado	Cantidad de agua (mL)	Velocidad de rotación (RPM)	Tiempo de agitación (min)	Resultados	
							Cantidad de biodiesel (mL)	Cantidad de agua mas jabón (L)
Metanol	30	1	1er. Lavado	35,50	300	15	345	45,50
			2do. Lavado	34,50	300	15	335	44,50
		2	1er. Lavado	35,00	300	15	340	45,00
			2do. Lavado	34,00	300	15	330	44,00
		3	1er. Lavado	34,00	300	15	335	39,00
			2do. Lavado	33,50	300	15	330	38,50
	60	4	1er. Lavado	38,50	300	15	375	48,50
			2do. Lavado	37,50	300	15	370	42,50
		5	1er. Lavado	38,00	300	15	375	43,00
			2do. Lavado	37,50	300	15	370	42,50
		6	1er. Lavado	38,50	300	15	370	53,50
			2do. Lavado	37,00	300	15	360	47,00
	90	7	1er. Lavado	39,00	300	15	380	49,00
			2do. Lavado	38,00	300	15	370	48,00
		8	1er. Lavado	42,00	300	15	410	52,00
			2do. Lavado	41,00	300	15	400	51,00
		9	1er. Lavado	41,00	300	15	400	51,00
			2do. Lavado	40,00	300	15	390	50,00
Etanol	30	10	1er. Lavado	47,00	300	15	460	62,00
			2do. Lavado	46,00	300	15	450	56,00
		11	1er. Lavado	48,00	300	15	470	58,00
			2do. Lavado	47,00	300	15	465	52,00
		12	1er. Lavado	48,50	300	15	475	58,50
			2do. Lavado	47,50	300	15	470	52,50
	60	13	1er. Lavado	49,00	300	15	480	59,00
			2do. Lavado	48,00	300	15	475	53,00
		14	1er. Lavado	49,00	300	15	480	59,00
			2do. Lavado	48,00	300	15	475	53,00
		15	1er. Lavado	48,50	300	15	475	58,50
			2do. Lavado	47,50	300	15	470	52,50
	90	16	1er. Lavado	49,50	300	15	485	59,50
			2do. Lavado	48,50	300	15	480	53,50
		17	1er. Lavado	50,00	300	15	490	60,00
			2do. Lavado	49,00	300	15	485	54,00
		18	1er. Lavado	49,00	300	15	485	54,00
			2do. Lavado	48,50	300	15	480	53,50

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

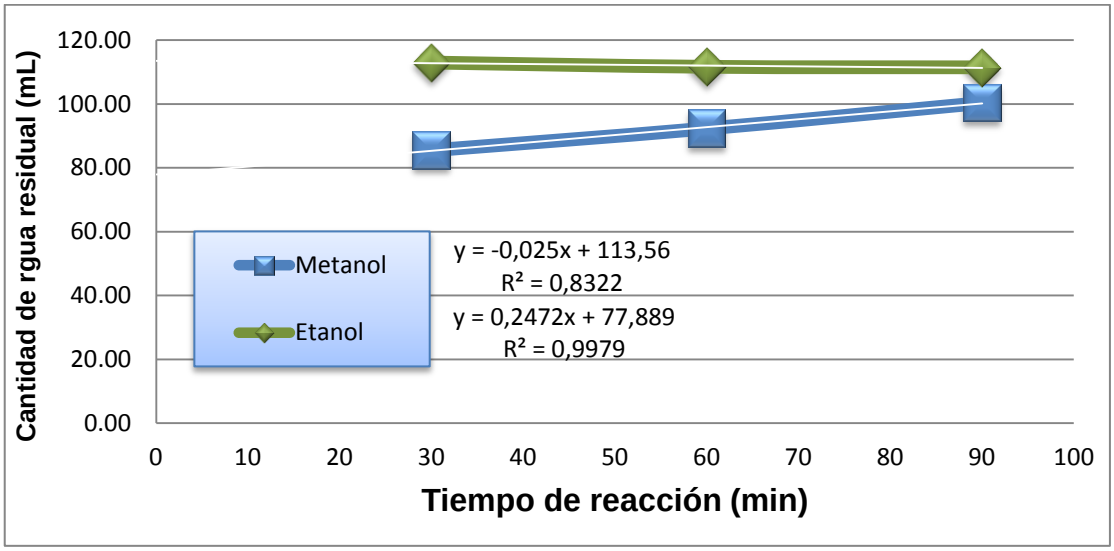
Tabla XVI. **Tabla resumen de producción de biodiesel**

	Tiempo (min)	Lote	Resumen						
			Biodiesel obtenido (mL)	Promedio de obtención (mL)	% de recuperación	Aguas residuales de lavado (mL)	Promedio de aguas residuales de lavado (mL)	Promedio de aguas residuales (mL)	Agua residual total del proceso (mL)
Metanol	30	1	335	331,67	66,33%	90,00	85,50	788,77	874,27
		2	330			89,00			
		3	330			77,50			
	60	4	370	366,67	73,33%	91,00	92,33	743,83	836,17
		5	370			85,50			
		6	360			100,50			
	90	7	370	386,67	77,33%	97,00	100,33	720,17	820,50
		8	400			103,00			
		9	390			101,00			
Etanol	30	10	450	461,67	92,33%	118,00	113,00	676,17	789,17
		11	465			110,00			
		12	470			111,00			
	60	13	475	473,33	94,67%	112,00	111,67	655,67	767,33
		14	475			112,00			
		15	470			111,00			
	90	16	480	481,67	96,33%	113,00	111,50	648,67	760,17
		17	485			114,00			
		18	480			107,50			

,

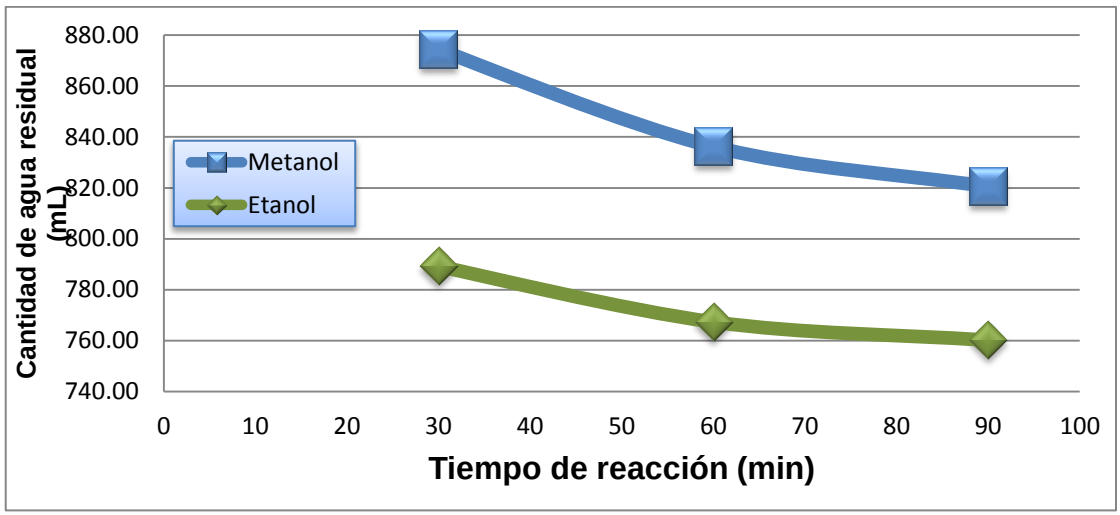
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 15. **Relación entre la cantidad de agua residual obtenida del proceso de lavado y el tiempo de reacción**



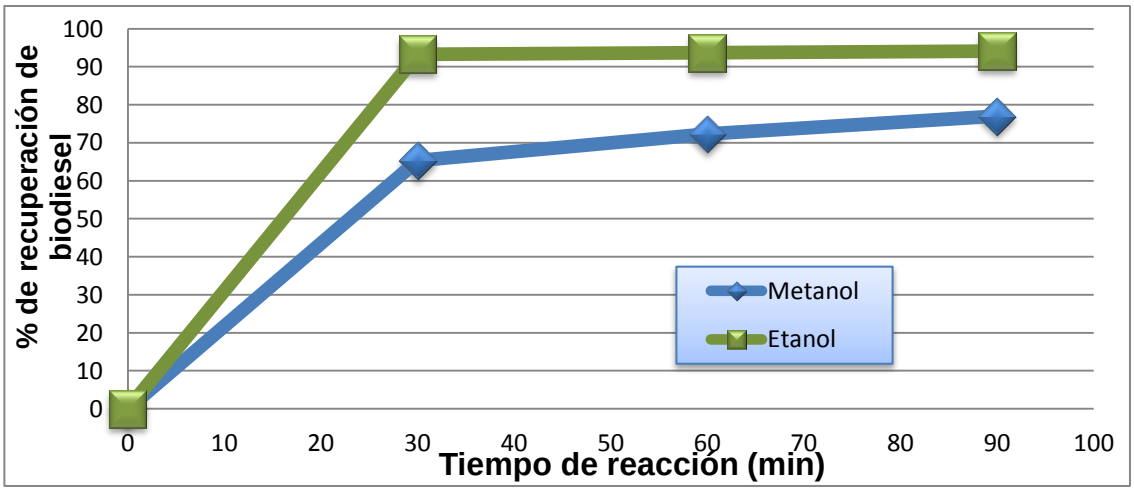
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 16. **Relación entre la cantidad de agua residual obtenida de la producción de biodiesel y el tiempo de reacción**



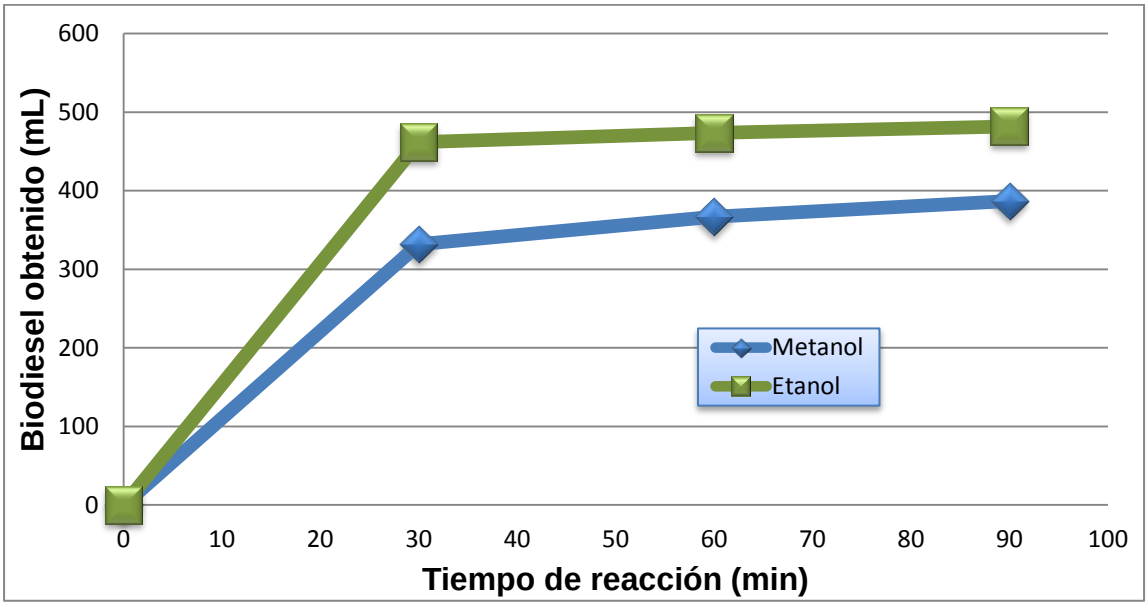
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 17. **Relación entre el porcentaje de recuperación de biodiesel y el tiempo de reacción**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Figura 18. **Relación entre el biodiesel obtenido y el tiempo de reacción**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Tabla XVII. **Resultados obtenidos del proceso de esterificación ácida, variando el alcohol reactante a nivel planta piloto**

	Tiempo (min)	Cantidad grasa (mL)	Cantidad de metanol (mL)	Cantidad de H2SO4 (mL)	mL de NaOH 5 N	% rendimiento de reacción	Agua para lavado (mL)	Aceite esterificado (mL)	Aguas residuales (mL)
Metanol	**90**	20000	12000	1000	4900	93,06%	7000	18000	26900
Etanol	**90**	20000	12000	1000	5600	85,00%	7000	20000	25600

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Tabla XVIII. **Resultados obtenidos de la determinación de % AGL al finalizar la etapa de esterificación del aceite a nivel planta piloto**

	Tiempo (min)	Peso de la muestra (g)	Cantidad de etanol (mL)	Cantidad de NaOH 0.25 N (mL)	% AGL	Promedio % AGL	% rendimiento de reacción
Metanol	**90**	7,05	75	4,95	4,95	5,69%	93,06%
		7,04	75	5,60	5,60		
		7,04	75	6,40	6,40		
		7,04	75	7,30	5,80		
Etanol	**90**	7,05	75	9,70	12,70	12,30%	85,00%
		7,06	75	7,35	12,50		
		7,05	75	8,65	13,10		
		7,03	75	10,30	10,90		

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Tabla XIX. **Lavado del biodiesel obtenido de esterificación ácida neutralizado a nivel planta piloto**

	Tiempo (min)	Cantidad de biodiesel (L)	Cantidad de agua (L)	Velocidad de rotación (RPM)	Tiempo de agitación (min)	Resultados	
						Cantidad de biodiesel (L)	Cantidad de agua más jabón (L)
Metanol	**90**	18	3,6	1725	15	17,00	4,60
		17	3,4	1725	15	16,00	4,40
Etanol	**90**	20	4,0	1725	15	19,00	5,00
		19	3,8	1725	15	18,50	4,30

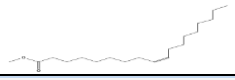
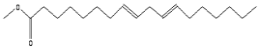
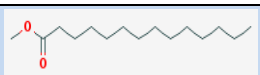
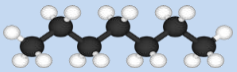
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Tabla XX. **Tabla resumen de producción de biodiesel a nivel planta piloto**

	Tiempo (min)	Resumen				
		Aguas residuales de esterificación (L)	Aguas residuales de lavado (L)	Biodiesel obtenido (L)	% de recuperación	Aguas residuales de la producción (L)
Metanol	**90**	26,90	9,00	16,00	80,00%	35,90
Etanol	**90**	25,60	9,30	18,50	92,50%	34,90

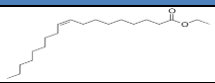
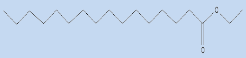
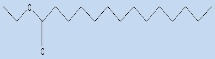
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio LIEXVE.

Tabla XXI. **Resumen del análisis en cromatografía de gases efectuado al biodiesel utilizando metanol**

No.	Área	Nombre	Composición química	Imagen
1	66,30%	Éster metílico del ácido (Z)-9eno-octadecanoico (ácido oleico)	$C_{19}H_{36}O_2$	
2	27,20%	Éster metílico del ácido hexadecanoico (ácido palmítico)	$C_{17}H_{34}O_2$	
3	2,29%	Éster metílico del ácido (Z)-8,-(Z)-11-dieno octadecanoico (ácido linoléico)	$C_{19}H_{34}O_2$	
4	1,11%	Éster metílico del ácido tetradecanoato (ácido mirístico)	$C_{15}H_{30}O_2$	
5	0,99%	Éster metílico (Z,Z,Z)-9,12,15-Trieno octadecanoico (ácido linoléico)	$C_{19}H_{32}O_2$	
6	0,12%	Heptano o heptane	C_7H_{16}	
7	1,95%	Otros ésteres metílicos		

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el laboratorio LIQA, UVG.

Tabla XXII. **Resumen del análisis en cromatografía de gases efectuado al biodiesel utilizando etanol**

No.	Área	Nombre	Composición Química	Imagen
1	65,82%	Éster etílico (z)-9eno-octadecanoico (ácido oleico)	C_{20} H_{38} O_2	
2	24,74%	Éster etílico del ácido exadecanoico (ácido palmítico)	C_{18} H_{36} O_2	
3	4,30%	Éster metílico del ácido 10eno-octadecanoico	$C_{19}H_{36}O_2$	
4	1.02%	Éster etílico del ácido (Z,Z)-9,12-dienooctadecanoico (ácido linoléico)	C_{16} H_{32} O_2	
5	2.34%	Otros ésteres etílicos		
6	1.78%	Otros hidrocarburos de cadena larga		

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el laboratorio LIQA, UVG.

Tabla XXIII. **Resultados de análisis fisicoquímicos del aceite residual y los biodiesel a partir de metanol y etanol**

Descripción de análisis	Método de análisis	Aceite residual	Esterificación con metanol		Esterificación con etanol		Reglamento Técnico Centro Americano
Punto de Inflamabilidad, °C	ASTM D-93	> 120	143		106		130 mín.
Azufre, % masa	ASTM D-129	0,06	0,05		0,09		15 máx.
Corrosión en lámina de cobre, 3 horas a 50 °C	ASTM D-130	--------	1		1		3 máx.
Poder calorífico superior, MJ/Kg	ASTM D-240	39,08	39,81		39,54		
Gravedad API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	25,00	27,80		28,40		Reportar
Gravedad específica, 15.56 °C	ASTM D-287	0,9042	0,8883		0,8849		Reportar
Viscosidad cinemática, 40 °C, mm2/s	ASTM D-445	25,00	6,80		7,20		1,9 – 6,5
Ceniza, % masa	ASTM D-482	0,082	0,041		0,82		0,020 máx.
Índice de cetano, calculado	ASTM D-976	--------	45		45		
Densidad, 15 °C, Kg/m3	ASTM D-1298	904	888		884		Reportar
Agua y eedimentos, % Volumen	ASTM D-1796	7,00	<0,05		<0,05		0,05 máx.
Destilación, 760 mm Hg con base a recuperado, °C	ASTM D-86	--------	Volumen %	Recuperado °C	Volumen %	Recuperado °C	360 máx.
			Punto Inicial	202	Punto Inicial	319	
			5	329	5	324	
			10	332	10	327	
			20	333	20	333	
			30	333	30	336	
			40	333	40	336	
			50	335	50	339	
			60	335	60	342	
			70	336	70	345	
			80	353	80	356	
			90	369	90	359	
			Punto Final	372	Punto Final	359	

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el laboratorio técnicos, MEM, Guatemala.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la investigación realizada se evaluó, analizó, comparó y efectuó la conversión del aceite obtenido como subproducto en el proceso de producción de harinas provenientes del aprovechamiento de los desechos del beneficiado del pollo a biodiesel, se trata de un aceite sólido a temperatura ambiente, de color pardo oscuro y olor característico (desagradable), que, según la terminología americana, se catalogaría dentro del grupo de brown greases, mediante el proceso de esterificación ácida, en la cual se varió el tipo de alcohol entre metanol y etanol, y el tiempo de reacción entre treinta, sesenta y noventa minutos.

La obtención de biodiesel, comúnmente se realiza mediante una reacción de transesterificación de los triglicéridos que constituyen las grasas y aceites con un alcohol sencillo. En esta reacción se generan ésteres, que constituyen lo que se denomina biodiesel y glicerina. Para activar el mecanismo de reacción de transesterificación se agrega hidróxido de sodio a la mezcla de aceite y alcohol, esta adición plantea problemas cuando se opera con aceites de elevada acidez, como pueden ser aceites de fritura usados o aceites animales.

En estos casos, los ácidos grasos libres (AGL) reaccionan con el hidróxido (reacción de saponificación) dando lugar a jabones. La formación de jabones inhibe la reacción de transesterificación y además dificulta la separación de la glicerina y el biodiesel. En la saponificación de los AGL se forma agua, que puede catalizar la formación de más jabones a partir de ésteres o hidrolizar los triglicéridos para formar nuevos AGL.

El empleo de materias primas de bajo costo para producir biodiesel, como pueden ser aceites de fritura usados o grasas animales, plantea el inconveniente de la elevada acidez que presentan estos materiales, tal es el caso de la materia prima utilizada en esta investigación, la cual presentó un 82% de AGL (ver tabla XII), lo que exigió un tratamiento previo de esterificación ácida empleando como catalizador de la reacción ácido sulfúrico, para obtener un aceite con un contenido menor o igual al 2% de AGL apto para el proceso de transesterificación alcalina. Teniendo en cuenta la lentitud del proceso ácido se realizó la esterificación a una temperatura entre el rango de 55 a 60 °C y se trabajó a presión atmosférica local de 0,845 atm de la ciudad de Guatemala a 1530 msnm.

Para purificar el aceite residual se eliminó la humedad por el método de calentamiento elevando la temperatura hasta 130 °C y luego el aceite fue filtrado, eliminando la materia insoluble presente en las muestras que posteriormente fueron analizadas a nivel laboratorio y en planta piloto.

El estudio a nivel laboratorio se realizó mediante lotes que contenían 500 mL de aceite residual en un reactor de vidrio de tres bocas, en el cual se agita la muestra por medio de un agitador magnético ajustado a una varilla de vidrio suspendida desde la parte central de la tapa de la boca central del reactor, en la segunda boca del reactor se introdujo, en un tapón de hule, un termómetro el cual determinó la temperatura a la cual se efectuaba la reacción y en la tercer boca se colocó, mediante un tapón de hule, un condensador de bolas, el cual permitía la recirculación del metanol y otros gases condensables dentro del sistema mientras transcurría la reacción, los tapones de hule fueron reforzados mediante la aplicación papel parafilm en las uniones, el sistema fue calentado y agitado mediante una plancha de calentamiento con agitador magnético marca VWR Hotplace/stirrer F10A de 250 v, agitando la solución a 600 rpm.

El estudio realizado a nivel planta piloto se llevó a cabo utilizando una marmita de agitación de acero inoxidable con chaqueta de calentamiento, utilizando lotes de 20 litros de aceite residual.

Para estudiar cómo afecta al proceso de esterificación el tipo de alcohol se tomaron como variables a estudiar los alcoholes metanol y etanol, utilizando un 60 % respecto al volumen inicial de aceite residual; en el caso de las muestras a escala laboratorio se agregaron 300 mL de alcohol y 12 L para las muestras a escala planta piloto, mientras que para las variables de tiempo de reacción de esterificación se estudiaron tres tiempos: treinta, sesenta y noventa minutos para las muestras a escala laboratorio y se trabajó con un tiempo de noventa minutos para las pruebas a nivel planta piloto. Para activar el mecanismo de reacción de esterificación se agregaron a cada una de las muestras la cantidad de 25 mL de ácido sulfúrico equivalente a 5% con respecto al volumen inicial de aceite residual.

Inmediatamente después de completar el proceso de esterificación ácida se tomaron muestras del aceite esterificado para determinar su porcentaje de ácidos grasos libres, obteniendo como resultado la reducción del porcentaje de ácidos grasos en cada una de las muestras analizadas. Los mejores resultados se dieron conforme aumentó el tiempo de reacción así como al utilizar metanol en la reacción (ver tabla XIV). La reducción del porcentaje de AGL durante la reacción de esterificación utilizando metanol en función del tiempo de reacción se ajusta a un modelo matemático exponencial negativo con un coeficiente de correlación múltiple de 0,97, como se puede observar en forma gráfica en la figura 11, logrando obtener un rendimiento de 97% en cuanto a la reducción del porcentaje de AGL contenido en el aceite luego de noventa minutos de reacción detallado en forma gráfica en la figura 14.

Mientras que en la reacción de esterificación utilizando etanol, la reducción del porcentaje de ácidos grasos libres en función del tiempo de reacción se ajusta a un modelo matemático exponencial negativo con un coeficiente de correlación múltiple de 0,89 como se puede observar en forma gráfica en la figura 12, logrando obtener un rendimiento de 85% en cuanto a la reducción del porcentaje de AGL contenido en el aceite luego de noventa minutos de reacción, detallado en forma gráfica en la figura 14.

Determinando un mayor porcentaje de rendimiento en la reacción de esterificación al utilizar metanol durante un tiempo de esterificación de noventa minutos, y mediante el análisis de varianza se determinó que los solventes no tiene ninguna relación en cuanto a sus resultados, siendo el alcohol metanol mejor que el etanol, y que el tiempo de reacción no tiene similitud en los resultados e influye significativamente dando mejores resultados luego de noventa minutos de reacción.

Posteriormente a la reacción de esterificación se procedió a neutralizar el aceite esterificado, utilizando hidróxido de sodio a una concentración de 5 N, agregando pequeñas cantidades de la solución hasta obtener un pH entre 7 y 7,5, en donde se pudo observar la reducción en la cantidad de hidróxido de sodio utilizado para la neutralización conforme aumentó el tiempo de reacción, agregando la menor cantidad de solución alcalina luego de noventa minutos de reacción, detallado en forma gráfica en la figura 9, esto se debió a que el porcentaje de ácidos grasos descendió con el aumento del tiempo de reacción de esterificación. Debido a este descenso en la cantidad de solución alcalina utilizada para neutralización se obtuvieron menores cantidades de aguas residuales en la producción de biodiesel, determinando que los lotes en que se emplearon noventa minutos de tiempo de reacción, generaron menor cantidad de aguas residuales.

Al adicionar hidróxido de sodio al aceite esterificado los ácidos grasos que no reaccionaron con el alcohol y que estaban disueltos en el aceite esterificado reaccionaron obteniendo la formación de jabones, y el resto de hidróxido de sodio reaccionó con el ácido sulfúrico, catalizador de la reacción de esterificación, formando sales de sulfatos de sodio más agua.

Luego de la neutralización se obtuvo una solución de color café en la cual se encontraban mezclados el biodiesel o los ésteres (de metilo o etilo), jabones, sales de sulfato, ácidos grasos y agua. Para lograr separar los compuestos presentes en la solución anterior, se procedió a realizar un lavado con agua desmineralizada a una relación aproximada de 10:2 de solución:agua, agregando 180 mL de agua a cada lote, agitando durante quince minutos a una velocidad de trescientas revoluciones por minuto, y luego se dejaron reposar las muestras un mínimo de doce horas.

Luego del reposo se observó la separación de las fases debido a sus diferentes densidades y pesos, en la fase más densa o la que se encuentra en el fondo se localiza el agua, las sales de sulfato y jabones (agua residual). Se forma una emulsión entre las fases ocasionada por la formación de jabones y, en la fase superior, se encuentra el biodiesel, el cual es menos denso que los compuestos antes mencionados, las fases se separaron por medio de decantación obteniendo aguas residuales y biodiesel.

Con el objetivo de aumentar su pureza, el biodiesel fue lavado en dos ciclos con agua desmineralizada, agregando una relación 10:1 de biodiesel:agua, y agitando durante quince minutos a trescientas revoluciones por minuto, se esperó a que las fases de biodiesel y agua residual se separaran y por decantación se apartaron las fases dando como resultado agua residual y el biodiesel purificado.

Luego del lavado de dos ciclos con agua desmineralizada, se concluyó con la producción de biodiesel, presentando aumentos en el porcentaje de rendimiento en la producción de biodiesel al aumentar el tiempo de reacción de esterificación, obteniendo los mejores resultados luego de noventa minutos de reacción de esterificación, dando un rendimiento en la producción de biodiesel utilizando metanol del 77,33% y un 96,33% utilizando etanol, obteniendo un porcentaje de aguas residuales de 164,10% utilizando metanol y 152,03% utilizando etanol para las muestras a nivel de laboratorio (ver tabla XVIII). En las muestras a escala planta piloto se obtuvo un rendimiento de producción de biodiesel de 80% utilizando metanol y un 92,5% utilizando etanol, obteniendo un porcentaje de aguas residuales de 179,5% utilizando metanol y un 174,5% utilizando etanol (ver tabla XX), en base a la cantidad de aceite residual inicial en el proceso se producción de biodiesel.

En donde se puede observar un elevado porcentaje de rendimiento de producción de biodiesel utilizando etanol, superando por un 19% al biodiesel producido utilizando metanol en las muestras a nivel de laboratorio, así como en las muestras a nivel planta piloto donde se marca una diferencia de 12,5%. Se obtuvo menor porcentaje de aguas residuales utilizando etanol, disminuyendo un 12% que la producida con metanol en las muestras a nivel de laboratorio, así como en las muestras a nivel planta piloto donde se observa una reducción del 5% utilizando etanol.

Al realizar el análisis de varianza se determinó que no hay similitudes entre los dos alcoholes obteniendo mayor producción de biodiesel al utilizar etanol y que el tiempo de reacción de esterificación no influye significativamente en los resultados con etanol, determinando que el mejor tiempo a utilizar para la producción es de treinta minutos, añadiendo que al utilizar etanol se produce menor cantidad de aguas residuales en el proceso de producción.

También se observó que el biodiesel obtenidos mediante los métodos utilizados no solidifica a temperatura ambiente como el aceite residual inicial del proceso.

Las muestras de los biodiesel obtenidos fueron enviadas al Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala en donde se les hicieron análisis mediante cromatografía de gases, obteniendo muy buenos resultados, pues el biodiesel obtenido a partir de metanol contenía un 99,88% de pureza (contenido de ésteres), lo cual se detalla en la tabla XXI, especificando el porcentaje y detallando el nombre de cada uno de los compuestos presentes en el biodiesel, con similares características se obtuvo el análisis del biodiesel producido a partir de etanol, el cual contenía un 98,22% de pureza (contenido de ésteres), detallado en la tabla XXII (ver apéndice 3).

Por lo que se determinó que los biodiesel producidos durante el estudio realizado están dentro de los parámetros y cumplen con lo establecido en el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07, que especifica un valor por arriba del 96,5% en contenido de ésteres.

Por medio del análisis cromatográfico se pudo determinar que el contenido de triglicéridos presentes en el aceite esterificado es del 0%, por lo que no presentaba mas compuestos susceptibles a ser convertidos en ésteres, por lo tanto no fue necesario realizar el proceso de transesterificación, pues el método de esterificación fue suficiente para convertir a ésteres los ácidos grasos iniciales presentes en el aceite residual.

Las propiedades fisicoquímicas del aceite residual (materia prima) y los dos tipos de biodiesel obtenidos fueron determinadas mediante la implementación de métodos de análisis aprobados por ASTM, realizados en los laboratorios técnicos del Ministerio de Energía y Minas del Gobierno de Guatemala (ver apéndice 2). En la caracterización fisicoquímica del aceite animal residual se determinó que la viscosidad cinemática, el porcentaje en masa de ceniza y el porcentaje en volumen de agua y sedimentos están por arriba de lo permitido y el punto de inflamabilidad, el porcentaje de azufre, el poder calorífico superior y la densidad se encuentran dentro de los parámetros permitidos en el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

En la caracterización fisicoquímica del biodiesel utilizando metanol se determinó que la viscosidad cinemática, la destilación y el porcentaje en masa de ceniza están por arriba de lo permitido y el punto de inflamabilidad, el porcentaje de azufre, el poder calorífico superior, la corrosión en lamina de cobre, el índice de cetano, la densidad, el porcentaje en volumen de agua y sedimentos se encuentran dentro de los parámetros permitidos en el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

En la caracterización fisicoquímica del biodiesel utilizando etanol se determinó que el punto de inflamabilidad, la viscosidad cinemática y el porcentaje en masa de ceniza están por arriba de lo permitido y el punto de inflamabilidad, el porcentaje de azufre, el poder calorífico superior, la corrosión en lámina de cobre, el índice de cetano, la densidad, la destilación, el porcentaje en volumen de agua y sedimentos se encuentran dentro de los parámetros permitidos en el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

Con base en los datos obtenidos en la caracterización fisicoquímica se pudo hacer una interpretación subjetiva, determinando que las características con mayores varianzas en sus resultados fueron: el porcentaje en volumen de agua y sedimentos, que disminuyeron desde un 7% en el aceite residual a menor o igual a 0,05% en los biodiesel obtenidos; el porcentaje de ceniza, que disminuyo significativamente de 0,082% en el aceite residual a 0,041% en el biodiesel obtenido utilizando metanol; y la viscosidad cinemática, disminuyendo de 25 mm^2/s en el aceite residual a 6,8 mm^2/s en el biodiesel obtenido utilizando metanol y 7,2 mm^2/s en el biodiesel obtenido utilizando etanol.

Se puede concluir que la conversión de aceite residual a biodiesel se debe a que la viscosidad de los aceites es demasiado alta, la viscosidad cinemática se limita a un máximo en los normativos por consideraciones de diseño y tamaño de los motores de combustión interna, debido a que en las características del sistema de inyección a mayor viscosidad se aumenta la resistencia a fluir del combustible.

CONCLUSIONES

1. Utilizando la infraestructura de la planta piloto del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE) fue posible realizar la producción de biodiesel a partir del aceite FH5 mediante el método de esterificación ácida.

2. En la caracterización fisicoquímica del aceite FH5 se determinó que la viscosidad cinemática, el porcentaje en masa de ceniza y el porcentaje en volumen de agua y sedimentos están por arriba de los límites permisibles en el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

3. En la caracterización fisicoquímica del biodiesel utilizando metanol se determinó que la viscosidad cinemática, la destilación y el porcentaje en masa de ceniza están por arriba de los límites permisibles en el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

4. En la caracterización fisicoquímica del biodiesel utilizando etanol se determinó que el punto de inflamabilidad, la viscosidad cinemática y el porcentaje en masa de ceniza están por arriba de los límites permisibles en el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.02.43:07.

5. Al comparar las características fisicoquímicas del aceite y del biodiesel obtenido utilizando metanol y etanol se determinó que existen diferencias significativas entre ellas, destacando en los parámetros de viscosidad cinemática y porcentaje en volumen de agua y sedimentos.

6. Se lograron alcanzar porcentajes de rendimiento de biodiesel a escala laboratorio de 77,33% utilizando metanol y 96,33% utilizando etanol; y a escala planta piloto se obtuvieron porcentajes de rendimiento de biodiesel de 80% utilizando metanol y 92,50% utilizando etanol.

7. El menor porcentaje de aguas residuales producidas en la producción de biodiesel a escala laboratorio fue de 164,10% utilizando metanol y un 152,03% utilizando etanol; y a escala planta piloto un 179,50% utilizando metanol y 174,50% utilizando etanol.

RECOMENDACIONES

1. Si se desea producir biodiesel a partir de aceites residuales con alto contenido de ácidos grasos libres mayores a 80%, se debe producir por el método de esterificación, siendo innecesario el proceso de transesterificación.

2. Obtener biodiesel por medio de otros alcoholes, utilizando la reacción de esterificación ácida, determinando su porcentaje de recuperación y el rendimiento de reacción.

3. Realizar un estudio para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites residuales mediante esterificación ácida.

4. Durante la producción de biodiesel a altas temperaturas se debe utilizar un sistema de reflujo, con el fin de recuperar el alcohol evaporado por las altas temperaturas de trabajo.

5. Utilizar una solución de hidróxido de sodio a 5 N, para neutralizar el aceite esterificado debido a que se obtiene una mejor separación de fases entre biodiesel y agua residual.

6. Realizar un estudio comparativo de gases de chimenea al utilizar como combustible el aceite residual o biodiesel producido con dicho aceite, para evaluar el grado de contaminación ambiental que se provoca.

7. La producción de biodiesel con este tipo de aceite FH5, puede ocasionar un mayor impacto ambiental que el del mismo aceite, dado que se obtiene una mayor cantidad de subproductos en el proceso, que pueden ocasionar mayor contaminación.

8. El aceite residual y el biodiesel obtenido pueden ser utilizados en calderas pirotubulares y no es recomendado utilizarlos en motores de combustión interna debido a su alta viscosidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. BENJUMEA, Pedro; AGUDELO, John; RÍOS, Luis. *Biodiesel: producción, calidad y caracterización.* Colección ciencia y tecnología. Medellín: Universidad de Antioquia. 2009. 141 p.

2. *BIODIESEL, Biodiesel en Guatemala*. Asociación Promotora de Combustibles Renovables ACR-Guatemala [en línea] Disponible en Web: <http://www.acrguatemala.com/biodiesel.shtml> [Consulta: 27 de abril de 2011].

3. BORNSTEIN, Joseph; BOWEN, Curt. *Biodiesel: producción y aplicaciones.* Traducción: MÉNDEZ, Annelle; VARGAS, Hugo. Whitman Direct Action [en línea] Disponible en Web: <http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide(espanol).pdf> [Consulta: 21 de febrero 2012].

4. CASTRO, Olga. *Transforman grasa de pollo en biodiesel usando metanol supercrítico*. La flecha tu diario de ciencia y tecnología. 10 de enero 2008. [en línea] Disponible en Web: <http://www.laflecha.net/canales/ciencia/noticias/transforman-grasa-de-pollo-en-biodiesel-usando-metanol-supercritico> [Consulta: 20 de abril de 2011].

5. CASTRO, Paula; COELLO, Javier; CASTILLO, Liliana. *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú*. Soluciones prácticas-ITDG. Lima, Perú: 2007. 176 p. ISBN Nº 978-9972-47-139-0.

6. CUÉLLAR, José. *Diseño de un proceso para producir biodiesel a partir de grasa de cerdo para su utilización en vehículos de distribución*. Trabajo de graduación Ing. Química Industrial. Universidad Rafael Landivar, Facultad de Ingeniería, 2008. 88 p.

7. HERNÁNDEZ, María; GARCÍA, César. *Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm hg, para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida*. Trabajo de graduación Ing. Química. Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, 2009. 147 p.

8. KNOTHE, Gerhard; KRAHL, Jurgen; GERPEN, Jon Van. *The Biodiesel Handbook.* Champaing, Illinois: Editorial AOCS Press. 2005. 286 p. ISBN: 978-1-893997-79-0.

9. LIAZANA R. Diego. *Antecedentes generales sobre biodiesel*. [en línea] Disponible en Web:<http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/ Antecedentes_Biodiesel_D.pdf> [Consulta: 27 de abril de 2011].

10. McCABE, Warren L, SMITH, Julian C; HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 4a ed. México: McGraw-Hill. 2000. ISBN: 84-481-1918-5. 1114 p.

11. MÉNDEZ PAZ, D; et. al. *Materias primas alternativas para la producción de biodiesel (i).* Centro Tecnológico Nacional de Conservación de Productos de la Pesca (ANFAC O-CECOPESCA). Ingeniería Química. No. 459. mayo 2012. [en línea] Disponible en Web: <http://www.ingenieriaquimica.es/files/pdf/iq/459/13ARTICULOMAY.pdf> [Consulta: 14 de julio de 2012].

12. *Reciclaje de aceite quemado y su uso como Biodiesel (B-20, B-50, B-100) en los vehículos de Grupos Objetivo, Guatemala, Centro América.* Biopersa, Guatemala. [en línea] Disponible en Web: <http://www.biopersa.com/proyectos/proyecto-biodiesel> [Consulta: 27 de abril de 2011].

13. Reglamento Técnico Centroamericano. RTCA 75.02.43:07, *Biocombustibles. Biodiesel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel. Especificaciones*. Resolución No. 198-2007 (COMIECO-XLIV).

14. *Se multiplicó por 20 la producción de biodiesel en cuatro años*. Comercio y justicia, Redacción economía. [en línea] Disponible en <Web: http://www.comercioyjusticia.com.ar/2011/01/14/> [Consulta: 24 febrero de 2012].

15. SPRINGMANN, Pedro. *Producirán biodiesel con grasa de pollo***.** 02 de octubre 2006. [en línea] Disponible en Web: <http://www.biodieselspain.com/2006/10/02/produciran-biodiesel-con-grasa-de-pollo/> [Consulta: 20 de abril de 2011].

16. VÁSQUEZ, Karen; CANO, Telma. *Caracterización del aceite de fritura obtenido de la manufactura de productos de pollo y la evaluación del proceso de esterificación de ácidos grasos a escala laboratorio***.** Trabajo de graduación Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 119 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Muestra de cálculo**

1. Cálculo del porcentaje de ácidos grasos libres. En la mayoría de tipos de grasa y aceites se calcula como ácido oleico mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ AGL} = \frac{(\text{mL x N x 28.2})}{\text{PM}} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

%AGL = porcentaje de ácidos grasos libres

mL = mL de Solución de NaOH empleados para la neutralización

N = concentración de la solución de NaOH

28.2 = peso molecular del ácido oleico

PM = peso de muestra en gramos

El valor de acidez se define como el número de miligramos de hidróxido de sodio necesario para neutralizar 1 g de muestra. Para convertir el valor de AGL a valor de acidez multiplicar el valor obtenido de AGL por 1,99.

Continuación del apéndice 1.

Relación entre el porcentaje de ácidos grasos libres y la concentración de la solución

Rango AGL (%)	Muestra (g)	Alcohol (mL)	Concentración alcalina (N)
0,00 a 0,2	56,4 ± 0,2	50	0,1
0,2 a 1,0	28,2 ± 0,3	50	0,1
1,0 a 3,0	7,05 ± 0,05	75	0,25
3,0 a 50,0	7,05 ± 0,05	100	0,25 a 1,0
50,0 a 100	3,525 ± 0,001	100	1
MILLAR, James C. Estadística para química analítica, p. 51.			

2. Cálculo de la media aritmética o promedio

$$\overline{X} = \frac{\sum X_i}{N} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

$\overline{X}$: media aritmética

X_i : dato de la i-ésima observación

N : número de observación

2.1. Cálculo de la media aritmética o promedio para el biodiesel obtenido luego de treinta minutos de reacción utilizando metanol.

$$\overline{X} = \frac{335\ g + 330\ g + 330\ g}{3} = 331.67\ g$$

De esta forma se calcularon los promedios determinados en el presente trabajo de graduación.

Continuación del apéndice 1.

3. Cálculo del porcentaje de recuperación de biodiesel, el porcentaje de recuperación de biodiesel de determinó a partir del aceite residual inicial, como se muestra a continuación:

$$\% \, Re = \frac{\mathrm{BO}}{\mathrm{AR}} \times 100 \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

$\% \, Re$: porcentaje de recuperación de biodiesel

BO : cantidad de biodiesel obtenido al finalizar el proceso

AR : cantidad de aceite residual al inicio del proceso

3.1. Cálculo del porcentaje de recuperación de biodiesel para el biodiesel obtenido luego de treinta minutos de reacción utilizando metanol.

$$\% \, Re = \frac{331.67}{500} \times 100 = 66.33$$

De esta forma se calcularon los porcentajes de recuperación determinados en el presente trabajo de graduación.

4. Cálculo del porcentaje de rendimiento de reacción de esterificación, para esto se tomó como base la reducción del porcentaje de ácidos grasos libres, tomando como 100% el porcentaje de ácidos grasos libres inicial.

$$\% \, RRE = \frac{AGLi - AGLf}{AGLi} \times 100 \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

Continuación del apéndice 1.

Donde:

$\% RRE$: porcentaje de rendimiento de reacción de esterificación

$AGLi$: porcentaje de ácidos grasos inicial del proceso de esterificación

$AGLf$: porcentaje de ácidos grasos final del proceso de esterificación

4.1. Cálculo del porcentaje de rendimiento de la reacción de esterificación luego de treinta minutos de reacción utilizando metanol.

$$\% RRE = \frac{82-15.09}{82} \times 100 = 82$$

De esta forma se calcularon los porcentajes de rendimiento de reacción de esterificación determinados en el presente trabajo de graduación.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Análisis de propiedades fisicoquímicas**

Análisis de propiedades fisicoquímicas del aceite residual

LABORATORIOS TECNICOS

Gobierno de Guatemala
Ministerio de Energía y Minas

PAGINA 1 DE (1)
LAB-REP-1305-12
ORDEN No. L-610-12
GUATEMALA, 02-10-12

RESULTADOS DE ANALISIS

MUESTRA: **Aceite Residual**
PRESENTADA POR: Erick Orellana
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Erick Orellana
PROCEDENCIA: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC, Erick Orellana
LOCALIZACION: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC
FECHA DE MUESTREO: No indica
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 20-09-12
FECHA DE ANALISIS: del 26-09-12 al 02-10-12
PRECIO DE ANALISIS: $ 66.00
ANALISTA: Hever Pérez

DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93	----------	> 120
AZUFRE, % masa	ASTM D-129	----------	0.06
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	----------	(d) 39.08
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	----------	25.0
GRAVEDAD ESPECIFICA, 15.56°C	ASTM D-287	----------	0.9042
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm^2/s (c)	ASTM D-445	----------	25
CENIZA, % masa	ASTM D-482	----------	0.082
DENSIDAD, 15 °C, Kg/m^3	ASTM D-1298	----------	904
AGUA Y SEDIEMNTO, % volumen	ASTM D-1796	----------	7.00

OBSERVACIONES:

a) En el Acuerdo Ministerial No. 234-2011 no existen especificaciones para este producto.
b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio.
c) 1 mm^2 /s es equivalente a 1 cSt.
d) El valor de 39.08 MJ/Kg es equivalente a 9333 Kcal/Kg y a 16800 Btu/Lb.

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS LABORATORIOS TECNICOS AREA DE HIDROCARBUROS GUATEMALA, C. A.

Ing. Julio Villacinda
AREA DE HIDROCARBUROS

Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro
COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS LABORATORIOS TECNICOS GUATEMALA, C. A.

Jvg

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico

Ministerio de Energía y Minas
Diagonal 17, 29-78 zona 11 Las Charcas. Guatemala, Centroamérica.
Teléfonos: (502) 2419-6464 - www.mem.gob.gt

Fuente: elaboración propia, con apoyo de los Laboratorios Técnicos del Ministerio de Energía y Minas, Guatemala.

Continuación del apéndice 2.

Análisis de propiedades fisicoquímicas del biodiesel utilizando etanol

LABORATORIOS TECNICOS

Gobierno de Guatemala
Ministerio de Energía y Minas

PAGINA 1 DE (1)
LAB-REP-1294-12
ORDEN No. L-610-12
GUATEMALA, 02-10-12

RESULTADOS DE ANALISIS

MUESTRA: **Biodiesel**
PRESENTADA POR: Erick Orellana
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Erick Orellana
PROCEDENCIA: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC. Muestra: A partir de Etanol
LOCALIZACION: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC
FECHA DE MUESTREO: No indica
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 20-09-12
FECHA DE ANALISIS: del 26 al 28-09-12
PRECIO DE ANALISIS: $ 93.00
ANALISTA: Roderico Zapeta

DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)	
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93	----------	106	
AZUFRE, % masa	ASTM D-129	----------	0.09	
CORROSION EN LA TIRA DE COBRE, 3 horas a 50 °C	ASTM D-130	----------	1	
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	----------	(d) 39.54	
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	----------	28.4	
GRAVEDAD ESPECIFICA, 15.56°C	ASTM D-287	----------	0.8849	
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm^2/s (c)	ASTM D-445	----------	7.2	
CENIZA, % masa	ASTM D-482	----------	0.082	
INDICE DE CETANO, calculado	ASTM D-976	----------	45	
DENSIDAD, 15 °C, Kg/m^3	ASTM D-1298	----------	884	
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1796	----------	< 0.05	
DESTILACION, 760 mm Hg en base a recuperado, °C	ASTM D-86		VOLUMEN %	RECUPERADO °C
			PUNTO INICIAL	319
			5	324
		----------	10	327
			20	333
			30	336
			40	336
		----------	50	339
			60	342
			70	345
			80	356
		----------	90	359
			PUNTO FINAL (e)	359

OBSERVACIONES:

a) En el Acuerdo Ministerial No. 234-2011 no existen especificaciones para este producto.
b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio.
c) 1 mm^2 /s es equivalente a 1 cSt.
d) El valor de 39.54 MJ/Kg es equivalente a 9443 Kcal/Kg y a 16998 Btu/Lb.
e) Punto final de ebullición.

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS LABORATORIOS TECNICOS AREA DE HIDROCARBUROS GUATEMALA, C. A.

Ing. Julio Villacinda
AREA DE HIDROCARBUROS

Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro
COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS LABORATORIOS TECNICOS GUATEMALA, C. A.

Jvg

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico

Ministerio de Energía y Minas
Diagonal 17, 29-78 zona 11 Las Charcas. Guatemala, Centroamérica.
Teléfonos: (502) 2419-6464 - www.mem.gob.gt

Fuente: elaboración propia, con apoyo de los Laboratorios Técnicos del Ministerio de Energía y Minas, Guatemala.

Continuación del apéndice 2.

Análisis de propiedades fisicoquímicas del biodiesel utilizando metanol

LABORATORIOS TECNICOS

Gobierno de Guatemala
Ministerio de Energía y Minas

PAGINA 1 DE (1)
LAB-REP-1293-12
ORDEN No. L-610-12
GUATEMALA, 01-10-12

RESULTADOS DE ANALISIS

MUESTRA: **Biodiesel**
PRESENTADA POR: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Erick Orellana, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC
PROCEDENCIA: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC. Muestra: A partir de Metanol
LOCALIZACION: Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, USAC
FECHA DE MUESTREO: No indica
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 20-09-12
FECHA DE ANALISIS: del 26 al 28-09-12
PRECIO DE ANALISIS: Colaboración
ANALISTA: Roderico Zapeta

DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)	
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93	----------	143	
AZUFRE, % masa	ASTM D-129	----------	0.05	
CORROSION EN LA TIRA DE COBRE, 3 horas a 50 °C	ASTM D-130	----------	1	
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	----------	(d) 39.81	
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	----------	27.8	
GRAVEDAD ESPECIFICA, 15.56°C	ASTM D-287	----------	0.8883	
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm^2/s (c)	ASTM D-445	----------	6.8	
CENIZA, % masa	ASTM D-482	----------	0.041	
INDICE DE CETANO, calculado	ASTM D-976	----------	45	
DENSIDAD, 15 °C, Kg/m^3	ASTM D-1298	----------	888	
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1796	----------	< 0.05	
DESTILACION, 760 mm Hg en base a recuperado, °C	ASTM D-86		VOLUMEN %	RECUPERADO °C
			PUNTO INICIAL	202
			5	329
		----------	10	332
			20	333
			30	333
			40	333
		----------	50	335
			60	335
			70	336
			80	353
		----------	90	369
			PUNTO FINAL (e)	372

OBSERVACIONES:

a) En el Acuerdo Ministerial No. 234-2011 no existen especificaciones para este producto.
b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio.
c) 1 mm^2 /s es equivalente a 1 cSt.
d) El valor de 39.81 MJ/Kg es equivalente a 9509 Kcal/Kg y a 17117 Btu/Lb.
e) Punto final de ebullición.

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS LABORATORIOS TECNICOS AREA DE HIDROCARBUROS GUATEMALA, C. A.

Ing. Julio Villacinda
AREA DE HIDROCARBUROS

Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro
COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS LABORATORIOS TECNICOS GUATEMALA, C. A.

Jvg

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico

Ministerio de Energía y Minas
Diagonal 17, 29-78 zona 11 Las Charcas. Guatemala, Centroamérica.
Teléfonos: (502) 2419-6464 - www.mem.gob.gt

Fuente: elaboración propia, con apoyo de los Laboratorios Técnicos del Ministerio de Energía y Minas, Guatemala.

Apéndice 3. **Análisis en cromatografía de gases**

Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando metanol, p. 1/4

```
                    LIQA     Library Search Report

  Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\USAC\
  Data File : 110814-001.D
  Title     :
  Acq On    : 14 Aug 2012   9:54
  Operator  : AdeM
  Sample    : Muestrametanol
  Misc      : Muestrametanol
  ALS Vial  : 1   Sample Multiplier: 1

  Search Libraries:   C:\Database\NIST05a.L            Minimum Quality:   0

  Unknown Spectrum:   Apex
  Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#     RT  Area%          Library/ID                  Ref#     CAS#   Qual
_____________________________________________________________________________
  1   7.375  0.12 C:\Database\NIST05a.L
                 Heptane                                3885 000142-82-5 96
                 Heptane                                3886 000142-82-5 95
                 Heptane                                3887 000142-82-5 87

  2  11.678  0.03 C:\Database\NIST05a.L
                 Pentanoic acid, methyl ester           7930 000624-24-8 53
                 Pentanoic acid, methyl ester           7924 000624-24-8 50
                 Pentanoic acid, methyl ester           7932 000624-24-8 47

  3  15.958  0.04 C:\Database\NIST05a.L
                 Heptanoic acid, methyl ester          20130 000106-73-0 80
                 Heptanoic acid, methyl ester          20131 000106-73-0 72
                 Octanoic acid, methyl ester           28925 000111-11-5 72

  4  26.952  0.05 C:\Database\NIST05a.L
                 Cyclopentanetridecanoic acid, meth 122333 024828-61-3 72
                 yl ester
                 Cyclopentaneundecanoic acid, methy 104158 025779-85-5 64
                 l ester
                 Decanoic acid, methyl ester           47246 000110-42-9 60

  5  27.212  0.03 C:\Database\NIST05a.L
                 Benzeneacetic acid, methyl ester      23501 000101-41-7 92
                 Benzeneacetic acid, methyl ester      23502 000101-41-7 70
                 Benzeneacetic acid, methyl ester      23500 000101-41-7 64

  6  28.835  0.03 C:\Database\NIST05a.L
                 Benzenepropanoic acid, methyl este    31861 000103-25-3 38
                 Cyclopentane, 1,3-dimethyl-2-(1-me    16452 061142-31-2 38
                 thylethenyl)-, (1.alpha.,2.alpha.,
                 3.beta.)-
                 2-Hexyne, 4-methyl-                    2801 020198-49-6 38

  7  30.778  1.11 C:\Database\NIST05a.L
                 Methyl tetradecanoate                 86751 000124-10-7 96
                 Methyl tetradecanoate                 86753 000124-10-7 91
                 Methyl tetradecanoate                 86752 000124-10-7 91

  8  31.337  0.25 C:\Database\NIST05a.L
                 7-Hexadecenoic acid, methyl ester, 104151 056875-67-3 95
                  (Z)-
                 6-Octadecenoic acid, methyl ester, 122327 002777-58-4 87
                  (Z)-
                 Methyl Z-11-tetradecenoate            85339 1000130-82-8 83

  9  32.101  0.04 C:\Database\NIST05a.L
                 Methyl trans-9-(2-butylcyclopentyl 122337 108708-61-8 43
                 )nonanoate
                 9-Hexadecenoic acid, methyl ester, 104156 001120-25-8 38
                  (Z)-
                 6,9-Dimethyl-8,9-dihydro-7H-[1,2,4  42503 1000147-15-9 38
                 ]triazolo[4,3-b][1,2,4]triazepin-7
                 -one

glicerina.M Mon Aug 27 07:59:11 2012                                Page: 1
```

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Continuación del apéndice 3.

Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando metanol, p. 2/4

```
                         LIQA     Library Search Report

  Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\USAC\
  Data File : 110814-001.D
  Title     :
  Acq On    : 14 Aug 2012   9:54
  Operator  : AdeM
  Sample    : Muestra metanol
  Misc      : Muestra metanol
  ALS Vial  : 1   Sample Multiplier: 1

  Search Libraries:   C:\Database\NIST05a.L              Minimum Quality:   0

  Unknown Spectrum:   Apex
  Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#     RT  Area%          Library/ID                  Ref#     CAS#    Qual
------------------------------------------------------------------------------

 10  32.556  0.12 C:\Database\NIST05a.L
                  Pentadecanoic acid, methyl ester     96272 007132-64-1 58
                  Cyclopentaneundecanoic acid, methy 104158 025779-85-5 53
                  l ester
                  Tetradecanoic acid, 12-methyl-, me   96284 005129-66-8 53
                  thyl ester

 11  32.615  0.09 C:\Database\NIST05a.L
                  Pentadecanoic acid, methyl ester     96270 007132-64-1 91
                  Hexadecanoic acid, methyl ester     105643 000112-39-0 90
                  Pentadecanoic acid, methyl ester     96272 007132-64-1 60

 12  34.394 27.24 C:\Database\NIST05a.L
                  Pentadecanoic acid, 14-methyl-, me 105662 005129-60-2 98
                  thyl ester
                  Pentadecanoic acid, 14-methyl-, me 105659 005129-60-2 97
                  thyl ester
                  Hexadecanoic acid, methyl ester    105644 000112-39-0 97

 13  36.091  0.62 C:\Database\NIST05a.L
                  9-Hexadecenoic acid, methyl ester, 104156 001120-25-8 90
                   (Z)-
                  6-Octadecenoic acid, methyl ester  122301 052355-31-4 49
                  10-Undecenoic acid, methyl ester    55673 000111-81-9 49

 14  37.860 66.30 C:\Database\NIST05a.L
                  9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl e 122323 000112-62-9 99
                  ster
                  9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl e 122321 000112-62-9 99
                  ster
                  6-Octadecenoic acid, methyl ester  122301 052355-31-4 99

 15  39.225  0.99 C:\Database\NIST05a.L
                  9,12,15-Octadecatrienoic acid, met 119876 000301-00-8 99
                  hyl ester, (Z,Z,Z)-
                  cis,cis,cis-7,10,13-Hexadecatriena  81217 056797-43-4 87
                  9,12,15-Octadecatrien-1-ol, (Z,Z,Z 101506 000506-44-5 72
                  )-

 16  39.920  2.29 C:\Database\NIST05a.L
                  8,11-Octadecadienoic acid, methyl  121092 056599-58-7 95
                  ester
                  8,11-Octadecadienoic acid, methyl  121095 056599-58-7 95
                  ester
                  9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-,  121107 000112-63-0 94
                  methyl ester

 17  40.448  0.32 C:\Database\NIST05a.L
                  8,11-Octadecadienoic acid, methyl  121092 056599-58-7 96
                  ester
                  10,13-Octadecadienoic acid, methyl 121100 056554-62-2 93
                   ester
                  1,E-8,Z-10-Tetradecatriene          51353 080625-31-6 87

glicerina.M Mon Aug 27 07:59:11 2012                                Page: 2
```

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Continuación del apéndice 3.

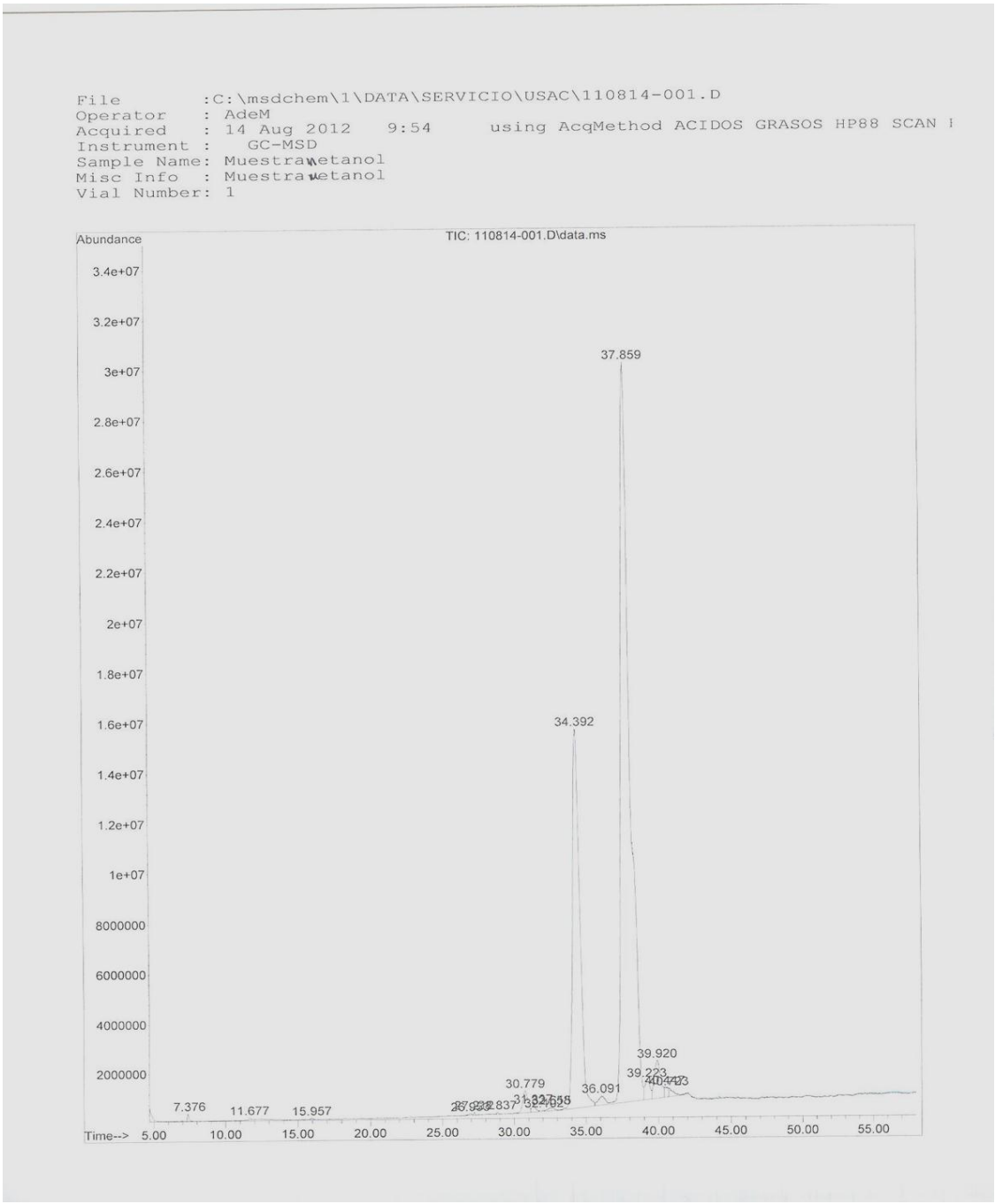
Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando metanol, p. 3/4

```
                          LIQA      Library Search Report

  Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\USAC\
  Data File : 110814-001.D
  Title     :
  Acq On    : 14 Aug 2012   9:54
  Operator  : AdeM
  Sample    : Muestra metanol
  Misc      : Muestra metanol
  ALS Vial  : 1   Sample Multiplier: 1

  Search Libraries:   C:\Database\NIST05a.L              Minimum Quality:   0

  Unknown Spectrum:   Apex
  Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#     RT  Area%          Library/ID                   Ref#     CAS#    Qual
------------------------------------------------------------------------------

 18  40.721  0.33 C:\Database\NIST05a.L
                 9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-,  121105 000112-63-0 83
                 methyl ester
                 9,12-Octadecadienoic acid, methyl  121113 002566-97-4 74
                 ester, (E,E)-
                 11,14-Octadecadienoic acid, methyl 121099 056554-61-1 56
                  ester

glicerina.M Mon Aug 27 07:59:11 2012                              Page: 3
```

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Continuación del apéndice 3.

Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando metanol, p. 4/4



Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Continuación del apéndice 3.

Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando etanol, p. 1/5

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\USAC\
Data File : 110814-002.D
Title :
Acq On : 14 Aug 2012 10:58
Operator : AdeM
Sample : Muestra etanol
Misc : Muestra etanol
ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	7.302	0.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane	3885	000142-82-5	96
			Heptane	3886	000142-82-5	95
			Heptane	3887	000142-82-5	93
2	12.606	0.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Pentanoic acid, ethyl ester	13045	000539-82-2	96
			Pentanoic acid, ethyl ester	13036	000539-82-2	89
			Butanoic acid, 3-methyl-, ethyl es ter	13104	000108-64-5	86
3	17.077	0.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptanoic acid, ethyl ester	28926	000106-30-9	87
			Heptanoic acid, ethyl ester	28915	000106-30-9	86
			Heptanoic acid, ethyl ester	28928	000106-30-9	86
4	29.450	0.04	C:\Database\NIST05a.L			
			Benzenepropanoic acid, ethyl ester	41449	002021-28-5	46
			n-Butyl-.beta.-phenylpropionate	61284	020627-49-0	25
			9-Tetradecenal, (Z)-	64379	053939-27-8	25
5	30.632	0.05	C:\Database\NIST05a.L			
			Oleic Acid	113355	000112-80-1	11
			Methyl 6-O-[1-methylpropyl]-.beta. -d-galactopyranoside	91574	1000126-15-7	10
			n-Hexadecanoic acid	96235	000057-10-3	10
6	30.701	0.01	C:\Database\NIST05a.L			
			9-Tetradecenal, (Z)-	64379	053939-27-8	70
			3,11-Tetradecadien-1-ol	64381	1000131-36-2	55
			E-9-Tetradecenal	64371	1000131-35-7	48
7	31.642	1.02	C:\Database\NIST05a.L			
			Undecanoic acid, 2,8-dimethyl-, me thyl ester	77324	055955-74-3	89
			Dodecanoic acid, ethyl ester	77291	000106-33-2	87
			Tetradecanoic acid, ethyl ester	96268	000124-06-1	87
8	32.147	0.21	C:\Database\NIST05a.L			
			(E)-9-Octadecenoic acid ethyl este	131091	006114-18-7	70
			E-9-Tetradecenal	64371	1000131-35-7	64
			3,11-Tetradecadien-1-ol	64381	1000131-36-2	64
9	32.670	0.10	C:\Database\NIST05a.L			
			cis-11,12-Epoxytetradecen-1-ol	105500	1000130-82-5	11
			3-Hexen-2-one, 3-cyclohexyl-4-ethy 1-	62952	1000150-19-1	10
			9-Tetradecenal, (Z)-	64380	053939-27-8	10
10	33.371	0.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Ethyl 9-hexadecenoate	113357	054546-22-4	42
			Ethyl 9-decenoate	55625	067233-91-4	38
			9-Octadecenoic acid, ethyl ester	131087	006512-99-8	25

glicerina.M Mon Aug 27 08:01:49 2012 Page: 1

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Continuación del apéndice 3.

Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando etanol, p. 2/5

```
                    LIQA     Library Search Report

  Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\USAC\
  Data File : 110814-002.D
  Title     :
  Acq On    : 14 Aug 2012  10:58
  Operator  : AdeM
  Sample    : Muestra  etanol
  Misc      : Muestra  etanol
  ALS Vial  : 2   Sample Multiplier: 1

  Search Libraries:   C:\Database\NIST05a.L              Minimum Quality:   0

  Unknown Spectrum:   Apex
  Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#     RT  Area%          Library/ID                    Ref#     CAS#    Qual
---------------------------------------------------------------------------
 11  33.635  0.04 C:\Database\NIST05a.L
                 Heptadecanoic acid                    105612 000506-12-7 35
                 3-Ethyl-4-oxohexanoic acid, ethyl      47042 061454-96-4 15
                 ester
                 Tetradecanoic acid                     77276 000544-63-8 14

 12  34.453  0.40 C:\Database\NIST05a.L
                 Methyl 5,9-dimethyldecanoate           67158 068043-22-1 18
                 Methyl cyclohexanepropionate           36099 020681-51-0 15
                 Hexadecanoic acid, methyl ester       105643 000112-39-0 11

 13  35.176 24.74 C:\Database\NIST05a.L
                 Hexadecanoic acid, ethyl ester        114844 000628-97-7 97
                 Pentadecanoic acid, ethyl ester       105647 041114-00-5 93
                 Tetradecanoic acid, ethyl ester        96268 000124-06-1 93

 14  36.032  0.18 C:\Database\NIST05a.L
                 Phenanthrene, tetradecahydro-          51356 005743-97-5 11
                 Tricyclo[5.1.0.0(3,5)]octane-2,6-d     51206 016650-33-2 11
                 ione, 1,3,5,7-tetramethyl-
                 1-Phenylthio-1-tert-butyl-3-acetox    111696 065302-94-5 10
                 y-2-propanone

 15  36.195  0.11 C:\Database\NIST05a.L
                 Cyclobutanecarboxylic acid, 2-meth     72767 1000299-13-3 10
                 yloct-5-yn-4-yl ester
                 1-Acetoxy-1-(9-fluorenyl)ethane        93473 063839-88-3  9
                 9-Tetradecenal, (Z)-                   64380 053939-27-8  9

 16  36.405  0.28 C:\Database\NIST05a.L
                 E-11-Hexadecenoic acid, ethyl este    113379 1000245-71-9 44
                 Ethyl 9-hexadecenoate                 113358 054546-22-4 20
                 Cycloundecanecarboxylic acid, 1-me     75920 007362-89-2 11
                 thyl-, methyl ester

 17  36.828  0.48 C:\Database\NIST05a.L
                 (E)-9-Octadecenoic acid ethyl este    131091 006114-18-7 18
                 9-Octadecenoic acid, ethyl ester      131087 006512-99-8 18
                 Ethyl 9-hexadecenoate                 113358 054546-22-4 18

 18  36.878  0.04 C:\Database\NIST05a.L
                 Ethyl 9-decenoate                      55625 067233-91-4 15
                 9-Octadecenoic acid, ethyl ester      131087 006512-99-8 11
                 Ethyl 9-hexadecenoate                 113357 054546-22-4 11

 19  36.932  0.18 C:\Database\NIST05a.L
                 1-Propanesulfonic acid, 3-chloro-,    142689 037169-07-6 10
                  3,5-dichloro-2,6-dimethyl-4-pyrid
                 yl ester
                 Phenanthrene, tetradecahydro-          51356 005743-97-5 10
                 2-Butanone, 4-hydroxy-4-(5-methoxy     84333 1000163-29-7  9
                 -2-nitrophenyl)-

 20  37.001  0.28 C:\Database\NIST05a.L

glicerina.M Mon Aug 27 08:01:49 2012                                Page: 2
```

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Continuación del apéndice 3.

Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando etanol, p. 3/5

```
                    LIQA     Library Search Report

  Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\USAC\
  Data File : 110814-002.D
  Title     :
  Acq On    : 14 Aug 2012  10:58
  Operator  : AdeM
  Sample    : Muestra  etanol
  Misc      : Muestra  etanol
  ALS Vial  : 2   Sample Multiplier: 1

  Search Libraries:   C:\Database\NIST05a.L              Minimum Quality:   0

  Unknown Spectrum:   Apex
  Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#     RT  Area%          Library/ID                    Ref#     CAS#    Qual
_____________________________________________________________________________
                (E)-9-Octadecenoic acid ethyl este 131091 006114-18-7 15
                Phenanthrene, tetradecahydro-       51356 005743-97-5 10
                2(1H)-Naphthalenone, 3,4,4a,5,6,7,  93343 024795-35-5  9
                8,8a.alpha.-octahydro-5.alpha.-hyd
                roxy-4a.alpha.,7,7-trimethyl-, ace
                tate

 21  38.506 65.82 C:\Database\NIST05a.L
                Ethyl Oleate                       131052 000111-62-6 99
                Ethyl Oleate                       131053 000111-62-6 99
                9-Octadecenoic acid, ethyl ester   131087 006512-99-8 94

 22  39.816  1.40 C:\Database\NIST05a.L
                1,E-8,Z-10-Tetradecatriene          51353 080625-31-6 11
                Cyclobutanecarboxylic acid, 2-meth  72767 1000299-13-3 11
                yloct-5-yn-4-yl ester
                Phenanthrene, tetradecahydro-       51356 005743-97-5 11

 23  40.485  1.20 C:\Database\NIST05a.L
                1,E-8,Z-10-Tetradecatriene          51353 080625-31-6 89
                9-Octadecyne                        92238 035365-59-4 89
                10-Octadecynoic acid, methyl ester 121082 026543-36-2 81

 24  40.526  1.70 C:\Database\NIST05a.L
                1,E-8,Z-10-Tetradecatriene          51353 080625-31-6 93
                9,12-Octadecadienoic acid, ethyl e 129833 007619-08-1 84
                ster
                Linoleic acid ethyl ester          129810 000544-35-4 84

 25  41.231  0.17 C:\Database\NIST05a.L
                Oleic Acid                         113355 000112-80-1 42
                1-Buten-3-one, 1-(2-carboxy-4,4-di  52525 1000196-97-9 15
                methylcyclobutenyl)-
                2-Heptanone, 6-(3-acetyl-2-methyl-  72777 065868-86-2 11
                1-cyclopropen-1-yl)-6-methyl-

 26  41.344  0.14 C:\Database\NIST05a.L
                9-Borabicyclo[3.3.1]nonane, 9-(2-p  41609 1000162-57-7 25
                ropen-1-yloxy)-
                9-Tetradecenal, (Z)-                64380 053939-27-8 20
                Tricyclo[5.1.0.0(3,5)]octane-2,6-d  51206 016650-33-2 15
                ione, 1,3,5,7-tetramethyl-

 27  41.617  0.41 C:\Database\NIST05a.L
                cis-11,12-Epoxytetradecen-1-ol     105500 1000130-82-5 25
                3-Hexen-2-one, 3-cyclohexyl-4-ethy  62952 1000150-19-1 11
                l-
                9-Tetradecenal, (Z)-                64380 053939-27-8 11

 28  42.263  0.17 C:\Database\NIST05a.L
                1,5-Dimethyl-4-allylaminocytosine   42554 138002-90-1 38
                Anthracene, 9,10-dihydro-9,10-dime  85423 1000197-56-7 38
                thanol
                9,10-Propanoanthracen-11-ol, 9,10-  92232 110163-81-0 27

glicerina.M Mon Aug 27 08:01:49 2012                                Page: 3
```

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Continuación del apéndice 3.

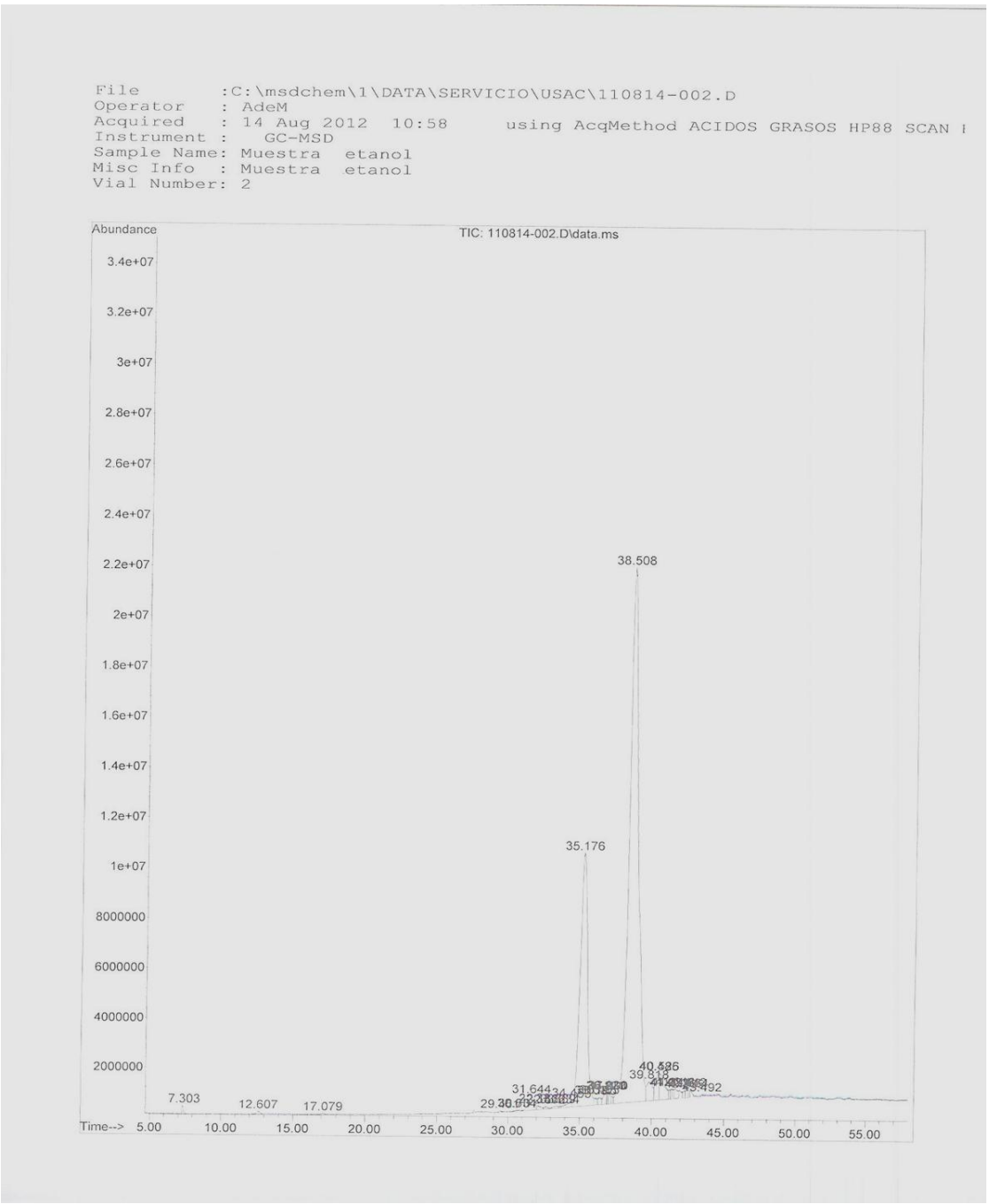
Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando etanol, p. 4/5

```
                    LIQA     Library Search Report

  Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\USAC\
  Data File : 110814-002.D
  Title     :
  Acq On    : 14 Aug 2012  10:58
  Operator  : AdeM
  Sample    : Muestra  etanol
  Misc      : Muestra  etanol
  ALS Vial  : 2   Sample Multiplier: 1

  Search Libraries:   C:\Database\NIST05a.L              Minimum Quality:   0

  Unknown Spectrum:   Apex
  Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#     RT  Area%          Library/ID                    Ref#     CAS#    Qual
____________________________________________________________________________
                dihydro-11-methyl-

 29  42.441  0.22 C:\Database\NIST05a.L
                 1-Buten-3-one, 1-(2-carboxy-4,4-di  52525 1000196-97-9 25
                 methylcyclobutenyl)-
                 2-Heptanone, 6-(3-acetyl-2-methyl-  72777 065868-86-2 11
                 1-cyclopropen-1-yl)-6-methyl-
                 Benzyloxy(diisopropyl)silane        72664 1000279-90-4 10

 30  42.554  0.14 C:\Database\NIST05a.L
                 2-Heptanone, 6-(3-acetyl-2-methyl-  72777 065868-86-2 15
                 1-cyclopropen-1-yl)-6-methyl-
                 1-Buten-3-one, 1-(2-carboxy-4,4-di  52525 1000196-97-9 11
                 methylcyclobutenyl)-
                 Acetamide, 2-amino-2-hydroximino-N  42529 220898-58-8 11
                 -phenyl-

 31  43.491  0.02 C:\Database\NIST05a.L
                 Oleic Acid                         113355 000112-80-1 15
                 1-Buten-3-one, 1-(2-carboxy-4,4-di  52525 1000196-97-9 11
                 methylcyclobutenyl)-
                 Heptadecanoic acid                 105613 000506-12-7 10

glicerina.M Mon Aug 27 08:01:49 2012                              Page: 4
```

Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Continuación del apéndice 3.

Análisis en cromatografía de gases para el biodiesel producido utilizando etanol, p. 5/5



Fuente: elaboración propia, con apoyo del Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Apéndice 4. **Análisis estadístico de los datos obtenidos utilizando el método HSD de Tukey**

Pruebas de los efectos inter-sujetos variable dependiente: % AGL

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Solvente	352,805	1	352,805	223,678	0,000
Tiempo	542,939	2	271,470	172,112	0,000
Solvente * Tiempo	16,243	2	8,122	5,149	0,024
Error	18,927	12	1,577		
Total corregida	930,915	17			

a. R cuadrado = 0,980 (R cuadrado corregida = 0,971)

Variable dependiente: % AGL

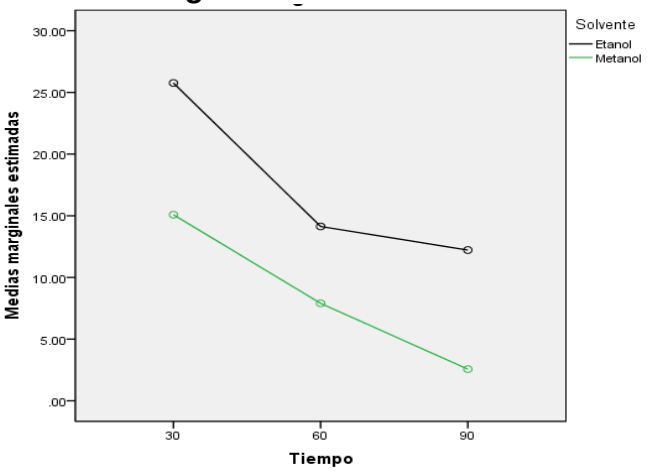
Solvente	Tiempo	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Etanol	30	25,763	0,725	24,183	27,343
	60	14,133	0,725	12,553	15,713
	90	12,220	0,725	10,640	13,800
Metanol	30	15,087	0,725	13,507	16,667
	60	7,900	0,725	6,320	9,480
	90	2,567	0,725	0,987	4,147

DHS de Tukey[a,b]

Tiempo	N	Subconjunto		
		1	2	3
90	6	7,3933		
60	6		11,0167	
30	6			20,425
Sig.		1,000	1,000	1,000

Continuación del apéndice 4.

Medias marginales estimadas de % AGL



Pruebas de los efectos inter-sujetos variable dependiente: biodiesel obtenido (ml)

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Solvente	55001,389	1	55001,389	825,021	0,000
Tiempo	4302,778	2	2151,389	32,271	0,000
Solvente * Tiempo	952,778	2	476,389	7,146	0,009
Error	800,000	12	66,667		
Total corregida	61056,944	17			

a. R cuadrado = 0,987 (R cuadrado corregida = 0,981)

Variable dependiente: biodiesel obtenido (ml)

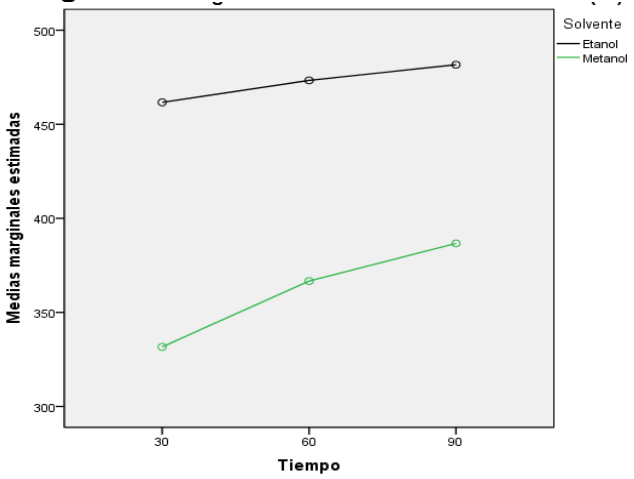
Solvente	Tiempo	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Etanol	30	461,667	4,714	451,396	471,938
	60	473,333	4,714	463,062	483,604
	90	481,667	4,714	471,396	491,938
Metanol	30	331,667	4,714	321,396	341,938
		366,667	4,714	356,396	376,938
		386,667	4,714	376,396	396,938

Continuación del apéndice 4.

DHS de Tukey[a,b]

Tiempo	N	Subconjunto		
		1	2	3
30	6	396,67		
60	6		420,00	
90	6			434,17
Sig.		1,00	1,00	1,00

Medias marginales estimadas de biodiesel obtenido (ml)



Pruebas de los efectos inter-sujetos variable dependiente: total de agua residual del proceso (ml)

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Solvente	22955,102	1	22955,102	247,629	0,000
Tiempo	5481,843	2	2740,922	29,568	0,000
Solvente * Tiempo	475,121	2	237,561	2,563	0,118
Error	1112,393	12	92,699		
Total corregida	30024,460	17			

a. R cuadrado = 0,963 (R cuadrado corregida = 0,948)

Continuación del apéndice 4.

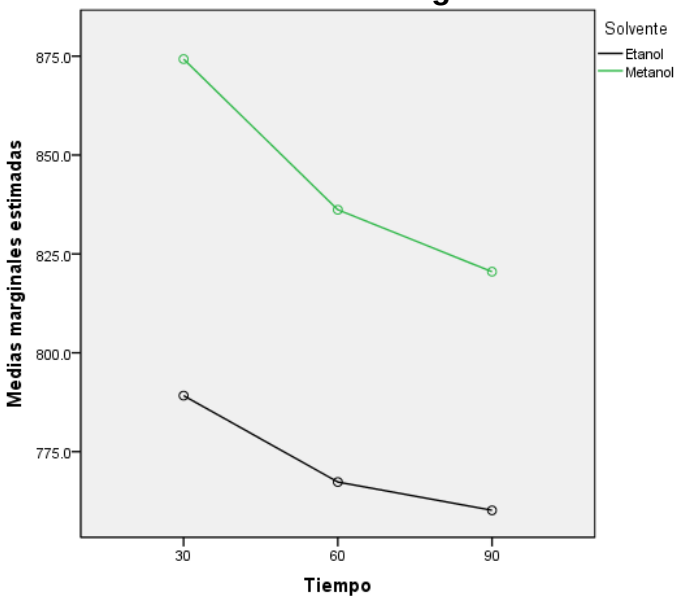
Variable dependiente: total de agua residual del proceso (ml)

Solvente	Tiempo	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Etanol	30	789,167	5,559	777,055	801,278
	60	767,333	5,559	755,222	779,445
	90	760,167	5,559	748,055	772,278
Metanol	30	874,267	5,559	862,155	886,378
	60	836,167	5,559	824,055	848,278
	90	820,500	5,559	808,389	832,611

DHS de Tukey[a,b]

Tiempo	N	Subconjunto	
		1	2
90	6	790,333	
60	6	801,750	
30	6		831,717
Sig.		0,142	1,000

Medias marginales estimadas de total de agua residual del proceso (ml)

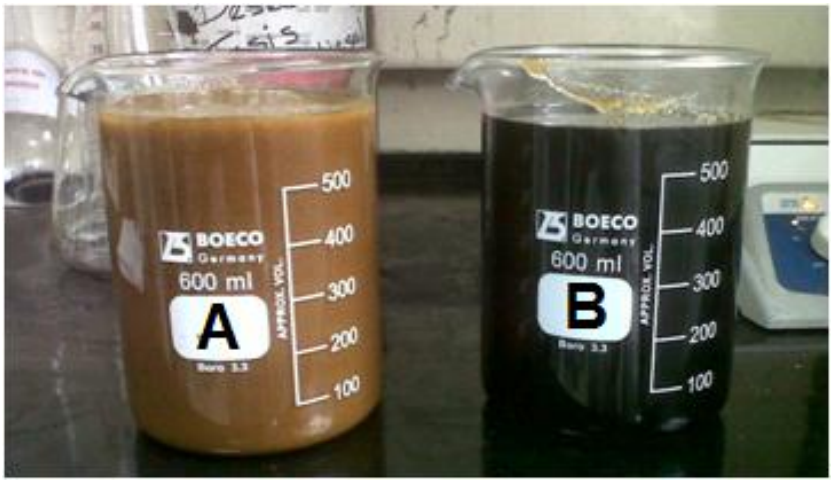


Apéndice 5. **Fotografías de la investigación a escala laboratorio**

Detalle de la unidad de secado y filtrado del aceite residual

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Detalle del aceite residual: A) Aceite residual, B) Aceite residual pre tratado.



Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Continuación del apéndice 5.

Detalle de muestras para determinación del % AGL

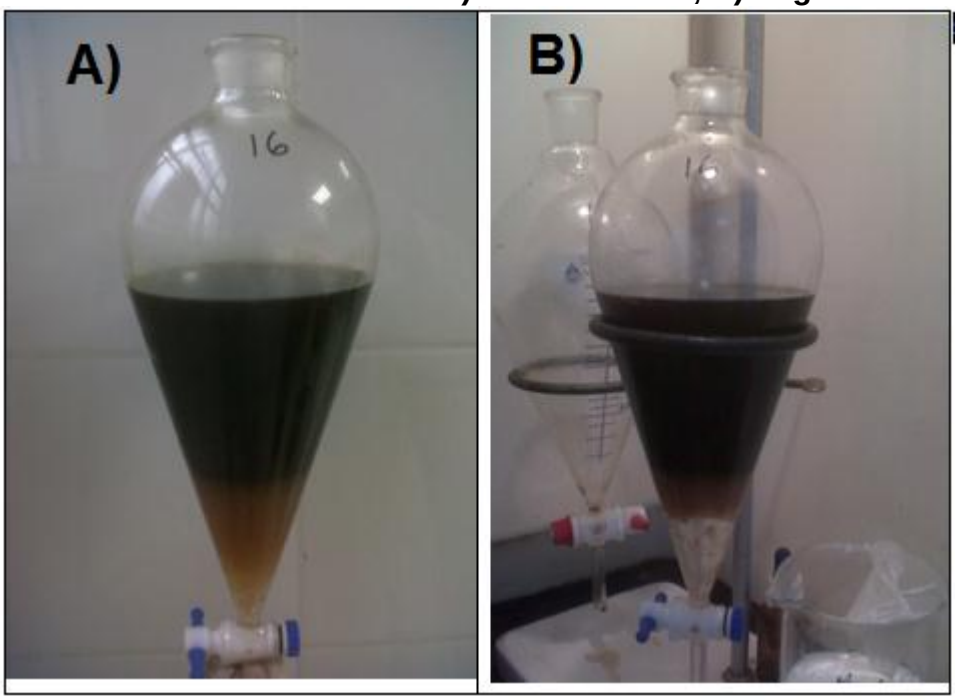
Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Detalle del reactor de tres bocas, y los instrumentos utilizados en la producción de biodiesel

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Continuación del apéndice 5.

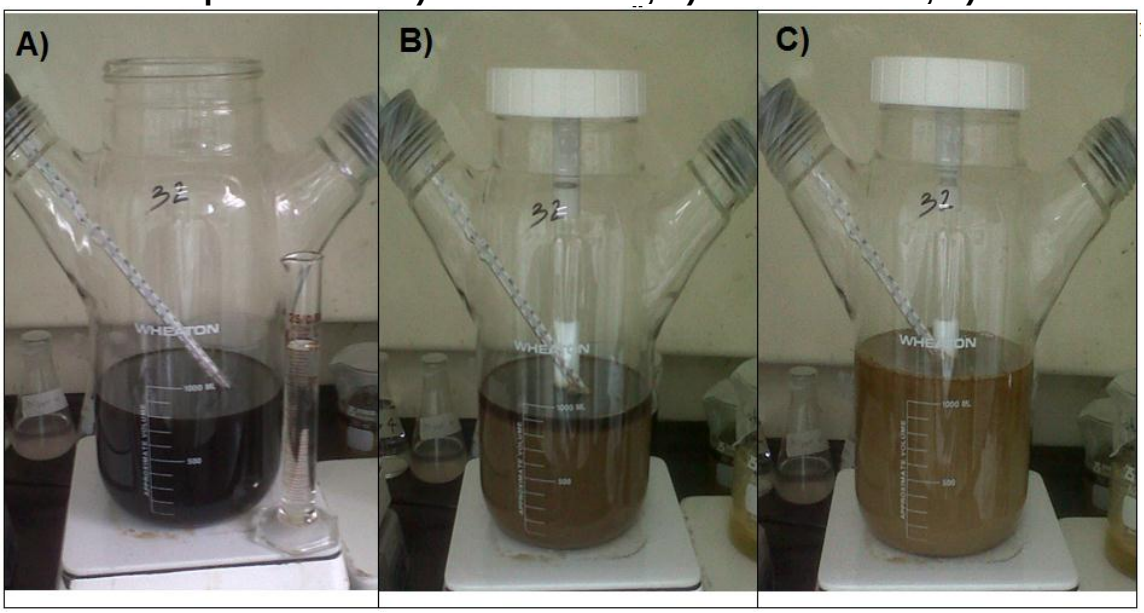
Detalle del lavado del biodiesel. A) Primer lavado, B) Segundo lavado



Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Continuación del apéndice 5.

Detalle del proceso de: A) Esterificación, B) Neutralización, C) Lavado



Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC.

Detalle de la unidad de decantación del biodiesel y el agua residual

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Apéndice 6. **Fotografías de la investigación a nivel planta piloto**

Detalle del aceite residual o materia prima

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Detalle del tablero de mando o panel de control de la caldera

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Continuación del apéndice 6.

Detalle de la caldera Columbia utilizada en la investigación, caldera piro tubular de 10 Hp

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

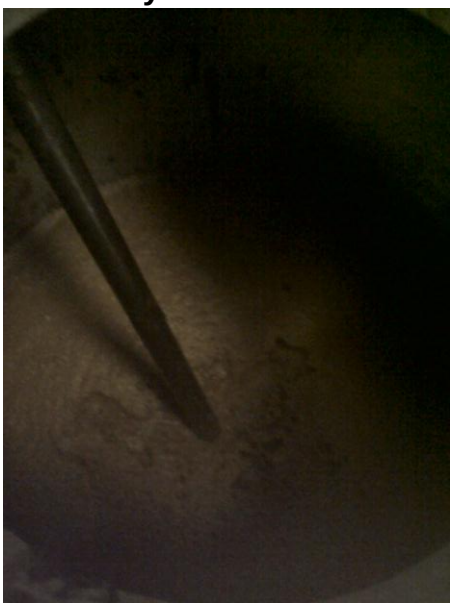
Continuación del apéndice 6.

Detalle de la marmita utilizada en la investigación, marmita de agitación de acero inoxidable

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Continuación del apéndice 6.

Detalle del proceso de esterificación y neutralización



Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Detalle del reposo y decantado del agua residual y el biodiesel

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Continuación del apéndice 6.

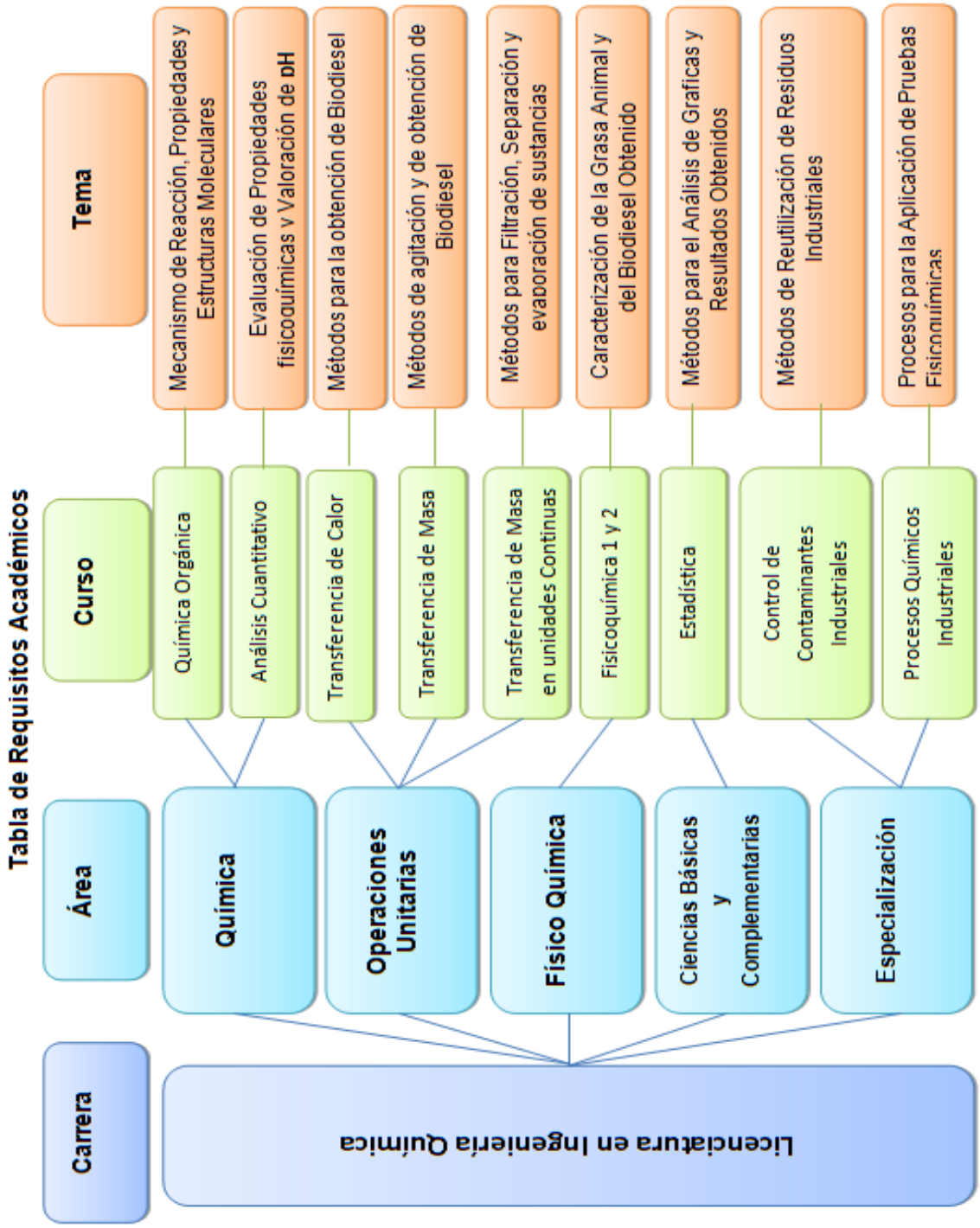
Detalle de la separación del agua residual del lavado del biodiesel

Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Detalles del biodiesel obtenido a nivel planta piloto

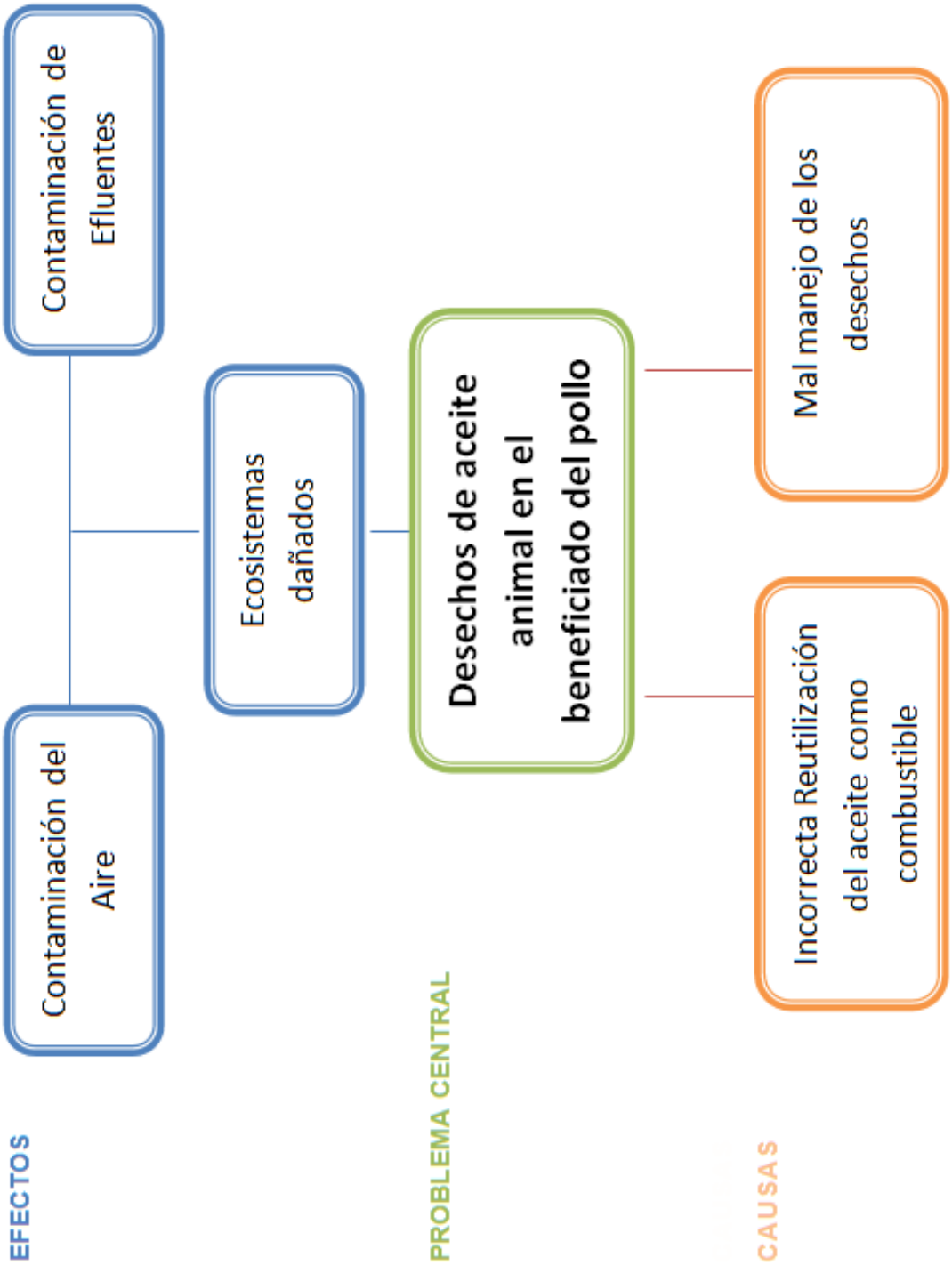
Fuente: LIEXVE, Química Industrial, Centro de Investigación de Ingeniería, USAC

Apéndice 7. **Tabla de Requisitos Académicos**



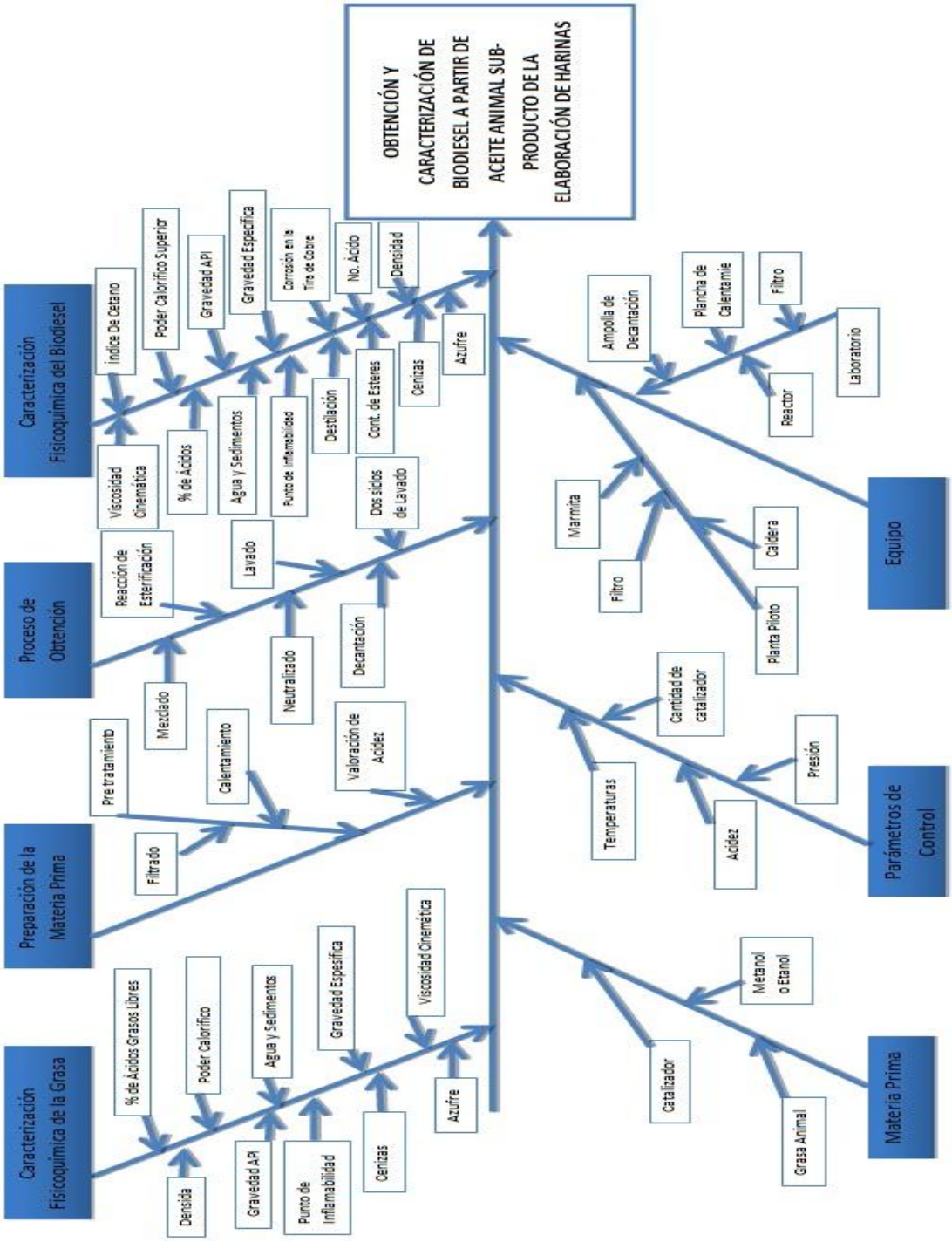
Fuente: elaboración propia

Apéndice 8. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia

Apéndice 9. **Diagrama de Ishikawa**



Fuente: elaboración propia

ANEXO

Especificación de calidad para el biodiesel (B100)

Características	Unidades	Método de Análisis	Valores
Aditivos	----	----	Reportar
Contenido de Ésteres	Fracción de masa (%masa)	EN 14103	0.965 (96.5) mín
Gravedad API a 15.56 °C(60 °F) o Densidad a 15 °C	°API; Kg/m^3	ASTM D-287; ASTM D-1298	Reportar
Estabilidad a la oxidación, 110 °C	H	EN 14112	6.0 mín
Punto de inflamación (“Flash point”)	°C	ASTM D 93	130.0 mín
Agua y sedimentos	Fracción de volumen (%volumen)	ASTM D 2709	0.00050 (0.050) máx.
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm^2/s	ASTM-D 445	1.9 – 6.5
Ceniza sulfatada	Fracción de masa (%masa)	ASTM D 874	0.00020 (0.020) máx.
Contenido de Azufre total	mg/kg	ASTM D 5453	15 máx.
Corrosión tira de cobre, 3 h, 50 °C	----	ASTM D 130	N° 3 máx.
Número de cetano	----	ASTM D 613	47 mín.
Punto de enturbiamiento	°C	ASTM D 2500	Reportar
Residuo de Carbón	Fracción de masa (%masa)	ASTM D 4530	0.00050 (0.050) máx.
Número ácido	mg KOH/g	ASTM D 664	0.50 máx.
Glicerina libre	Fracción de masa (%masa)	ASTM D 6584	0.00020 (0.020) máx.
Glicerina total	Fracción de masa (%masa)	ASTM D 6584	0.00240 (0.240) máx.
Contenido de Fósforo	Fracción de masa (%masa)	ASTM D 4951	0.00001 (0.001) máx.
Temperatura de destilación, temperatura equivalente atmosférica, 90% recuperado	°C	ASTM D 1160	360 máx.
Sodio (Na) y potasio (K) combinados	mg/kg	EN 14538	5 máx.
Calcio (Ca) y magnesio (Mg) combinados	mg/kg	EN 14538	5 máx.

Fuente: Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07