



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

**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**

**Karen Elizabeth Vásquez Villeda**

Asesorada por la Inga. Telma Maricela Cano Morales

Guatemala, mayo de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**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

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**KAREN ELIZABETH VÁSQUEZ VILLEDA**

ASESORADA POR LA INGA. TELMA MARICELA CANO MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, MAYO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
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 Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Váldez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## 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:

**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**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 25 de octubre de 2010.



Karen Elizabeth Vásquez Villeda



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

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, zona 12, Guatemala, Centroamérica  
Teléfono directo: (502) 2418-9118 PBX: 2418-8000 extensión 1599 Extensión 86214

Guatemala, 25 de Octubre de 2011  
Ref.EIQ.TG.224.2011

Ingeniero.  
**Williams Guillermo Álvarez Mejía**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el **Acta TG-063-2011-A-DI** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del **"Diseño del Trabajo de Investigación"**, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria, **Karen Elizabeth Vásquez Villeda**, identificada con carné No. **2005-15990**, titulado: **"CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE RESIDUAL DE FRITURAS Y COMPARACIÓN CON PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ACEITE DE JATROPHA PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL A NIVEL DE LABORATORIO"**, el cual ha sido asesorado por la Ingeniera Química **Telma Maricela Cano Morales**.

Siguiendo procedimientos internos, la Escuela de Ingeniería Química ha procedido a aprobarlo con la siguiente modificación en el título: **"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"**. Se recomienda autorice a la estudiante, proceder con la fase de ejecución del proyecto de investigación del trabajo de graduación de acuerdo al cronograma aprobado,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. César Alfonso García Guerra  
Revisor del diseño del Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Guatemala, 28 de octubre de 2011

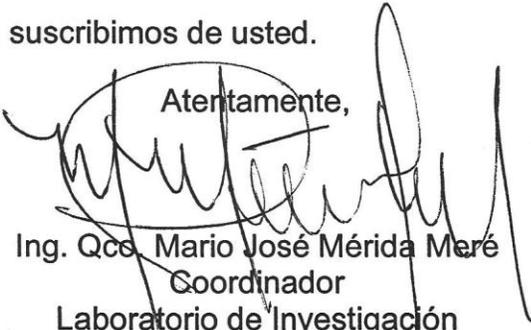
Ingeniero  
Williams Álvarez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Álvarez:

Por medio de la presente HACEMOS CONSTAR que hemos revisado y dado nuestra aprobación al informe final del trabajo de graduación titulado **“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”**, de la estudiante de Ingeniería Química Karen Elizabeth Vásquez Villeda quien se identifica con el carné número 2005-15990.

Sin otro particular nos suscribimos de usted.

Atentamente,

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

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





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria, zona 12, Guatemala, Centroamérica  
Teléfono directo: (502) 2418-9118 PBX: 2418-8000 extensión 1599 Extensión 86214

Guatemala, 29 de Noviembre de 2011  
Ref.EIQ.TG.314.2011

DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Director:

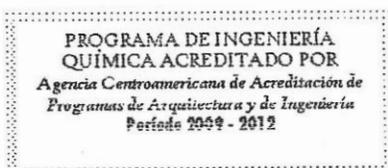
Como consta en el Acta TG-63-2010-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria, Karen Elizabeth Vásquez Villeda, identificada con carné No. 2005-15990, titulado: "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 cual ha sido asesorado por la Ingeniera Química Telma Maricela Cano Morales

Habiendo encontrado el referido informe final satisfactorio, se procede a recomendarle autorice al estudiante Vásquez Villeda, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía.  
Tribunal que revisó el informe final  
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



FORMANDO INGENIEROS QUÍMICOS EN GUATEMALA Desde 1939



Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



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 de la estudiante, **KAREN ELIZABETH VÁSQUEZ VILLEDA** titulado: "**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**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

  
Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



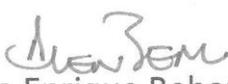
Guatemala, mayo de 2012

Cc: Archivo  
WGAM/ale



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: **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**, presentado por la estudiante universitaria **Karen Elizabeth Vásquez Villeda**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno  
Decano en Funciones



Guatemala, 4 de mayo de 2012.

/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme la vida y haberme proporcionado fuerzas para salir victoriosa en los momentos difíciles en el transcurso de mi carrera.
<b>Mis padres</b>	Jesús Vásquez y María Villeda por su amor y apoyo brindado durante toda la carrera.
<b>Mis hermanos</b>	Angélica y Belin por la confianza depositada en mí.
<b>Mis abuelas</b>	Angélica Vásquez y Gregoria Villeda por estar pendientes siempre de mí y por las diferentes formas de apoyo mostradas durante mi carrera.
<b>Mi novio</b>	Walter Herrera por apoyarme en los momentos más difíciles e importantes de mi carrera.
<b>Mis asesores</b>	Ingeniera Química Telma Maricela Cano e Ingeniero Químico Mario Mérida, por depositar su confianza en mí para el desarrollo de esta investigación y por los conocimientos transmitidos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por darme vida y todo lo necesario para poder alcanzar esta meta.
<b>Mis padres</b>	Jesús Vásquez y María Villeda por haberme dado la oportunidad de estudiar.
<b>Mi familia</b>	Por su apoyo brindado durante mi carrera.
<b>Mis amigos</b>	Eddy Velásquez, Randy Aroch, Hans Pop, Sirley Villafuerte, Jorge Juárez, Byron Maldonado, Heydy Godinez, Shilo Camposeco, Carmen Navas, por la amistad brindada y por compartir momentos de alegría, éxito y sobre todo por apoyarme en los momentos difíciles durante la formación de mi vida profesional.
<b>Mi novio</b>	Walter Herrera por enseñarme a tener paciencia y por el apoyo incondicional brindado para lograr culminar mi carrera profesional.
<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por abrirme sus puertas y permitirme formarme como profesional de la ingeniería.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS/HIPOTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Aceites fijos.....	5
2.1.1. Lípidos relacionados con ácidos grasos .....	7
2.1.2. Aceites y grasas naturales .....	7
2.2. Fundamentos de los métodos físico químicos para el análisis de la materia prima.....	9
2.2.1. Densidad.....	10
2.2.2. Punto de ebullición.....	10
2.2.3. Humedad .....	10
2.2.4. Ácidos grasos libres .....	10
2.2.5. Índice de yodo.....	10
2.2.6. Índice de peróxido.....	11
2.2.7. Índice de saponificación.....	11
2.3. Aceite/grasa .....	11
2.3.1. Características fisicoquímicas de grasas y aceites .....	11

2.3.2.	Función del aceite.....	12
2.3.3.	Alteración del aceite .....	12
2.3.3.1.	Hidrólisis .....	13
2.3.3.2.	Autooxidación .....	14
2.3.4.	Polimerización .....	15
2.4.	Esterificación.....	16
2.4.1.	Grupo alquilo .....	17
2.4.1.1.	Clasificación de los grupos alquilo.....	17
2.4.2.	Ácidos carboxílicos .....	18
2.4.2.1.	Características y propiedades de los ácidos carboxílicos.....	19
2.4.3.	Química de la esterificación.....	19
2.5.	Reglamento técnico centroamericano.....	21
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables .....	25
3.2.	Delimitación del estudio.....	26
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	26
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	27
3.5.	Técnica.....	29
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	29
3.6.1.	Diseño del experimento .....	30
3.6.1.1.	Tratamientos a realizar .....	30
3.6.1.2.	Diseño experimental .....	32
3.6.1.3.	Unidad experimental.....	36
3.6.1.4.	Metodología experimental .....	36
3.6.1.4.1.	Determinación densidad .....	36
3.6.1.4.2.	Determinación acidez .....	37
3.6.1.4.3.	Determinación humedad .....	40

3.6.1.4.4.	Determinación índice de yodo por Wijs .....	41
3.6.1.4.5.	Índice de saponificación .....	44
3.6.1.4.6.	Índice de peróxidos .....	46
3.6.1.4.7.	Obtención de metanol residual....	47
3.6.1.4.8.	Proceso de esterificación ácida...	47
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información....	48
3.7.1.	Formato de recolección de información .....	48
3.8.	Análisis estadístico .....	49
3.8.1.	Análisis de varianza.....	50
4.	RESULTADOS .....	53
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
	CONCLUSIONES .....	71
	RECOMENDACIONES.....	73
	BIBLIOGRAFÍA .....	75
	APÉNDICES .....	79
	ANEXOS.....	117



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Estructuras de ésteres carbónicos y ésteres fosfóricos .....	16
2.	Estructuras y fórmulas de los grupos derivados del butano .....	18
3.	Estructura de un ácido carboxílico .....	18
4.	Esterificación de un ácido carboxílico .....	20
5.	Detalle de la reacción de esterificación.....	21
6.	Detalle de la unidad utilizada para medición de la densidad.....	37
7.	Detalle de unidad utilizada para titulación en la determinación de acidez .....	39
8.	Detalle de unidad utilizada en la titulación para la determinación de índice de yodo.....	44
9.	Curva para observar variación en densidades obtenidas del aceite vegetal residual evaluado en las 6 semanas a una temperatura de 24°C.....	54
10.	Curva para observar variación en porcentaje de humedad obtenido en el aceite vegetal residual de las 6 semanas estudiadas.....	55
11.	Curva para observar variación en porcentaje de ácidos grasos libres presentes en las 6 diferentes muestras de aceite vegetal residual.....	56
12.	Curva para observar variación del punto de ebullición obtenido en las 6 diferentes muestras de aceite vegetal residual .....	57
13.	Curva para observar variación de índices de yodo en función de las 6 semanas evaluadas del aceite vegetal residual .....	58

14.	Curva para observar variación en índices de peróxidos en función de las 6 semanas evaluadas de aceite vegetal residual .....	59
15.	Curva para observar variación en los índices de saponificación en función de las 6 semanas evaluadas de aceite vegetal residual ...	60
16.	Curva de correlación para determinar la cantidad de metanol sin reaccionar en el proceso de esterificación ácida en función de ácidos grasos libres iniciales.....	61
17.	Curva de correlación para determinar el grado de neutralización de ácidos grasos libres en función de la demanda de metanol en la reacción de esterificación ácida.....	62
18.	Curva de correlación para determinar índice de peróxidos finales en función de ácidos grasos libres finales.....	63
19.	Curva de correlación para determinar la cantidad de ácido sulfúrico necesario en proceso de esterificación ácida .....	64

## TABLAS

I.	Aceites grasos comunes .....	8
II.	Composiciones de ácidos grasos de aceites vegetales crudos, determinados mediante el Centro Guatemalteco de Producción más limpia (CGL) de muestras auténticas (expresadas en porcentaje del contenido total de ácidos grasos) .....	22
III.	Límites máximos y mínimos permitidos por norma RTCA 67.04.40:07, Alimentos y bebidas procesados, grasas y aceites, especificaciones.....	23
IV.	Variables de mayor influencia en esterificación .....	25
V.	Recursos humanos disponibles .....	26

VI.	Cristalería necesaria para la realización del proceso de caracterización fisicoquímica de aceite residual y esterificación ácida.....	27
VII.	Equipo necesario para realizar el proceso de caracterización fisicoquímica del aceite residual y esterificación ácida .....	28
VIII.	Reactivos necesarios para realizar caracterización fisicoquímica del aceite residual y esterificación ácida .....	28
IX.	Tratamientos realizados en caracterización fisicoquímica .....	31
X.	Densidad determinada en las diferentes semanas evaluadas.....	32
XI.	Humedad determinada en las diferentes semanas evaluadas .....	32
XII.	Ácidos grasos libres determinados en las diferentes semanas evaluadas .....	33
XIII.	Punto de ebullición determinada en las diferentes semanas evaluadas .....	33
XIV.	Índice de yodo determinado en las diferentes semanas evaluadas...	34
XV.	Índice de peróxido determinado en las diferentes semanas evaluadas .....	34
XVI.	Índice de saponificación en las diferentes semanas evaluadas.....	35
XVII.	Parámetros evaluados después del proceso de esterificación ácida .....	35
XVIII.	Relación entre el porcentaje de ácidos grasos libres y la concentración de la solución titulante .....	40
XIX.	Relación de índices de yodo contra peso de muestra a utilizar .....	43
XX.	Formato para caracterización del aceite residual.....	48
XXI.	Formato de parámetros obtenidos en el proceso de esterificación ácida .....	49
XXII.	Cuadro del análisis de varianza .....	51
XXIII.	Parámetros fisicoquímicos de aceite vegetal residual en las diferentes semanas evaluadas .....	52

XXIV. Resultado de análisis de varianza con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en la caracterización fisicoquímica del aceite vegetal residual ..... 64

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$X_i$	Dato de la i-ésima observación
$\rho$	Densidad de la solución (g/mL)
$\bar{X}$	Media aritmética
$N$	Número de observación
$P$	Peso (g)
%	Porcentaje
$V$	Volumen (mL)



## GLOSARIO

<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
<b>Ácidos grasos</b>	Grupo de ácidos orgánicos, con un único grupo carboxilo (-COOH), entre los que se encuentran los ácidos saturados (hidrogenados) de cadena lineal producidos por la hidrólisis de grasas.
<b>Concentración</b>	Cantidad de soluto por unidad de volumen o masa de disolvente o de solución.
<b>Densidad</b>	Peso específico.
<b>Éster</b>	Compuesto orgánico formado por la reacción de un ácido y un alcohol. Se representa con la fórmula general $R-C-O-OR'$ donde R es un grupo orgánico.
<b>Esterificación</b>	Proceso químico que consiste en la producción de un éster por la reacción de un alcohol con un ácido.

<b>FFA</b>	Fat Free Acids (Ácidos grasos libres)
<b>LIEXVE</b>	Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales
<b>Lípido</b>	Grupo heterogéneo de sustancias orgánicas que se encuentran en los organismos vivos. Los lípidos están formados por carbono, hidrógeno y oxígeno, aunque en proporciones distintas a como estos componentes aparecen en los azúcares.
<b>Peróxidos</b>	Son combinaciones binarias del oxígeno generalmente con un metal. Son derivados de los óxidos que contiene el agrupamiento –O-O (peroxo). El número de oxidación del oxígeno es -1, pero se presenta siempre en forma de dímero
<b>Picnometría</b>	Método para determinar la densidad de una sustancia líquida por medio del uso de un picnómetro.
<b>RTCA</b>	Reglamento Técnico Centroamericano
<b>SAP</b>	Índice de saponificación

**Saponificación**

Es una reacción química entre un ácido graso y una base, en la que se obtiene como principal producto la sal de dicho ácido y base.

**Transesterificación**

Proceso para obtención de biodiesel que consiste en combinar el aceite con un alcohol, y deja como residuo glicerina.



## RESUMEN

Se realizó la caracterización de aceite vegetal residual proveniente de una industria de alimentos, con el propósito de verificar si existe variabilidad en los parámetros fisicoquímicos del aceite desechado cada semana. Para determinar los parámetros fisicoquímicos se efectuaron seis tratamientos con tres repeticiones, utilizando un sistema de bloques completos al azar para evitar errores sistemáticos. Además se realizó un proceso de esterificación ácida, el alcohol que se utilizó fue metanol ( $\text{CH}_2\text{COOH}$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) como ácido diprótico.

En la obtención de los parámetros fisicoquímicos se utilizaron las metodologías establecidas por los métodos oficiales de American Oil Chemists Society (AOCS 1990). Las variables más relevantes a determinar en el aceite residual fueron la acidez, humedad e índice de peróxidos; porque indicaron el grado de tratamiento que debió realizarse para adecuarlo a las características que son aceptables al aprovecharlo como materia prima en la producción de biodiesel.

La esterificación ácida se realizó tomando en cuenta todas las medidas de seguridad debido a que el alcohol utilizado fue metanol anhidro y el ácido fue sulfúrico al 99%, después del proceso de esterificación ácida se determinó la humedad presente en la muestra del aceite residual, la eficiencia del metanol durante la reacción y la reducción de ácidos grasos libres.

Los resultados obtenidos de la caracterización fueron comparados con las especificaciones del Reglamento técnico centroamericano (RTCA 67.04.40:07) Alimentos y bebidas procesados, grasas y aceites, especificaciones; donde se estableció que el aceite es apto para utilizarlo como materia en la producción de biodiesel.

Las pruebas de caracterización y proceso de esterificación ácida se realizaron en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales –LIEXVE-, Sección Química Industrial del Centro de Investigación de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Caracterizar el aceite de frituras obtenido de la manufactura de productos de pollo y evaluar el efecto de estas características en el proceso de esterificación ácida a escala laboratorio.

### **Específicos**

1. Caracterizar fisicoquímicamente el aceite residual de frituras obtenido en un rango significativo.
2. Evaluar el grado de esterificación ácida en función del metanol residual con base a diferentes índices de acidez de aceite residual de frituras.
3. Evaluar el grado de neutralización del aceite residual esterificado en función de la demanda de alcohol e índice de acidez residual.
4. Evaluar la cantidad de ácidos grasos libres residual e índice de peróxidos residual después del proceso de esterificación ácida.

## **HIPÓTESIS**

El aceite residual subproducto del proceso de elaboración de frituras en una industria de alimentos tiene los parámetros fisicoquímicos iguales en cada semana.

### **HIPÓTESIS ESTADÍSTICA**

#### **Hipótesis nula**

Ho: Existe uniformidad en parámetros fisicoquímicos del aceite residual de frituras a través del tiempo.

#### **Hipótesis alterna**

Ha : No existe uniformidad en parámetros fisicoquímicos del aceite residual de frituras a través del tiempo.

## INTRODUCCIÓN

En Guatemala existen industrias que se dedican a la elaboración de alimentos fritos en grandes cantidades; para tal proceso utilizan aceites vegetales como soya, girasol, palma, oleína de palma, maíz. Los aceites sufren descomposición por el calor y después de cierto tiempo de ser utilizados son aprovechados para otros procesos como la elaboración de piensos, glicerol, jabón y fuente de energía alterna.

Una de las iniciativas que se tiene para el aceite vegetal residual es que puede ser utilizado como materia prima para la producción de biodiesel. Es necesario realizar un tratamiento para adecuar las condiciones del aceite a las características propias del proceso de combustión; la primer etapa del pre-tratamiento es la filtración del aceite para retirar partículas gruesas y finas, caracterizar el aceite para determinar parámetros fisicoquímicos y realizar esterificación ácida.

Para el manejo de aceites vegetales usados, es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales quien vela porque las industrias en Guatemala cumplan con las normas establecidas y evitar la influencia negativa sobre el medio ambiente si los aceites vegetales usados no son manejados correctamente. El primer paso para poder desarrollar estrategias de manejo de los aceites vegetales residuales industriales es contar con un diagnóstico inicial sobre la situación actual en cuanto a su generación y disposición final.

Por todo lo anterior, el presente estudio tiene como propósito determinar los parámetros fisicoquímicos del aceite vegetal usado proveniente de frituras de manufacturas de productos de pollo y también la evaluación del grado de esterificación ácida en función del alcohol utilizado.

## 1. ANTECEDENTES

En Guatemala existe una institución que se dedica a confirmar que las empresas tengan una producción más limpia y es el Centro Guatemalteco de Producción más Limpia (CGP+L). Es una institución técnica sin fines de lucro que fue establecida en 1998, iniciando operaciones en 1999.

Entre los objetivos que tiene dicha institución es aumentar la competitividad de las empresas nacionales a través de la aplicación de Producción más Limpia. El CGP+L es apoyado por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Los residuos o desechos pueden causar daño al medio ambiente si no son manejados correctamente; fundamento por el cual los gobiernos tienen la responsabilidad de promover la adopción de medidas para reducir al máximo la generación de los desechos y establecer políticas, estrategias para que su manejo y eliminación se ejecuten sin menoscabo del medio ambiente.

Entre estos residuos se encuentran los aceites vegetales usados que son los que se analizarán en este trabajo. En el mundo han hecho su aparición en los últimos años, nuevos procesos y tecnologías que permiten la reutilización de residuos o desechos, transformándolos en sustancias susceptibles de ser utilizadas o aprovechadas ya sea como materia prima o como energéticos.

La industria de alimentos emplea desde hace años aceites vegetales para procesos de cocción o frituras. Terminado el proceso, el aceite residual se utiliza para la elaboración de otros productos como piensos, jabón, glicerol y como materia prima para la producción de biodiesel.

Existen varias investigaciones de trabajos de graduación de Ingeniería Química y Ciencias Químicas y Farmacia referentes a la caracterización de aceites vegetales usados.

Durante 2008 se realizó la investigación del Ing. Juan Alberto Herrera Restrepo, asesorado por el Ing. Julián Andrés Velez y cuyo título es “Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiesel)”, realizado en Universidad Tecnológica de Pereira. En esta investigación se determinó la caracterización fisicoquímica del aceite vegetal residual y se realizó la comparación de propiedades de metil-éster con especificaciones para biodiesel en las normas ASTM.

En 2008 se realizó la investigación por Licda. Dafne Dense Rivera Sagastume cuyo título es “Caracterización de aceites esenciales por cromatografía de gases de tres especies del género piper y evaluación de la actividad citotóxica”, realizada en Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Durante 2007 se realizó la investigación de la Inga. Qca. María de los Milagros García Cabello, cuyo título es “Diseño de una instalación de pretratamiento de aceites con alto contenido de ácidos grasos libres para producción de biodiesel”, realizado en la Universidad de Cádiz.

En este trabajo de investigación se determinó la reducción de ácidos grasos libres para obtención de aceite vegetal apto para su transformación en biodiesel.

En 2001 se realizó la investigación por el Ing. Víctor Herbert De León Morales cuyo nombre es “Evaluación preliminar sobre el aprovechamiento de aceites comestibles desechados de proceso de fritura, mediante caracterización (reciclaje) en la elaboración de jabón”, realizado en la Universidad de San Carlos de Guatemala.



## 2. MARCO TEÓRICO

A continuación se describe las bases teóricas del estudio.

### 2.1. Aceites fijos

“Son todos los aceites que se obtienen de ciertas plantas y que a diferencia de los aceites esenciales son grasos, densos y no volátiles. Existen los aceites volátiles o esenciales que se extraen del grupo de las especies aromáticas. El grupo de oleaginosas comprenden solo las que se utilizan para extraer aceites fijos.”<sup>1</sup>

Los aceites fijos se encuentran en las semillas y en los frutos de donde son extraídos por presión. El primero que se saca es el más puro y se le distingue con el nombre de aceite virgen; el que sigue está más alterado por la mezcla de otros principios contenidos en el fruto sometido a la presión. El mucílago más o menos abundante en las semillas, es la sustancia que altera la pureza del aceite por su mezcla con él.

Los aceites fijos son empleados la mayor parte para alimento, los aceites volátiles solo sirven en las artes. El aceite fijo necesita un alto grado de calor para evaporarse; los aceites volátiles se disipan en el aire a la temperatura ordinaria de la atmósfera y se exhalan por entero.

---

<sup>1</sup> GANDUGLIA, Federico, Manual de biocombustibles, p. 180.

La propiedad que tienen los aceites de formar jabones les es exclusiva, pues muchas otras sustancias animales y vegetales la tienen igualmente; así que lo que se llama aceite volátil es un aroma líquido o concreto. Casi todos los aceites tienen color y conservan más o menos los principios con los que se hallaban en unión en el fruto.

“Los aceites fijos se vuelven más rancios cuanto más mucílago contienen. Los aceites fijos son muy poco secativos, pero existen los que combinados con óxidos metálicos adquieren esta propiedad, lo que da mucha extensión para su uso; debido a que con esta propiedad se les puede emplear como barniz para cubrir los cuerpos que se quieren preservar del agua y del aire; y como excipiente de los colores que se quieren dar con el pincel sobre telas, madera y metales.”<sup>2</sup>

El consumo de los aceites fijos es inmenso en razón de los muchos usos que tienen; hace la base de los jabones blandos y duros según combinaciones realizadas con la potasa o sosa. Además forman la preparación principal que se da al algodón para poder fijar en él con más solidez los colores, en los talleres por medio del aceite suavizan y se regulan mejor los juegos de las máquinas ocasionando que se modere la debilitación destructora de los frotos.

Los aceites volátiles o esenciales se volatilizan más fácilmente que los aceites fijos, se inflaman a una temperatura más baja y se disuelven en alcohol, despiden un olor fuerte que los hace distinguirse así como también comunican a la lengua un sabor vivo, acre y ardiente.

---

<sup>2</sup> GANDUGLIA, Federico, Manual de biocombustibles, p. 182.

“Los aceites volátiles difieren en el color, consistencia, gravedad específica, hay más pesados que el agua como los del salsafra y del clavo de especia; hay otros que se hallan constantemente en el estado concreto a la temperatura ordinaria de la atmósfera como los de rosa, de perejil.”<sup>3</sup>

### **2.1.1. Lípidos relacionados con ácidos grasos**

Se incluyen los lípidos que por hidrólisis liberan ácidos grasos o productos emparentados metabólicamente con los ácidos grasos. Por reducción de los ácidos grasos se obtienen alcoholes monohidroxílicos de cadena larga, los alcoholes superiores se encuentran en la naturaleza formando éteres con el glicerol o ésteres con ácidos grasos. Estos ésteres se llaman ceras y dan su carácter hidrofóbico a tegumentos de animales y plantas.

Los glicéridos simples son lípidos que constan de ácidos, aldehídos o alcoholes y glicerol. Lo más abundantes contienen ácidos grasos unidos al glicerol por enlaces éster. “Los fosfoglicéridos son líquidos más polares que los glicéridos simples porque contienen algunos componentes hidrofóbicos. La estructura de la molécula es tal que se distinguen una parte hidrofílica y otra hidrofóbica bien diferenciadas.”<sup>4</sup>

### **2.1.2. Aceites y grasas naturales**

Los aceites y grasas naturales están compuestas básicamente por mezclas complejas de triacilgliceroles con cantidades menores de otros lípidos.

---

<sup>3</sup> Aceites Fijos. <http://www.buenastareas.com/ensayos/Aceites-Fijos/339652.html>. 12/05/2011

<sup>4</sup> GANDUGLIA, Federico, Manual de biocombustibles, p. 186.

Los aceites y grasas se diferencian sólo por sus propiedades físicas, se consideran grasas a las mezclas lipídicas que permanecen sólidas a la temperatura ambiente; y aceites las que en las mismas condiciones se hallan en estado líquido. Los lípidos incluyen monoglicéridos, diglicéridos, triglicéridos, esteroides, terpenos, alcoholes grasos y ácidos grasos.

Las grasas también son componentes estructurales del cerebro y de las membranas.”<sup>5</sup> A continuación se presentan los ácidos grasos más comunes:

Tabla I. **Aceites grasos comunes**

Ácidos Grasos Comunes				
Nombres químicos y descripciones de Ácidos Grasos Comunes				
Nombre Común	Carbonos	Enlaces Dobles	Nomenclatura Química	Fuentes
Ácido Butírico	4	0	ácido butanoico	mantequilla
Ácido Caproico	6	0	ácido hexanoico	mantequilla
Ácido Caprílico	8	0	ácido octanoico	aceite de coco
Ácido Cáprico	10	0	ácido decanoico	aceite de coco
Ácido Láurico	12	0	ácido dodecanoico	aceite de coco
Ácido Mirístico	14	0	ácido tetradecanoico	aceite de palmiste
Ácido Palmítico	16	0	ácido hexadecanoico	aceite de palma
Ácido Palmitoleico	16	1	ácido 9-hexadecenoico	grasas animales
Ácido Esteárico	18	0	ácido octadecanoico	grasas animales
Ácido Oleico	18	1	ácido 9-octadecenoico	aceite de oliva
Ácido Ricinoleico	18	1	ácido 12-hidroxi-9-octadecenoico	aceite de ricino
Ácido Vaccénico	18	1	ácido 11-octadecenoico	mantequilla
Ácido Linoleico	18	2	ácido 9,12-octadecadienoico	aceite de semilla de uva
Ácido Alfa-Linolénico (ALA)	18	3	ácido 9,12,15-octadecatrienoico	aceite de lino (linaza)
Ácido Gamma-Linolénico (GLA)	18	3	ácido 6,9,12-octadecatrienoico	aceite de borraja
Ácido Araquídico	20	0	ácido eicosanoico	aceite de cacahuete, aceite de pescado
Ácido Gadoleico	20	1	ácido 9-eicosenoico	aceite de pescado
Ácido Araquidónico (AA)	20	4	ácido 5,8,11,14-eicosatetraenoico	grasas del hígado
EPA	20	5	ácido 5,8,11,14,17-eicosapentaenoico	aceite de pescado
Ácido Behénico	22	0	ácido docosanoico	aceite de colza (canola)
Ácido Erucico	22	1	ácido 13-docosenoico	aceite de colza (canola)
DHA	22	6	ácido 4,7,10,13,16,19-docosahexaenoico	aceite de pescado
Ácido Lignocerico	24	0	ácido tetracosanoico	pequeñas cantidades en muchas grasas

Fuente: GANDUGLIA, Federico, Manual de biocombustibles, p.185.

<sup>5</sup> Aceites Fijos. <http://www.buenastareas.com/ensayos/Aceites-Fijos/339652.html>. 12/05/2011.

Los ácidos grasos consisten de átomos de carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), organizados como una cadena de carbonos con un grupo carboxilo (-COOH) en un extremo. Los ácidos grasos saturados tienen todos los hidrógenos que pueden enlazarse a los átomos de carbono y consecuentemente no tienen enlaces dobles entre los carbonos. Los ácidos grasos monoinsaturados tienen solamente un enlace doble. Los enlaces grasos poliinsaturados tienen más de un enlace doble.

No todos los aceites son adecuados para producción de biodiesel, los llamados aceites esenciales constituyen una familia de productos volátiles que no se prestan como materias primas para biodiesel, pertenecen a otras familias químicas (terpenos, fenoles y otras sustancias aromáticas) y poseen muy alto valor económico por sus propiedades aromáticas. “Entre los aceites esenciales se puede mencionar el aceite de cáscara de naranja y el aceite de pino.”<sup>6</sup>

Los aceites de frituras usados se hacen aptos para su empleo como materia prima en procesos de transformación química para obtener una gama de productos con aplicación en la industria cosmética, farmacéutica, de lubricantes, aditivos de alimentación, fluidos hidráulicos, surfactantes o emulsionantes. En los procesos de hidrólisis se obtienen ácidos grasos y como subproducto glicerina.

## **2.2. Fundamentos de los métodos físico-químicos para el análisis de la materia prima**

Entre los parámetros físico-químicos evaluados en el presente trabajo de investigación están:

---

<sup>6</sup> Aceite Fijos. <http://www.buenastareas.com/ensayos/Aceite-Fijos/339652.html>. 12/05/2011.

### **2.2.1. Densidad**

Se define como el cociente entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa ( $\text{kg}/\text{m}_3$ ).

### **2.2.2. Punto de ebullición**

Es aquella temperatura en la cual la materia cambia de estado líquido a gaseoso. Expresado en otras palabras es la temperatura a la cual la presión de vapor del líquido es igual a la presión de vapor del medio que rodea al líquido.

### **2.2.3. Humedad**

Es la cantidad de agua que se encuentra en el aceite residual de frituras; esto obtenido por la cantidad de producto que fue procesado en dicho aceite.

### **2.2.4. Ácidos grasos libres**

Es una biomolécula orgánica de naturaleza lipídica formada por una larga cadena hidrocarbonada lineal, de número par de átomos de carbono en cuyo extremo hay un grupo carboxilo.”<sup>7</sup>

### **2.2.5. Índice de yodo**

Es una escala utilizada para definir el grado de insaturación de un compuesto orgánico que contiene enlaces diénicos o triénicos.

---

<sup>7</sup> GANDUGLIA, Federico, Manual de biocombustibles, p. 188.

### **2.2.6. Índice de peróxido**

Indica el nivel de rancidez que tiene el aceite. Se define como el número de miliequivalentes de yodo que se liberan del yoduro de potasio por kilogramos de grasa oxidada.

### **2.2.7. Índice de saponificación**

Es una medida para calcular el peso molecular promedio de todos los ácidos grasos presentes. Se define como el número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para saponificar 1g de grasa bajo condiciones específicas.

## **2.3. Aceite/grasa**

“Los términos aceite o grasa son tan sólo un matiz referente al punto de fusión del producto lipídico que utilizamos para freír, denominándose “aceite al producto graso líquido a temperatura ambiente y “grasa” al producto graso sólido a temperatura ambiente”<sup>8</sup>. Debido a la ambigüedad que representa la variable “temperatura ambiente” nos podemos encontrar con una misma sustancia que sea aceite en un país tropical y grasa en un país nórdico.

### **2.3.1. Características fisicoquímicas de las grasas o aceites**

Una grasa de forma muy esquemática, está formada por triglicéridos; es decir una molécula de glicerol esterificada con tres ácidos grasos.

---

<sup>8</sup> GANDUGLIA, Federico, Manual de biocombustibles, p. 182.

El mayor o menor punto de fusión de la grasa viene determinado por un a serie de características de estos ácidos grasos:

- Grado de saturación: es la presencia o no de dobles enlaces, menos estables que los enlaces simples. Al ácido graso con dobles enlaces se le denomina ácido graso insaturado, y al que no tiene ningún doble enlace ácido graso saturado.
- Longitud de cadena: número de átomos de carbono que componen la cadena del ácido graso (normalmente es un número par). A mayor número de ácidos grasos de cadena corta, menor punto de fusión de la grasa.

### **2.3.2. Función del aceite**

“La función del aceite en la fritura es doble. Por un lado, éste actúa como un medio transmisor de calor, y por otro llega a ser un ingrediente del producto frito al ser absorbido por el mismo”<sup>9</sup>. Esta última función tiene especial interés ya que la estabilidad del aceite y su grado de alteración influirán directamente en la duración del producto frito. También hay que considerar que el aceite puede llegar a ser uno de los ingredientes más caros del producto final.

### **2.3.3. Alteración del aceite**

Todos los procesos químicos enzimáticos se aceleran al aumentar la temperatura. Se acepta que dentro de unos límites, la velocidad de reacciones se dobla al aumentar 10°C la temperatura.

---

<sup>9</sup> GANDUGLIA, Federico, Manual de biocombustibles, p. 188.

Por este motivo es fácil comprender que “una grasa calentada tiende a degradarse rápidamente, en especial si en ella hay sustancias o residuos que actúan como catalizadores o potenciadores de la alteración.”<sup>10</sup>

Los principales cambios químicos que se observan en los aceites calentados se presentan a continuación.

### **2.3.3.1. Hidrólisis**

Los triglicéridos del aceite en contacto con humedad o agua (proveniente del producto a freír) se descomponen en diglicéridos y monoglicéridos, liberando una o dos cadenas de ácidos grasos. Los triglicéridos con ácidos grasos de cadenas cortas son más sensibles que los que presentan ácidos grasos de cadena larga, durante el proceso de fritura, a temperaturas de 180-190°C, el proceso de hidrólisis tiene poca importancia puesto que la humedad se elimina en forma de vapor, aunque algunos autores describen contenido del 0.5-1.5% incluso a esas temperaturas. Las mayores alteraciones ocurren si existe humedad en el momento de calentar o enfriar el aceite (< 100°C) y durante el almacenamiento del mismo, puesto que el agua no se evapora.

El resultado de la hidrólisis es la aparición de ácidos grasos libres, que aumentan la acidez del aceite y en menor cantidad la formación de metilcetonas y lactosas que pueden producir aromas desagradables. La aparición de ácidos grasos libres provoca una mayor tendencia a la formación de humo.

---

<sup>10</sup> McMURRY, John. Química orgánica, p. 78.

### 2.3.3.2. Autooxidación

La autooxidación es un proceso oxidativo no enzimático, el más frecuente en los procesos de fritura, caracterizado por la oxidación de los ácidos grasos en presencia del oxígeno del aire, dando lugar a compuestos intermedios inestables denominados hidroperóxidos o peróxidos que darán lugar a la formación de unos radicales libres. Este proceso se ve favorecido y potenciado por la incidencia de luz, que actúa como catalizar y por la presencia de sustancias fotosensibles, como la riboflavina y la eritrosina, en el medio, los ácidos grasos insaturados son más sensibles a la oxidación que los saturados.

“Las grasas que han sufrido un proceso de oxidación tienen a oscurecerse, aumentar la viscosidad, incrementar la formación de espuma y desarrollar gustos y olores anómalos”<sup>11</sup>. Al tratarse de una reacción en cadena, es fácil comprender que la extendida práctica de desechar el 50% de un aceite de fritura en punto de descarte y sustituirlo por aceite nuevo con el fin de alargar la vida del primero, no sólo no es beneficioso sino que acelera la alteración del aceite nuevo incorporado.

En este proceso se distinguen tres fases:

- Fase de iniciación o inducción: en esta fase se forma el radical libre (R), ya sea partir de un hidroperóxido (ROOH) y favorecida por la alta temperatura y la luz, o a partir de un ácido graso (RH) por encontrarse en el medio metales con facilidad para variar de valencia.

---

<sup>11</sup> McMURRY, John. Química orgánica, p. 80.

- Fase de propagación o continuación: los radicales libres formados en la fase anterior, dada su gran reactividad reaccionan con el oxígeno o con otras cadenas de ácidos grasos, provocando de esta forma una reacción en cadena.
- Fase de terminación o finalización: cuando dos radicales libres se encuentran pueden reaccionar entre sí, dando lugar a un compuesto nuevo generalmente del tipo aldehído o cetona. Durante el proceso de autooxidación van apareciendo cambios organolépticos (alteración del sabor, palatabilidad, oscurecimiento), físicos (aumento de la viscosidad) y químico (formación de polímeros, compuestos volátiles).

#### **2.3.4. Polimerización**

Los radicales libres tienden a combinarse entre ellos o con otros ácidos grasos y forman compuestos lineales, más o menos largos y ramificados, o compuestos cíclicos, especialmente en caso de que existan dobles enlaces. Estos polímeros al ser de mayor tamaño y peso molecular tienden a aumentar la viscosidad del aceite lo que por un lado favorece la formación de espuma y, por lo tanto la oxidación, y por otro producen un arrastre mayor de aceite por parte del producto frito debido a que gotea con más dificultad. Los polímeros forman en la superficie del aceite y en los laterales de la freidora una capa muy adherente y difícil de eliminar de consistencia plástica.

“Desde el punto de vista nutricional parece ser que los polímeros de alto peso molecular son indigeribles, por lo que tienen poca importancia respecto a la nutrición y salud; pero los compuestos más cortos, monómeros y dímeros, sí que son absorbidos por la pared intestinal, repercutiendo en la salud del consumidor. Muchas de estas sustancias están reconocidas como tóxicas o

potencialmente cancerígenas, como el caso del benzopireno producido por ciclación del colesterol<sup>12</sup>.

## 2.4. 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, sustancias 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.

Los ésteres carbónicos derivan del ácido carbónico y los ésteres fosfóricos derivan del ácido fosfórico. A continuación se representan sus estructuras:

Figura 1. Estructuras de ésteres carbónicos y ésteres fosfóricos

Éster (éster de ácido carboxílico)	Éster carbónico (éster de ácido carbónico)	Éster fosfórico (triéster de ácido fosfórico)
$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{R}-\text{C}-\text{OR}' \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{RO}-\text{C}-\text{OR}' \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{RO}-\text{P}-\text{OR} \\   \\ \text{OR} \end{array}$

Fuente: McMURRY, John. Química orgánica, p. 81.

<sup>12</sup> McMURRY, John. Química orgánica, p. 81.

### **2.4.1. Grupo alquilo**

El grupo alquilo es un grupo funcional orgánico monovalente, formado por la separación de un átomo de hidrógeno de un hidrocarburo saturado o alcano., para que así pueda enlazarse a otro átomo o grupo de átomos.

Se puede suponer que un grupo alquilo puede formarse a partir de un alcano, pero estos grupos no existen por separado (en ese caso se llaman radicales alquilo), o sea los grupos alquilo no son compuestos en sí mismos, sino partes de compuestos mayores. Los grupos alquilo siempre se encuentran unidos a otro átomo o grupo de átomos.

#### **2.4.1.1. Clasificación de los grupos alquilo**

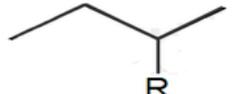
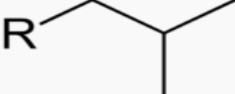
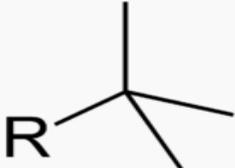
Hay que distinguir entre grupos alquilo de cadena recta y de cadena ramificada según la geometría de la cadena alquílica, es decir la ausencia de ramificaciones. Según las reglas, el átomo de hidrógeno supuestamente eliminado permanezca a un carbono Terminal (carbono primario) o intermedio (carbono secundario), se puede distinguir entre grupos alquilo primarios, secundarios y terciarios; ya que dicho átomo de H que falta definirá el carbono de unión entre el grupo alquilo y el resto de la molécula.

A continuación se presentan dos “grupos derivados del butano, eliminando el H e un carbono primario (n-butil) o secundario (sec-butil); y dos derivados del metilpropano, eliminando el H en un C primario (isopropil) o terciario (ter-butil)”<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> McMURRY, John. Química orgánica, p. 83.

Figura 2. Estructuras y fórmulas de los grupos derivados del butano

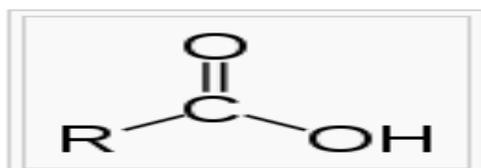
Grupo alquilo	Estructura	Fórmula	Cadena y Tipo de alquilo	Ejemplo
Butil o butilo	$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\   &   &   &   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}- \\   &   &   &   \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-}$	Cadena lineal Alquilo primario	
sec-butil	$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\   &   &   &   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   &   &   &   \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\text{CH}_3\text{-CH-CH}_2\text{-CH}_3$	Cadena lineal Alquilo secundario	
2-metilpropil ó Isobutil	$\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-}$	Cadena ramificada Alquilo primario	
ter-butil	$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{C}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\text{CH}_3\text{-C}(\text{CH}_3)\text{-CH}_3$	Cadena ramificada Alquilo Terciario	

Fuente: HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la Investigación, p. 185.

### 2.4.2. Ácidos carboxílicos

Los ácidos carboxílicos constituyen un grupo de compuestos que se caracterizan por poseer un grupo funcional llamado carboxilo o grupo carboxi (-COOH); se produce cuando coinciden sobre el mismo carbono un grupo hidroxilo (-OH) y carbonilo (C=O). Se puede representar como COOH ó CO<sub>2</sub>H.

Figura 3. Estructura de un ácido carboxílico



Donde R es un hidrógeno  
o un grupo orgánico

Fuente: McMURRY, John. Química orgánica, p. 84.

#### 2.4.2.1. Características y propiedades de los ácidos carboxílicos

Los derivados de los ácidos carboxílicos tienen como fórmula general R-COOH; tienen propiedades ácidas; los dos átomos de oxígeno son electronegativos y tienden a atraer a los electrones del átomo de hidrógeno del grupo hidroxilo con lo que se debilita el enlace; produciéndose en ciertas condiciones una ruptura heterolítica, cediendo el correspondiente protón o ión  $H^+$ , quedando el resto de la molécula con carga -1 debido al electrón que ha perdido el átomo de hidrógeno, por lo que la molécula queda como  $R-COO^-$ .



Además en este anión la carga negativa se distribuye simétricamente entre los dos átomos de oxígenos, de forma que los enlaces carbono-oxígeno adquieren un carácter de enlace parcialmente doble. Generalmente los ácidos carboxílicos son ácidos débiles, con sólo un 1% de sus moléculas disociadas para dar los correspondientes iones, a temperatura ambiente y en disolución acuosa.

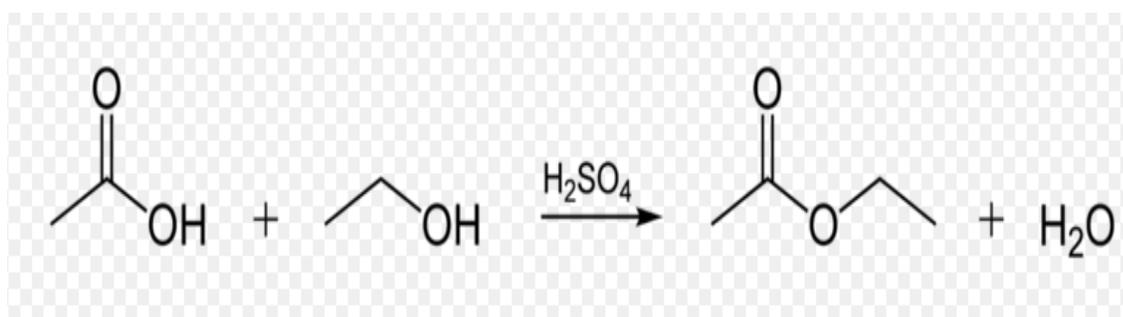
#### 2.4.3. Química de la esterificación

Dada la importancia de los ésteres se han desarrollado muchos procesos para obtener ésteres. El más común es el calentamiento de una mezcla del alcohol y del ácido correspondiente en presencia de cantidades catalíticas de ácido sulfúrico, utilizando el reactivo más económico en exceso para aumentar el rendimiento de la reacción (esterificación de Fischer-Speier).

El ácido sulfúrico sirve en este caso tanto de catalizador como de sustancia higroscópica que absorbe el agua formada en la reacción. En general este procedimiento requiere de temperaturas elevadas y de tiempos de reacción largos presentando por tanto inconvenientes. El alcohol puede sufrir reacciones de eliminación formando olefinas, esterificación con el propio ácido sulfúrico o la formación del correspondiente éter simétrico. De igual modo el ácido orgánico que se pretende esterificar puede sufrir descarboxilación.

“La reacción de esterificación pasa por un ataque nucleofílico del oxígeno de una molécula del alcohol al carbono del grupo carboxílico”<sup>14</sup>. El protón migra al grupo hidroxilo del ácido que luego es eliminado como agua. El rol del catalizador es el de aumentar la actividad carbonílica (la carga parcial positiva sobre el átomo de carbono) por protonación de uno de los oxígenos del ácido. Lo mismo se puede conseguir utilizando derivados más activos del ácido como los haluros o los anhídruos.

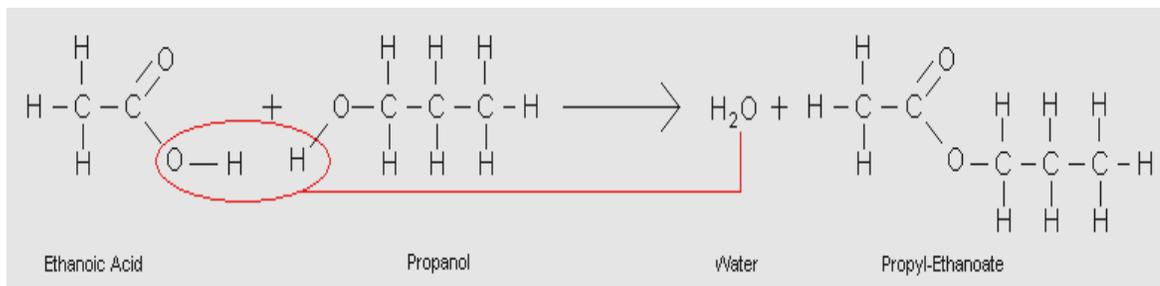
Figura 4. **Esterificación de un ácido carboxílico**



Fuente: McMURRY, John. Química orgánica, p. 85.

<sup>14</sup> McMURRY, John. Química orgánica, p. 84

Figura 5. **Detalle de la reacción de esterificación**



Fuente: McMURRY, John. Química orgánica, p. 85.

## 2.5. **Reglamento técnico centroamericano**

Los respectivos Comités Técnicos de Normalización o reglamentación técnica a través de los Entes de Normalización o Reglamentación Técnica de los países centroamericanos y sus sucesores, son los organismos encargados de realizar el estudio o la adopción de los reglamentos técnicos. Están conformados por representantes de los sectores académicos, consumidor, empresa privada y gobierno.

“Este documento fue aprobado como Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 67.04.40:07 , alimentos y bebidas procesados, grasas y aceites, especificaciones por el subgrupo de alimentos y bebidas y el subgrupo de medidas de normalización”<sup>15</sup>. La oficialización de este reglamento técnico, conlleva la ratificación por el Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana (COMIECO).

<sup>15</sup> Especificaciones grasas y aceites:

[http://www.puntofocal.gov.ar/notific\\_otros\\_miembros/hnd43\\_t.pdf/](http://www.puntofocal.gov.ar/notific_otros_miembros/hnd43_t.pdf/). 12/05/2011.

Tabla II. **Composiciones de ácidos grasos de aceites vegetales crudos, determinados por el Centro Guatemalteco de Producción más Limpia (CGL) de muestras auténticas (expresadas en porcentaje del contenido total de ácidos grasos)**

Ácidos grasos	Estearina de palma <sup>(1)</sup>	Aceite de Colza	Aceite de Colza (bajo contenido de ácido erúico)	Aceite de cártamo	Aceite de cártamo (ácido oleico alto)	Aceite de sésamo	Aceite de soja	Aceite de girasol	Aceite de girasol (ácido oleico alto)	Aceite de girasol de contenido medio de ácido oleico
C6:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C8:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C10:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C12:0	0,1-0,5	ND	ND	ND	ND-0,2	ND	ND-0,1	ND-0,1	ND	ND
C14:0	1,0-2,0	1,5-6,0	ND-0,2	ND-0,2	ND-0,2	ND-0,1	ND-0,2	ND-0,2	ND-0,1	ND-1
C16:0	48,0-74,0	ND-3,0	2,5-7,0	5,3-8,0	3,6-6,0	7,9-12,0	8,0-13,5	5,0-7,6	2,6-5,0	4,0-5,5
C16:1	ND-0,2	ND-0,1	ND-0,6	ND-0,2	ND-0,2	0,1-0,2	ND-0,2	ND-0,3	ND-0,1	ND-0,05
C17:0	ND-0,2	ND-0,1	ND-0,3	ND-0,1	ND-0,1	ND-0,2	ND-0,1	ND-0,2	ND-0,1	ND-0,05
C17:1	ND-0,1	ND-0,1	ND-0,3	ND-0,1	ND-0,1	ND-0,1	ND-0,1	ND-0,1	ND-0,1	ND-0,06
C18:0	3,9-6,0	0,5-3,1	0,8-3,0	1,9-2,9	1,5-2,4	4,8-6,1	2,0-5,4	2,7- 6,5	2,9-6,2	2,1-5,0
C18:1	15,5-36,0	8,0-60,0	51,0-70,0	8,4-21,3	70,0-83,7	35,9-42,3	17-30	14,0-39,4	75-90,7	43,1-71,8
C18:2	3,0-10,0	11,0-23,0	15,0-30,0	67,8-83,2	9,0-19,9	41,5-47,9	48,0-59,0	48,3-74,0	2,1-17	18,7-45,3
C18:3	ND-0,5	5,0-13,0	5,0-14,0	ND-0,1	ND-1,2	0,3-0,4	4,5-11,0	ND-1,0 <sup>(2)</sup>	ND-0,3	ND-0,5
C20:0	ND-1,0	ND-3,0	0,2-1,2	0,2-0,4	0,3-0,6	0,3-0,6	0,1-0,6	0,1-0,5	0,2-0,5	0,2-0,4
C20:1	ND-0,4	3,0-15,0	0,1-4,3	0,1-0,3	0,1-0,5	ND-0,3	ND-0,5	ND-0,3	0,1-0,5	0,2-0,3
C20:2	ND	ND-1,0	ND-0,1	ND	ND	ND	ND-0,1	ND	ND	ND
C22:0	ND-0,2	ND-2,0	ND-0,6	ND-1,0	ND-0,4	ND-0,3	ND-0,7	0,3-1,5	0,5-1,6	0,6-1,1
C22:1	ND	2,0-60,0	ND-2,0	ND-1,8	ND-0,3	ND	ND-0,3	ND-0,3	ND-0,3	ND
C22:2	ND	ND-2,0	ND-0,1	ND	ND	ND	ND	ND-0,3	ND	ND-0,09
C24:0	ND	ND-2,0	ND-0,3	ND-0,2	ND-0,3	ND-0,3	ND-0,5	ND-0,5	ND-0,5	0,3-0,4
C24:1	ND	ND-3,0	ND-0,4	ND-0,2	ND-0,3	ND	ND	ND	ND	ND

ND = no detectable, definido como  $\leq 0,05$  %.

<sup>(1)</sup> Datos de las especies incluidas en la Sección 3.

<sup>(2)</sup> Productos obtenidos por el fraccionamiento del aceite de palma.

<sup>(3)</sup> De acuerdo con la National Sunflower Association. Oil Characteristics & Trading Rules. American Fats & Oil, Rule 14.

Fuente: <http://www.marn.gob.gt/documentos/novedades/pp+l.pdf>. Consultado el 12/03/2011.

Tabla III. Límites máximos y mínimos permitidos por norma RTCA 67.04.40:07, Alimentos y bebidas procesados, grasas y aceites, especificaciones

<i>Parámetro</i>	<i>Límites Máximos Permitidos</i>
Color	Característico del producto designado.
Olor y sabor	Característico del producto designado. Exento de olores y sabores extraños y rancios.
Apariencia	El producto debe estar libre de materia extraña.
Ácidos grasos libres <sup>1</sup>	0,10% máximo No aplica para grasas con emulsificantes.
Índice de peróxidos	5 meq peróxido / kg máximo
Humedad y Materia volátil	0,10% máximo

Fuente: Reglamento técnico centroamericano, p. 67.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

Se describen los métodos tomados en cuenta para el estudio.

#### 3.1. Variables

Se presenta una tabla con las variables y factores que influyen en el trabajo a realizar, se determinaron las variables de entrada a modificar para medir su efecto; además se determina qué factores se mantienen constantes.

Tabla IV. **Definición operacional de las variables en la caracterización de aceites vegetales residuales y etapa de esterificación ácida**

No.	Variable	Fórmula Química	Factor Potencial de Diseño		Factores Perturbadores	
			Cte.	Variable	Controlables	No Controlables
1	Ácidos grasos libres	(% ) Acidos grasos libres		X		X
2	Índice de peróxidos	(meq/1000g muestra)		X		X
3	Humedad	(%)		X		X
4	Índice de saponificación	(mg KOH/ g muestra)		X		X
5	Índice de yodo	(cgyodo/ gmuestra)		X		X
6	Densidad	(g/cm <sup>3</sup> )		X		X
7	Metanol	CH <sub>3</sub> OH	X		X	
8	Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	X		X	

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del estudio

El presente estudio se realizó en una industria de alimentos; por lo tanto, la materia prima que se utilizó se obtuvo de la freidora industrial que posee dicha empresa. El aceite residual estuvo almacenado en toneles plásticos sellados y protegidos contra la luz.

Las delimitaciones estuvieron establecidas de acuerdo a lo determinado en normas RTCA 75.02.43:07 para biocombustibles y por reglas que impuso la industria de alimentos.

### 3.3. Recursos humanos disponibles

A continuación se detalla el recurso humano involucrado en la práctica.

Tabla V. Recursos humanos disponibles

RECURSOS HUMANOS	NOMBRE
Investigador	Karen Vásquez
Asesor	Inga. Qca. Cano Morales
Asesor	Ing. Qco. Mario Mérida Meré
Coordinadora Área de Calidad, Investigación y Vinculación	Inga. Qca. Lisely de León
Director de la escuela de Ingeniería Química	Ing. Qco. Williams Alvarez

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Recursos materiales disponibles

A continuación se presentan los equipos reactivos y de cristalería utilizada para la elaboración del presente trabajo.

Tabla VI. **Cristalería necesaria para realización del proceso de caracterización fisicoquímica de aceite residual y esterificación ácida**

	Cantidad	Artículo	Descripción	Capacidad
<b>CRISTALERÍA</b>	5	Agitadores	Magnéticos	1 pulgada
	4	Balón aforado	Vidrio/ tapadera plástica	1000 mL
	10	Beaker	Vidrio Boeco	500 mL
	10	Beaker	Vidrio Boeco	100 mL
	2	Bureta	Llave teflón	25 mL
	1	Embudo	Vidrio	
	10	Erlenmeyer	Vidrio Boeco	250 mL
	1	Espátula	Mango de madera	15 cm longitud
	1	Papel filtro	Whatman	12.5 cm
	1	Picnómetro	Vidrio	25 mL
	2	Pipeta volumétrica	Vidrio	25 mL
	1	Pipeta volumétrica	Vidrio	5 mL
	1	Pizeta	Plástico	125 mL
	2	Probeta	Vidrio	25 mL
	1	Termómetro	Vidrio	300 °C
	10	Tubos de ensayo	Vidrio	
	1	Varilla de Agitación	Vidrio	8*300 mm
	10	Viales	Vidrio	100 mL
	1	Vidrio de reloj	Vidrio	10 cm diámetro

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Equipo necesario para realizar el proceso de caracterización fisicoquímica del aceite residual y esterificación ácida**

EQUIPO	Nombre	Descripción
	Balanza analítica	Boeco Germany Max 210 g d = 0.1 mg
	Campana de extracción	PREMLAB Laboratory Fume Hoods Modelo APV-655 Voltaje 110, amperio 7, serie 120
	Rota evaporador	*BUCHI SWITZERLAND Vacuum Pump V-700, *BUCHI Vacuum Controller V-850, *BUCHI Rotavapor RII
	Plancha de calentamiento	VWR 7x7 Ceramic Volts 120 VAC Watts 900, 50/60 Hz 1 phase 10 amperios, 250 Volts

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Reactivos necesarios para realizar el proceso de caracterización fisicoquímica del aceite residual y esterificación ácida**

REACTIVOS	Cantidad	Reactivo	Descripción
	1	Metanol	2.5 L MERCK
	1	Etanol	2.5 L MERCK
	1	Hidróxido de sodio	500 g MERCK
	1	Hidróxido de potasio	500 g MERCK
	1	Agua desmineralizada	18.9 L
	1	Fenolftaleína	25 g MERCK
	1	Reactivo de Wijs	1 litro MERCK

Fuente: elaboración propia.

### **3.5. Técnica**

De acuerdo al alcance que tiene el presente proyecto, se considera que el tipo de investigación es experimental.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

#### Procedimiento

- Estimar la precisión y exactitud de los instrumentos de medición a utilizar.
- Los instrumentos a utilizar deberán de estar calibrados (Ref. 2.19) de acuerdo a normas establecidas (ISO 4787); de tal forma se tenga una mejor trazabilidad de la medición.
- Contar con autorización de la industria alimenticia para realizar dicho estudio.
- Proceder al muestreo del aceite residual del proceso de elaboración de frituras en la industria de alimentos.
- Proceder a caracterizar el aceite residual de frituras de pechuguitas empanizadas obtenido en 6 distintas semanas.
- En base a los resultados obtenidos; éstos se compararán entre ellos y se determinará si existe uniformidad en aceite residual de fritura desechado. Además se compararán con norma RTCA 67.04.40:07.

- Realizar esterificación ácida a cada tratamiento, dependiendo si los resultados de caracterización fisicoquímica varían o no.
- Determinar el porcentaje de humedad presente en las muestras después del proceso de esterificación ácida.
- Evaluar la eficiencia del metanol que reaccionó en el proceso de esterificación ácida.
- Determinar la reducción de ácidos grasos libres después del proceso de esterificación.

### **3.6.1. Diseño del experimento**

A continuación se presentan las repeticiones realizadas en las diferentes semanas evaluadas para cada parámetro fisicoquímico.

#### **3.6.1.1. Tratamientos a realizar**

El experimento evaluará siete parámetros fisicoquímicos para la caracterización de 6 distintas muestras de aceite residual de frituras.

Tabla IX. **Tratamientos realizados en caracterización fisicoquímica**

		Parámetros						
Semana	Repetición	Densidad (g/mL)	Humedad (%)	Ácidos grasos libres (%)	Punto de ebullición (°C)	Índice de yodo (cg/g muestra)	Índice de Peróxido (Meq/1000g )	Índice de Saponificación (mg KOH/gmuestra)
1	1							
	2							
	3							
2	1							
	2							
	3							
3	1							
	2							
	3							
4	1							
	2							
	3							
5	1							
	2							
	3							
6	1							
	2							
	3							

Fuente: elaboración propia.

### 3.6.1.2. Diseño experimental

Para la caracterización del aceite residual, se utilizará un diseño de bloques completos al azar con 6 tratamientos y 3 repeticiones, con el fin de evitar errores sistemáticos.

Tabla X. **Densidad determinada en las diferentes semanas evaluadas**

Semana	Corrida 1	Densidad (g/mL)	
		Corrida 2	Corrida 3
S-1	S-3	S-4	S-2
S-2	S-6	S-5	S-4
S-3	S-1	S-2	S-5
S-4	S-5	S-1	S-3
S-5	S-4	S-3	S-6
S-6	S-2	S-6	S-1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Humedad determinada en las diferentes semanas evaluadas**

Semana	Corrida 1	Humedad (%)	
		Corrida 2	Corrida 3
S-1	S-3	S-4	S-2
S-2	S-6	S-5	S-4
S-3	S-1	S-2	S-5
S-4	S-5	S-1	S-3
S-5	S-4	S-3	S-6
S-6	S-2	S-6	S-1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Acidos grasos libres determinados en las diferentes semanas evaluadas**

		Acidos Grasos Libres(%)	
Semana	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
S-1	S-3	S-4	S-2
S-2	S-6	S-5	S-4
S-3	S-1	S-2	S-5
S-4	S-5	S-1	S-3
S-5	S-4	S-3	S-6
S-6	S-2	S-6	S-1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Punto de ebullición determinada en las diferentes semanas evaluadas**

		Punto de ebullición (°C)	
Semana	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
S-1	S-3	S-4	S-2
S-2	S-6	S-5	S-4
S-3	S-1	S-2	S-5
S-4	S-5	S-1	S-3
S-5	S-4	S-3	S-6
S-6	S-2	S-6	S-1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Índice de yodo determinado en las diferentes semanas evaluadas**

		Índice de Yodo (cg/g muestra)	
Semana	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
S-1	S-3	S-4	S-2
S-2	S-6	S-5	S-4
S-3	S-1	S-2	S-5
S-4	S-5	S-1	S-3
S-5	S-4	S-3	S-6
S-6	S-2	S-6	S-1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Índice de peróxido determinado en las diferentes semanas evaluadas**

		Índice de Peróxido (Meq/1000g)	
Semana	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
S-1	S-3	S-4	S-2
S-2	S-6	S-5	S-4
S-3	S-1	S-2	S-5
S-4	S-5	S-1	S-3
S-5	S-4	S-3	S-6
S-6	S-2	S-6	S-1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Índice de saponificación en diferentes semanas evaluadas**

Índice de Saponificación (mg KOH/gmuestra)			
Semana	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
S-1	S-3	S-4	S-2
S-2	S-6	S-5	S-4
S-3	S-1	S-2	S-5
S-4	S-5	S-1	S-3
S-5	S-4	S-3	S-6
S-6	S-2	S-6	S-1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Parámetros evaluados después del proceso de esterificación ácida**

GRU- PO	(%) Metanol residua	Acidez residual (%)	$\Delta$ acidez (%)	Desviación estándar	peróxido final (Meq/1000g)	$\Delta$ peróxidos (Meq/1000g)	Desvia-ción estándar
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Fuente: elaboración propia.

### **3.6.1.3. Unidad experimental**

La cantidad de volumen de aceite residual que se utilizó para realizar la caracterización dependió del parámetro fisicoquímico y método a manejar.

### **3.6.1.4. Metodología experimental**

Para la caracterización del aceite residual de frituras se utilizará la siguiente metodología:

#### **3.6.1.4.1. Determinación de la densidad Norma ASTM D-45**

- Definición: es la cantidad obtenida de la masa de una sustancia (g) dividida entre su volumen (mL); sus dimensionales son g/mL.
  
- Materiales y equipo:
  - 1 picnómetro
  - Balanza analítica
  
- Procedimiento:
  - Pesar el picnómetro completo (vacío)
  - Llenar el picnómetro con aceite residual hasta límite indicado
  - Pesar picnómetro con aceite residual y medir temperatura

- Cálculos

$$\rho = \frac{(P_f - P_o)}{V} \quad (1)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad (g/mL)

Pf = Peso de picnómetro con aceite residual (g)

Po = Peso de picnómetro vacío (g)

V = Volumen de picnómetro (mL)

Figura 6. **Detalle de la unidad utilizada para medición de densidad**



Fuente: elaboración propia. LIEXVE, Química Industrial, USAC.

#### **3.6.1.4.2. Método de número de acidez Método oficial AOCS Ca 5a– 40**

- Definición: este método determina los ácidos grasos libres existentes en la muestra.

- Materiales y equipo
  - Soporte Universal
  - Pinzas para bureta
  - Bureta
  - Pipeta
  - Balón aforado
  - Balanza analítica
  - Plancha de calentamiento
  
- Reactivos
  - Hidróxido de sodio (0.25 N)
  - Fenolftaleína (1%)
  - Alcohol etílico (95%)
  
- Procedimiento
  - Calentar la muestra de aceite residual hasta que esté completamente líquida.
  
  - Pesar la muestra utilizando tabla XI; y colocarla en un erlenmeyer.
  
  - Agregar cantidad de alcohol etílico neutralizado de acuerdo a tabla No.9 y 2 gotas de fenolftaleína.
  
  - Titular la muestra con hidróxido de sodio hasta que aparezca un color rosado permanente.
  
- Cálculos
  - El porcentaje de ácidos grasos libres en la mayoría de tipos de grasa y aceites se calcula como ácido oleico.

$$\%AGL = \frac{(mL \text{ Base} * N * 28.2)}{\text{Peso de muestra}} \quad (2)$$

- Peso de muestra.
- Los ácidos grasos libres son expresados en términos de “valor de acidez” en lugar de ácidos grasos libres.
- El valor de acidez se define como el número de miligramos de NaOH necesario para neutralizar 1g de muestra. Para convertir el valor de AGL a valor de acidez multiplicar el valor obtenido de AGL por 1.99.

Figura 7. **Detalle de unidad utilizada para titulación en la determinación de acidez**



Fuente: elaboración propia. LIEXVE, Química Industrial, USAC.

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

<b>Rango AGL (%)</b>	<b>Muestra (g)</b>	<b>Alcohol (mL)</b>	<b>Concentración alcalina (N)</b>
0.00 a 0.2	56.4 +/- 0.2	50	0.1
0.2 a 1.0	28.2 +/- 0.2	50	0.1
1.0 a 30.0	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, J. C. Estadística para química analítica, p. 51.

### **3.6.1.4.3. Determinación de humedad**

- Definición: Indica la cantidad de agua presente en el aceite residual de frituras. Se utiliza para este caso el método por secado (Nollet 1996).
- Material y equipo
  - 3 Beacker de 100 mL
  - Plancha de calentamiento
  - Termómetro
  - Cronómetro
  - Balanza analítica
  - Probeta
- Procedimiento
  - Pesar los beacker vacíos

- Agregar 25 mL de aceite residual a cada beacker y pesarlos; luego colocarlo en la plancha de calentamiento a una temperatura de 105°C por un tiempo de 20 min, agitar frecuentemente el aceite para que no queden atrapadas burbujas de agua.
- Pesar nuevamente los beacker con la muestra.
- Cálculos
 
$$\text{Humedad (g)} = (\text{Po aceite} - \text{Pf aceite}) \quad (3)$$

Donde:

Po aceite = peso inicial de aceite

Pf aceite = peso final de aceite

#### **3.6.1.4.4. Determinación de índice de yodo por Wijs**

- Definición: El índice de yodo es una medida de la instauración de ácidos grasos y se expresa en términos del número de centigramos de yodo absorbido por gramo de muestra (% yodo absorbido). Se utilizó el método oficial AOCS Cd 1-25.
- Materiales y equipo
  - Erlenmeyer de boca ancha de 250 mL con tapón
  - Erlenmeyer de 1000 mL con tapón
  - Pipetas
  - Pinzas para bureta
  - Soporte Universal

- Reactivos
  - Yoduro de Potasio
  - Solución de Wijs
  - Tiosulfato de sodio pentahidratado
  - Solución soluble de almidón
  - Tetracloruro de carbono
  
- Procedimiento
  - Pesar la muestra de acuerdo a tabla XII dentro de un erlenmeyer de 500 mL y añadir 15 mL de tetracloruro de carbono, agitar hasta que la muestra este completamente disuelta.
  - Pipetear 25 mL de solución Wijs y adicionarlo a la muestra. Tapar el erlenmeyer y agitar hasta obtener una mezcla homogénea.
  - Almacenar la muestra en un lugar oscuro por 30 minutos a una temperatura de 25°C.
  - Después de 30 minutos sacar el frasco y añadirle 20 mL de solución de yoduro de potasio y 150 mL de agua destilada.
  - Preparar y conducir por lo menos un blanco con cada grupo de muestras simultáneamente y realizar el mismo procedimiento
  - Titulación con solución 0.1 N de tiosulfato de sodio cuidadosamente y agitar constantemente. Continuar esta titulación hasta que tenga un color amarillo claro, añadir 1 a 2 mL de indicador de almidón y continuar la titulación hasta que se decolore por completo.

- Cálculos

$$\text{Índice de yodo} = \frac{(B - S) * N * 12.69}{P_m} \quad (4)$$

Donde:

B = gasto de titulación del blanco (mL)

S = gasto de titulación de la muestra (mL)

N = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio

P<sub>m</sub> = peso de la muestra (g)

Tabla XIX. **Relación de índices de yodo contra peso de muestra**

<b>Índice de Yodo</b>	<b>Peso g +/- 0.001</b>
< 5	3
5 a 20	1
21 a 50	0.4
51 a 100	0.2
101 a 150	0.13
151 a 200	0.1

Fuente: MILLAR, J. C. Estadística para química analítica, p. 52.

Figura 8. **Detalle de unidad utilizada en la titulación para la determinación de índice de yodo**



Fuente: elaboración propia. LIEXVE, Química Industrial, USAC.

#### **3.6.1.4.5. Índice de saponificación Método oficial AOCS Cd 3-25**

- Definición: Es la cantidad de álcali para saponificar una cantidad definida de muestra. Se expresa como el número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) requeridos para saponificar un gramo de muestra.
- Material y equipo:
  - Balanza analítica
  - Bureta
  - Pipeta
  - Balones
  - Pinzas para bureta
  - Plancha de calentamiento
  - Soporte universal

- Condensadores
- Reactivos
  - Hidróxido de potasio al 50%
  - Fenolftaleína al 1%
  - Ácido clorhídrico 0.5N
  - Alcohol etílico 95%
- Procedimiento
  - Pesar 2g de muestra y agregar 25 mL de solución de hidróxido de potasio alcohólica.
  - Preparar un blanco de forma simultánea a la muestra
  - Colocar la muestra y el blanco en el condensador hasta que la saponificación sea completa (una hora).
  - Titular la muestra colectada con ácido clorhídrico, utilizando como indicador fenolftaleína.
- Cálculos

$$SAP = \frac{56.1 * N (HCL) * (Titulación\ blanco - Titulación\ muestra)}{\text{Peso de la muestra}} \quad (5)$$

Donde:

N (HCL) = normalidad de la solución de ácido clorhídrico

Titulación en blanco = volumen consumido de HCL

#### 3.6.1.4.6.

#### Índice de peróxidos

Método oficial AOCS

Cd 8-53

- Definición: Determina todas las sustancias en términos de miliequivalentes de peróxido por 1000g de muestra que oxidan el ioduro de potasio bajo las condiciones de la prueba.
  
- Material y equipo
  - Plancha de calentamiento
  - Balanza analítica
  - Pipeta
  - Erlenmeyer con tapón de vidrio
  
- Reactivos
  - Ioduro de potasio (solución saturada en exceso de KI)
  - Tiosulfato de sodio 0.1N
  - Cloroformo
  - Ácido acético
  - Almidón
  
- Procedimiento
  - Pesar 5.00 +/- 0.05g de muestra en un erlenmeyer con tapón
  - Agregar 30 mL de solución ácido acético-cloroformo (3:2). Agitar
  - Agregar 0.5 mL de solución saturada de ioduro de potasio
  - Reposar solución minuto y luego agregar 30 mL de agua destilada.
  - Titular con tiosulfato de sodio 0.1N hasta desaparecer color amarillo.
  - Agregar 0.5 mL de solución de almidón y continuar titulación hasta que desaparezca el color azul.

- Hacer una titulación en blanco, tomando en cuenta que no debe exceder de 0.1 mL de tiosulfato de sodio 0.1N consumido.
- Cálculos  
 Valor de peróxidos (meq/1000g) =  $\frac{(S - B) * N * 80}{\text{Peso de muestra}}$  (6)

Donde:

S = titulación de la muestra

B = titulación en blanco

N = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio

#### **3.6.1.4.7. Obtención de metanol residual**

Se utilizará un rota evaporador marca BUCHI SWITZERLAND, Vacuum Pump V-700

#### **3.6.1.4.8. Proceso de esterificación ácida (Método de esterificación de Fischer).**

- Tomar muestras de 100 mL de aceite vegetal residual
- Calentar muestras de aceite a 35°C.
- Agregar 30 mL de metanol a cada muestra de aceite
- Agregar 2 mL de ácido sulfúrico a cada muestra
- Agitar la muestra por 1 hora
- Todo el proceso será realizado dentro de campana de extracción

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se realizarán caracterizaciones en aceite residual de frituras, por ello, es necesario establecer un formato para la recolección de la información.

Tabla XX. **Formato para caracterización del aceite residual**

		Variables						
Semana	Repetición	Densidad (g/mL)	Humedad (%)	Ácidos grasos libres (%)	Ebullición (°C)	Yodo (cg/g muestra)	Indice de Peróxido (Meq/1000g)	Saponificación (mg KOH/gmuestra)
1	1							
	2							
	3							
2	1							
	2							
	3							
3	1							
	2							
	3							
4	1							
	2							
	3							
5	1							
	2							
	3							
6	1							
	2							
	3							

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Formato de parámetros obtenidos en el proceso de esterificación ácida.**

GRUPO	Rotaevaporador (%) Metanol residual	Índice de acidez residual (%)	$\Delta$ índice de acidez (%)	Desviación estándar	Índice de peróxidos final (Meq/1000g)	$\Delta$ índice de peróxidos (Meq/1000g)	Desviación estándar
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

Se realizará un análisis de varianza de dos vías (bloques completos al azar), con 6 tratamientos (semanas) y 3 repeticiones.

### 3.8.1. Análisis de varianza

Se utilizará la prueba de F para probar la hipótesis nula siguiente:

Ho: Demostrar que hay uniformidad en parámetros fisicoquímicos del aceite residual de frituras a través del tiempo.

El modelo para el análisis de varianza se determinará a partir de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \theta_k + (\beta\theta)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ij}$  = Ácidos grasos libres

$\alpha_i$  = Efecto del bloque

$\beta_j$  = Efecto del alcohol

$\theta_k$  = Efecto del ácido diprótico

$(\beta\theta)_{jk}$  = Interacción entre el alcohol y el ácido

$\varepsilon_{ijk}$  = Error experimental

Tabla XXII. Cuadro de análisis de varianza

Factores Variables	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F
Total	$2^2 * 5 - 1$			
Bloque	$r - 1$			
Alcohol	$a - 1$			
Catalizador	$b - 1$			
Alcohol * Catalizador	$(a-1)(b-1)$			
Error experimental	$(ab-1)(r-1)$			

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Varianza} = \text{Cuadrado Medio} = S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$$

Donde:

$$\sum (X_i - \bar{X})^2 = \text{Suma de cuadrados}$$

$n-1$  = grados de libertad

Si el análisis de varianza rechaza la hipótesis nula, se realizará una comparación múltiple de Tukey.



## 4. RESULTADOS

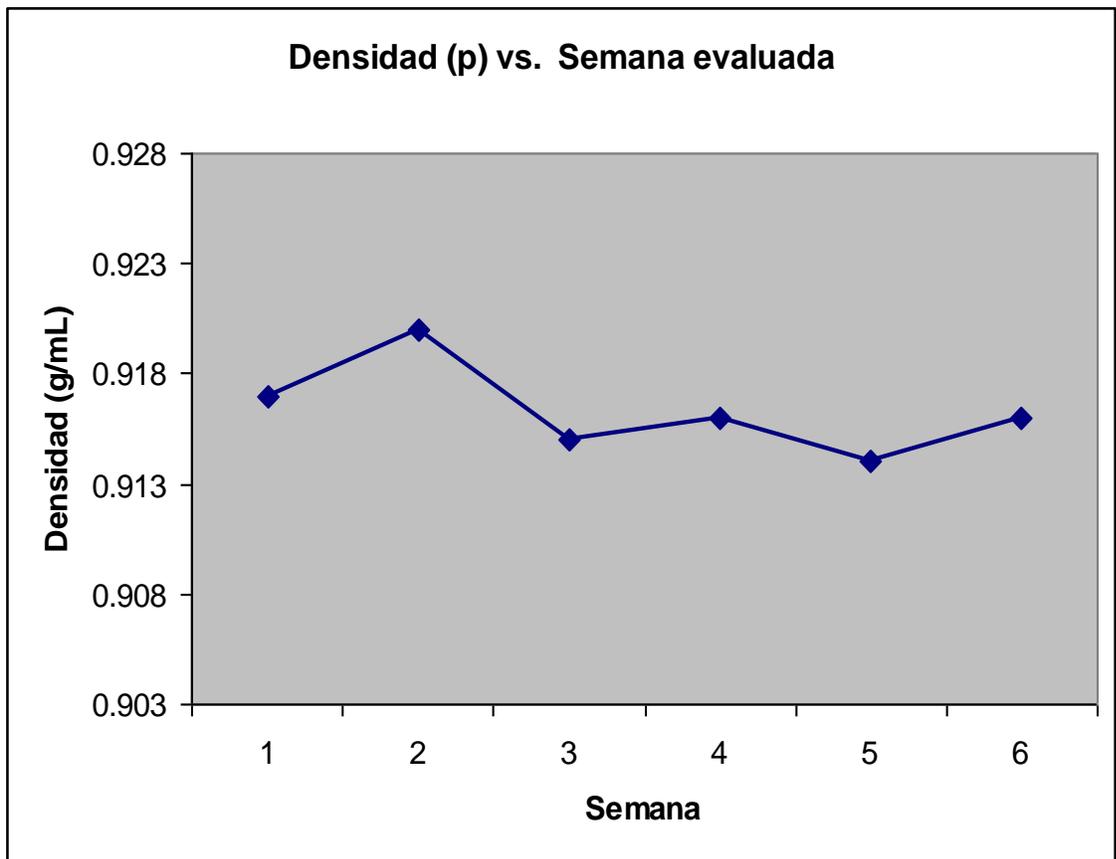
En función de los anteriores procedimientos y posterior análisis correspondiente, se hace mención de los resultados obtenidos.

Tabla XXIII. **Parámetros fisicoquímicos de aceite vegetal residual en las diferentes semanas evaluadas.**

Semana	Densidad (g/mL)	Humedad (%)	Ácidos grasos libres (%)	Punto de ebullición (°C)	Índice de yodo (cg/g muestra)	Índice de Peróxido (Meq/1000g)	Índice de Saponificación (mg KOH/gmuestra)
1	0.917	0.103	5.567	296.000	107.320	6.910	140.700
2	0.920	0.177	7.827	298.000	102.100	10.200	154.700
3	0.915	0.173	6.717	299.000	103.200	8.570	152.330
4	0.916	0.723	9.407	298.000	93.820	12.370	163.930
5	0.914	0.637	7.483	299.000	101.730	9.480	153.430
6	0.916	0.693	8.217	297.000	95.610	10.500	157.067

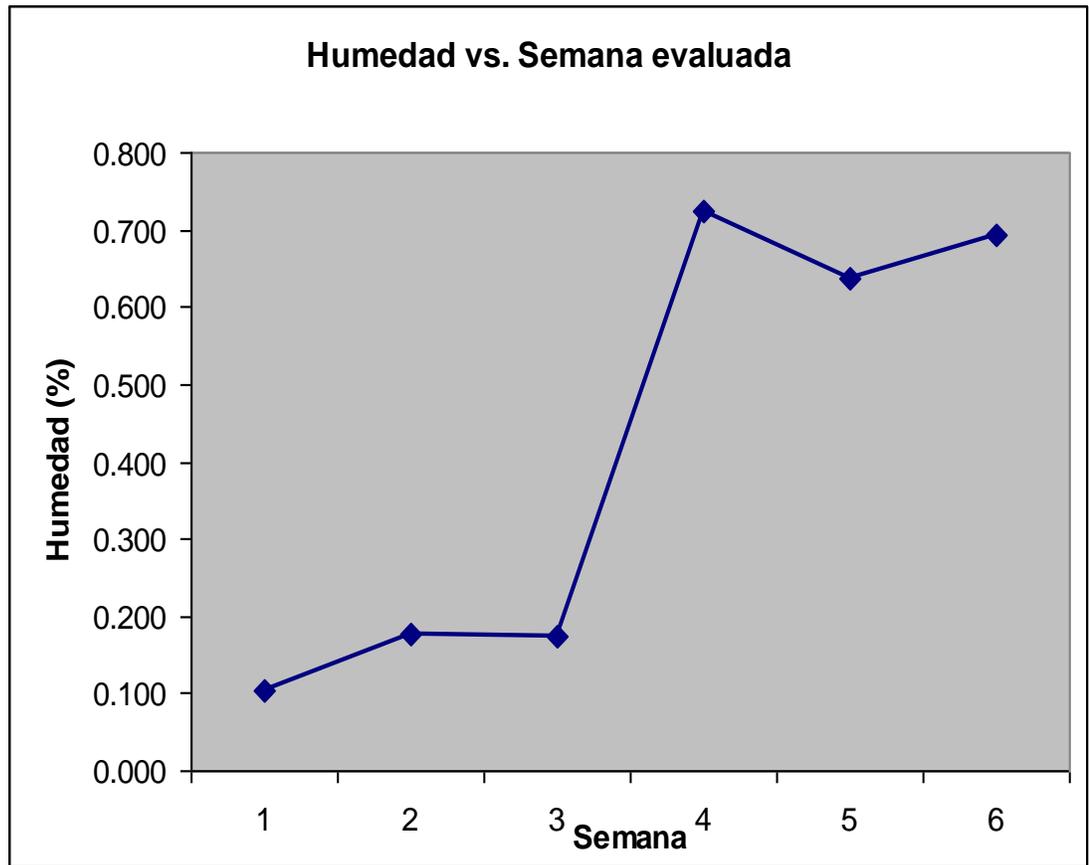
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 9. Curva para observar variación en densidades obtenidas del aceite vegetal residual evaluado en las 6 semanas a una temperatura de 24°C.



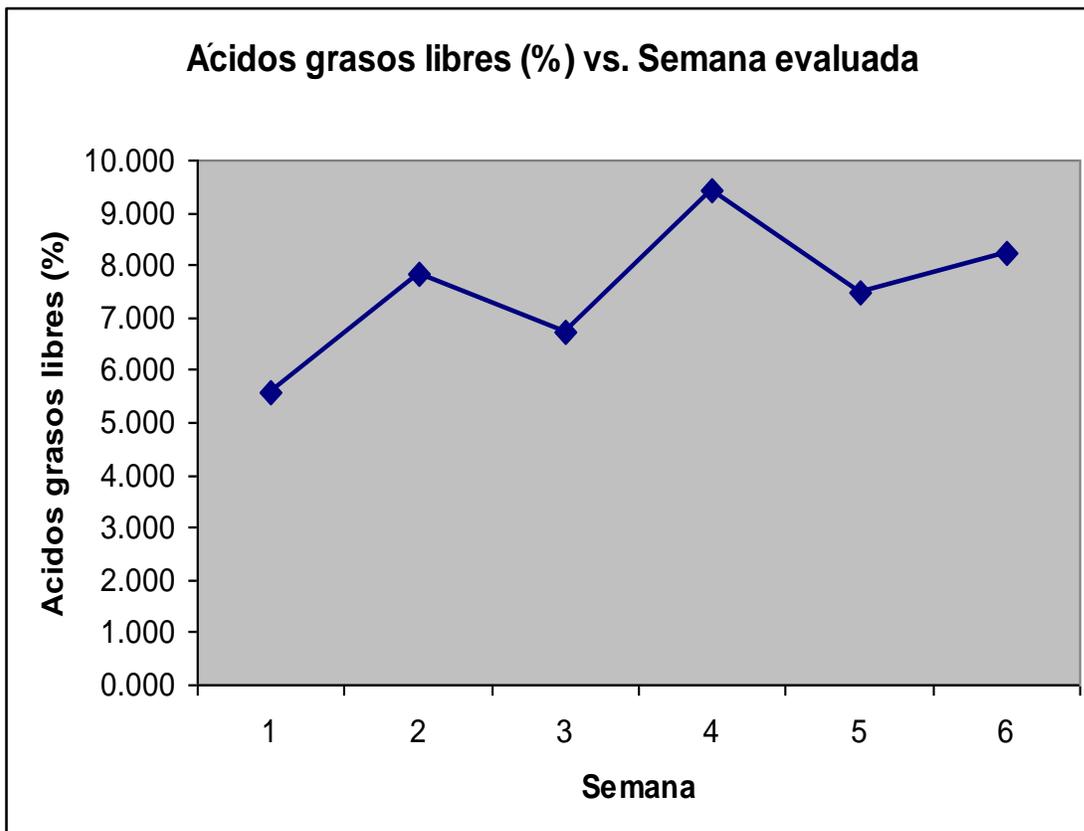
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 10. **Curva para observar variación en porcentaje de humedad obtenido en aceite vegetal residual de las 6 semanas estudiadas.**



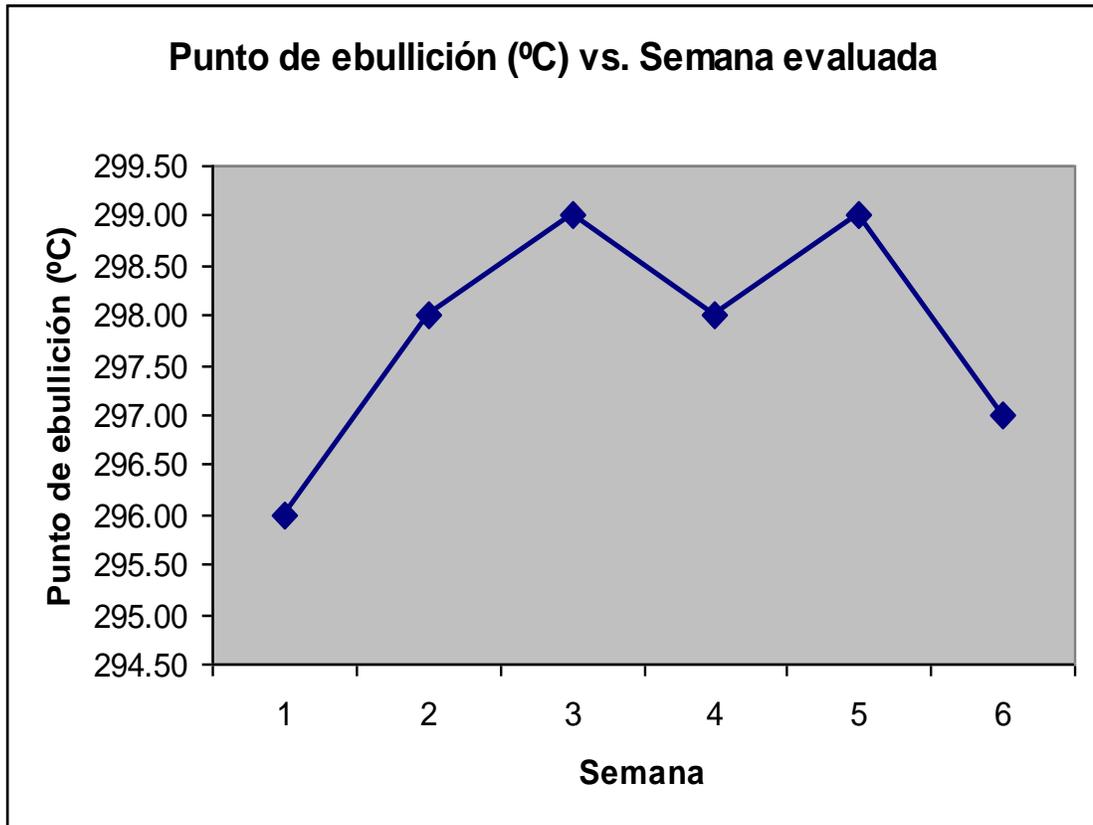
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 11. Curva para observar variación en porcentaje de ácidos grasos libres en 6 diferentes muestras de aceite vegetal residual.



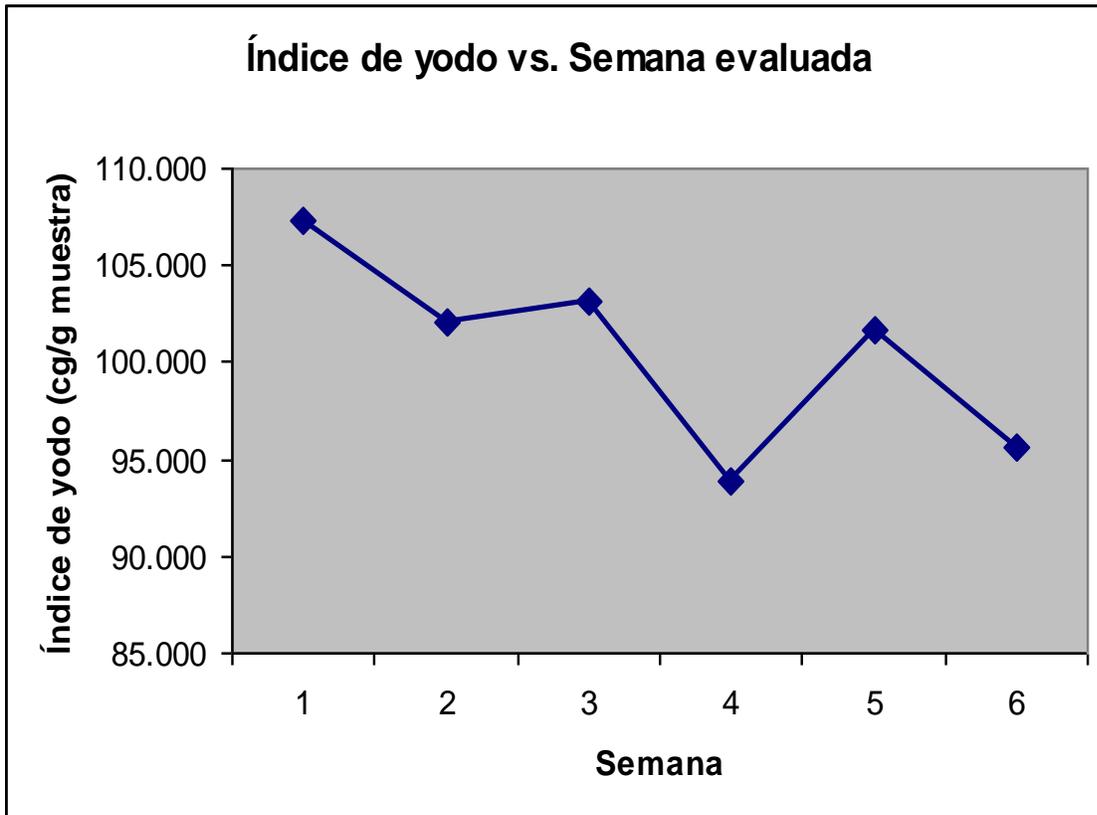
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 12. **Curva para observar variación del punto de ebullición obtenido en las 6 diferentes muestras de aceite vegetal residual.**



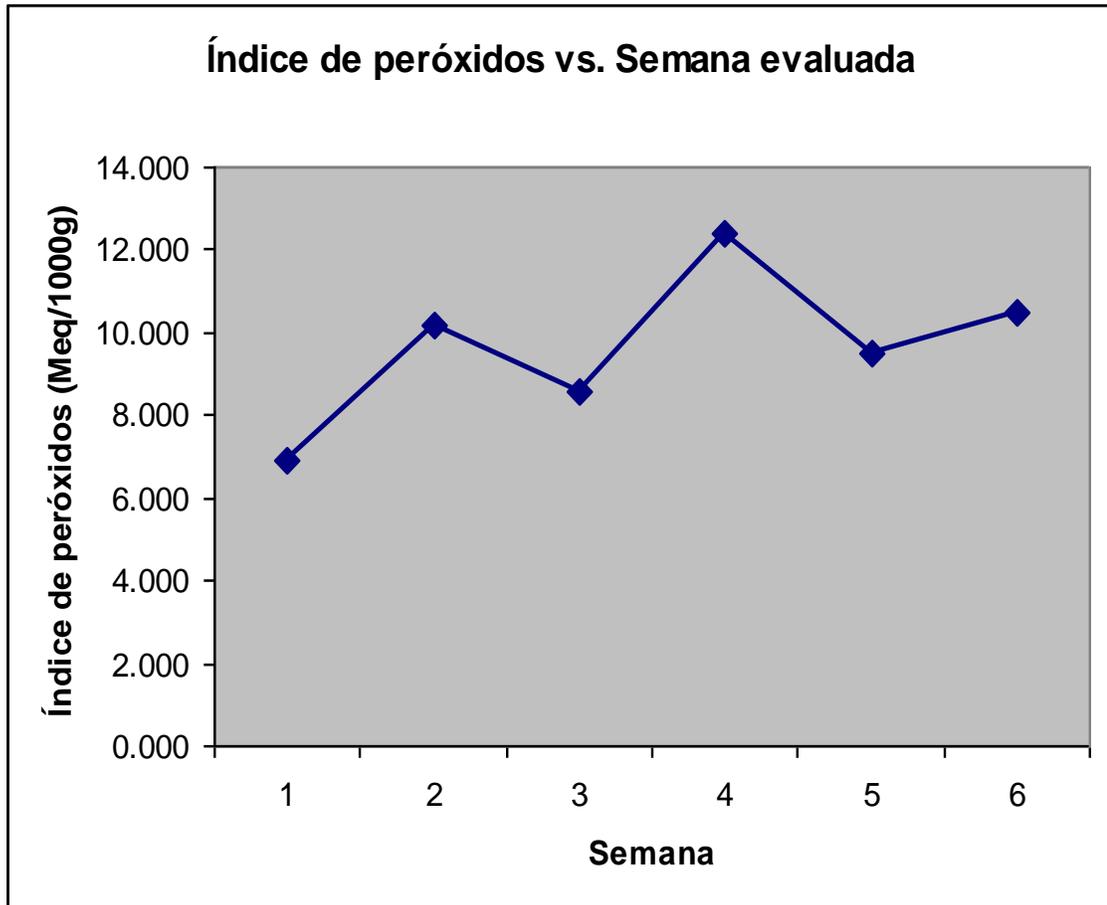
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 13. Curva para observar variación de índices de yodo en función de las 6 semanas evaluadas del aceite vegetal residual.



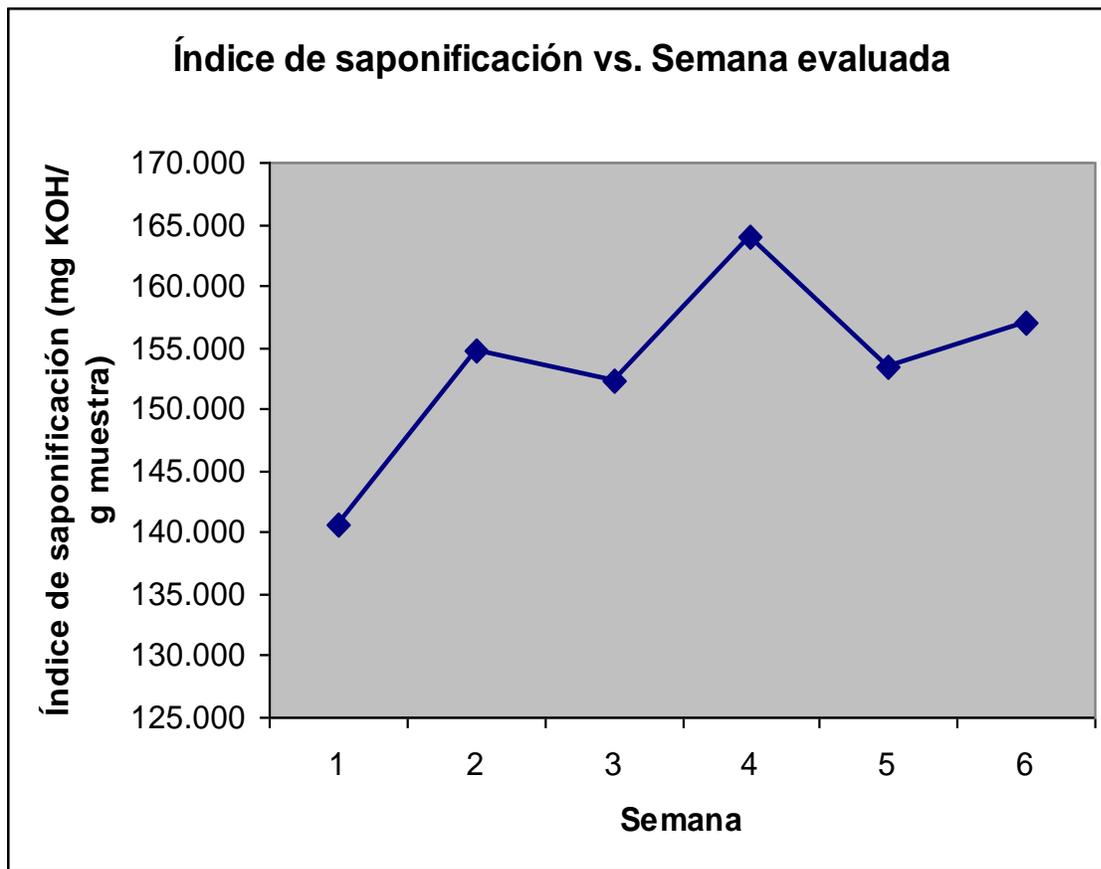
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 14. Curva para observar variación en índices de peróxidos en función de las 6 semanas evaluadas de aceite vegetal residual.



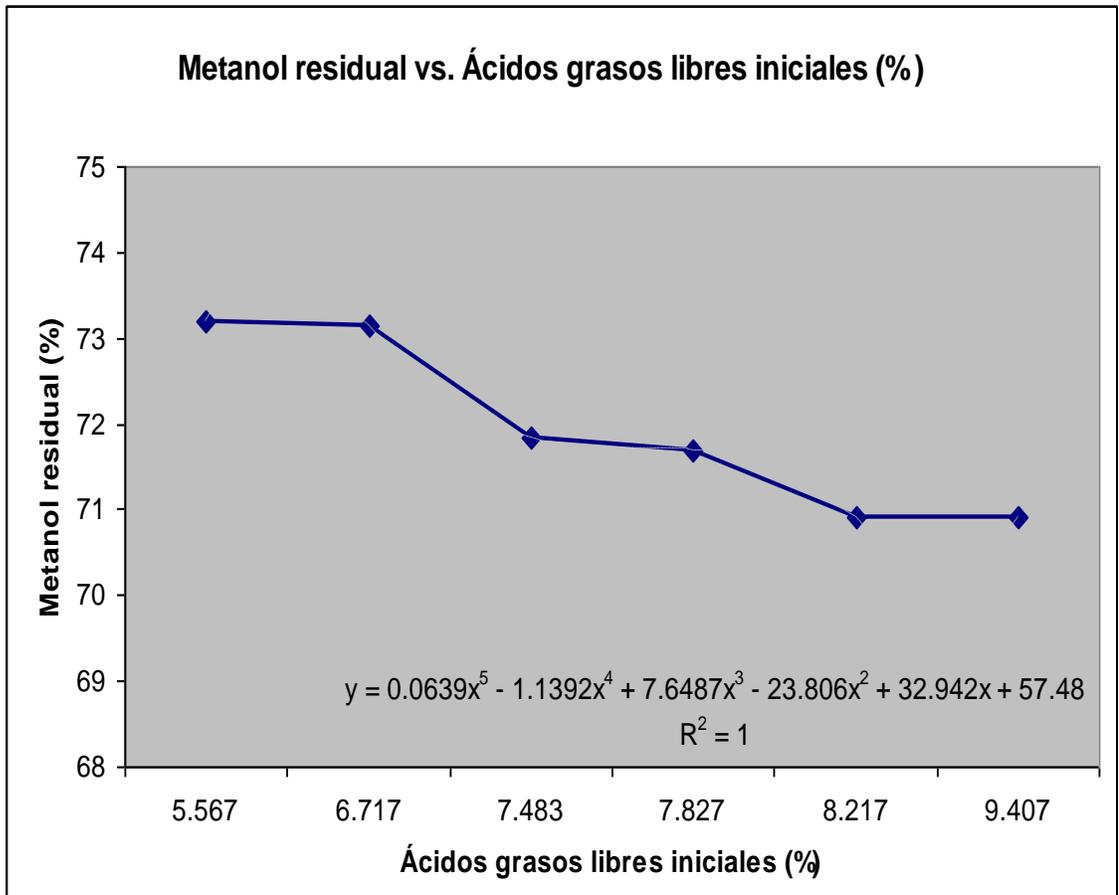
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 15. Curva para observar variación en índices de saponificación en función de 6 semanas evaluadas de aceite vegetal residual.



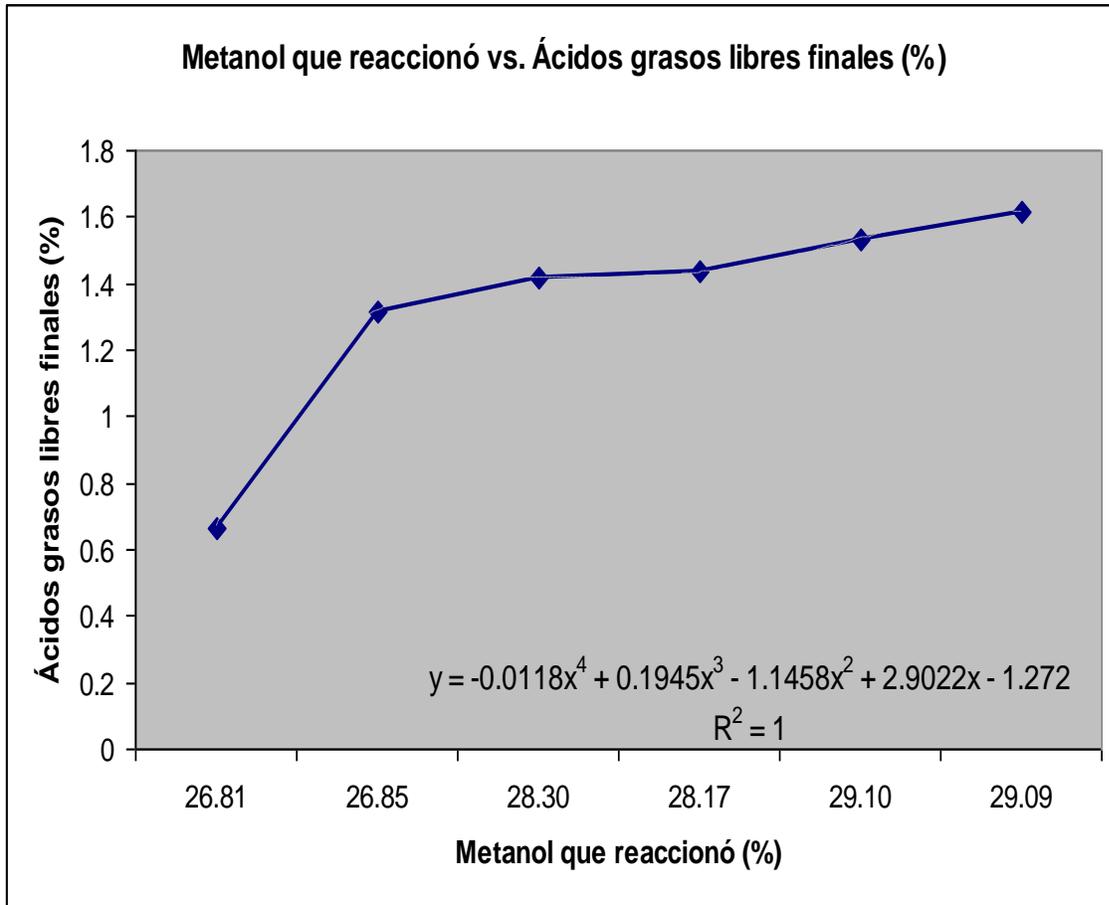
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 16. **Curva de correlación para determinar la cantidad de metanol sin reaccionar en el proceso de esterificación ácida en función de ácidos grasos libres iniciales.**



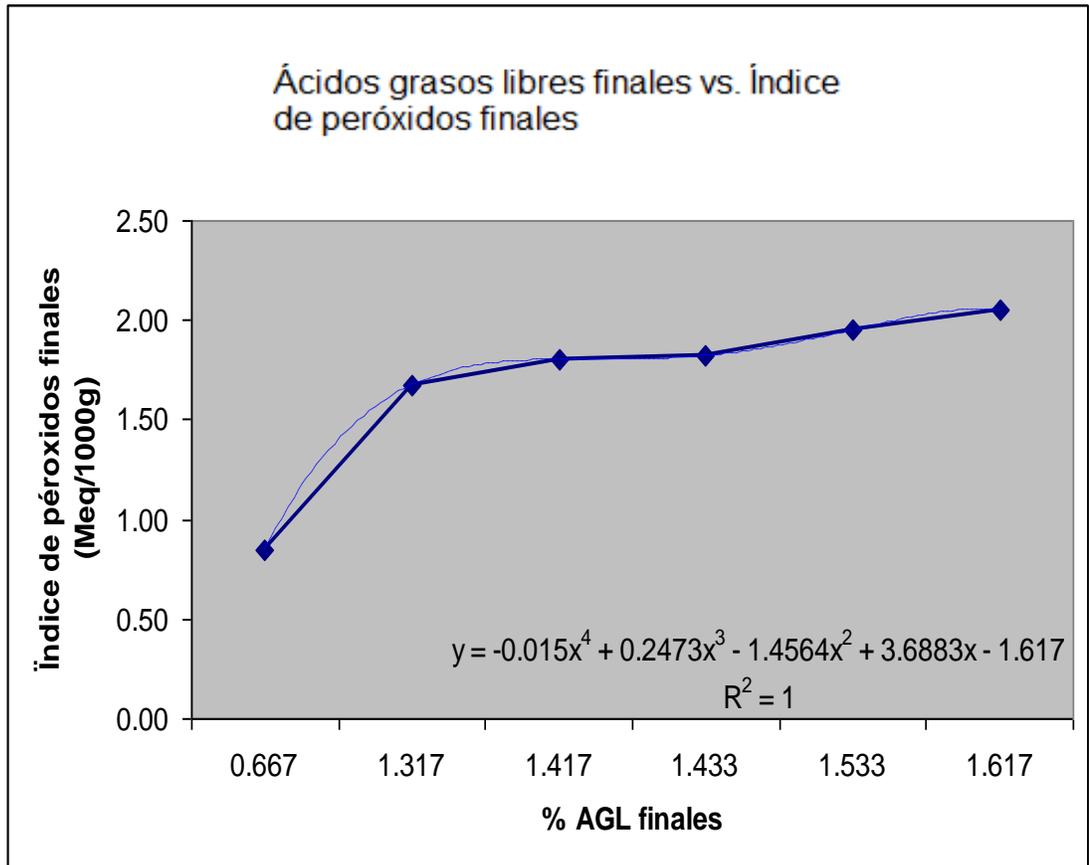
Fuente: elaboración propia. Datos Calculados. Apéndice 3.

Figura 17. Curva de correlación para determinar el grado de neutralización de ácidos grasos libres en función de la demanda de metanol en la reacción de esterificación ácida.



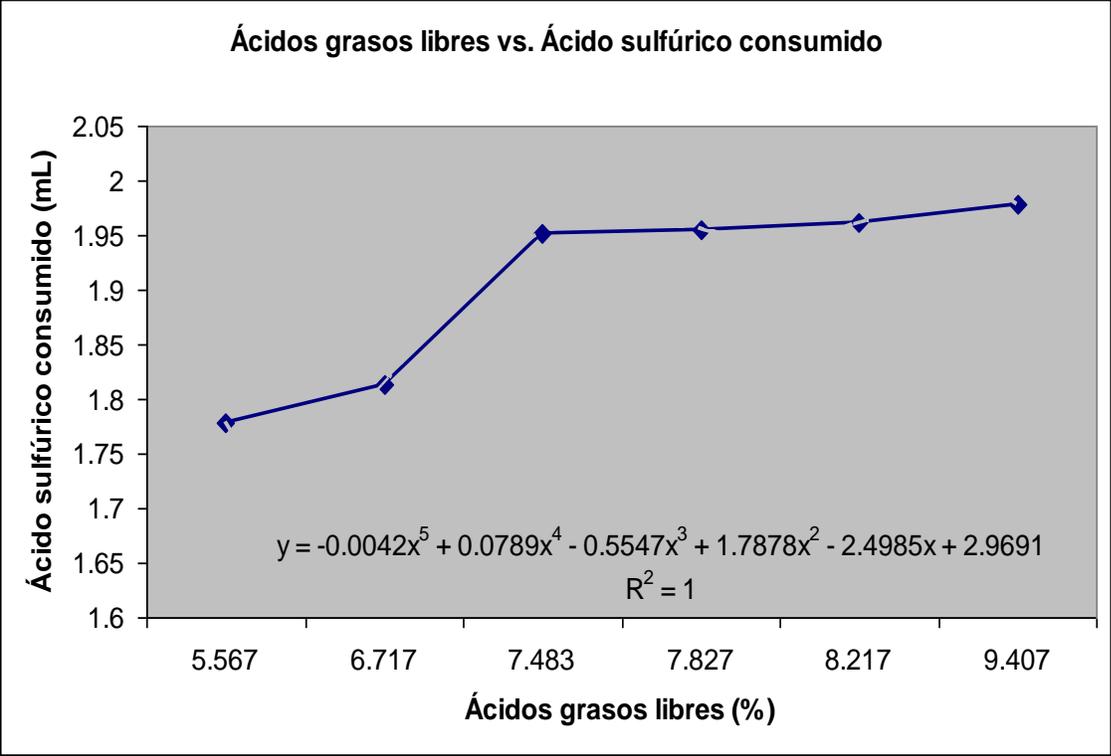
Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 18. **Curva de correlación para determinar índice de peróxidos finales en función de ácidos grasos libres finales.**



Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 19. Curva de correlación para determinar la cantidad de ácido sulfúrico necesario en proceso de esterificación ácida.



Fuente: elaboración propia. Datos calculados. Apéndice 3.

Tabla XXIV. **Resultado de análisis de varianza con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en la caracterización fisicoquímica del aceite vegetal residual.**

<b>Propiedades fisicoquímicas</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>CV</b>	<b>Existe diferencia significativa</b>
Densidad	6.18E-05	1.24E-05	74.2	0.04	<b>No</b>
Humedad	1.24293	0.24859	405.3	5.94	<b>Si</b>
Ácidos grasos libres	25.7986	5.15973	1897.73	0.69	<b>Si</b>
Punto de ebullición	19.1667	3.83333	5.48	0.28	<b>No</b>
Índice de yodo	379.088	75.8175	107.49	0.83	<b>Si</b>
Índice de peróxido	51.4194	10.2839	877.05	1.12	<b>Si</b>
Índice de saponificación	959.205	191.841	25.88	1.77	<b>Si</b>

Fuente: Análisis estadístico ANOVA. Apéndice 5.

Donde:

SS : Suma de cuadrados

MS : Cuadrado de medias dentro de las muestras con determinado grado de libertad

CV = Coeficiente de Pearson



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Concluida la parte experimental en el presente trabajo de graduación, se determinaron los datos para la caracterización de aceite vegetal residual; de tal manera que con base en los resultados obtenidos, se estableció que sí existen variaciones significativas en parámetros fisicoquímicos de aceite vegetal residual analizado en las 6 diferentes semanas; realizando por triplicado cada parámetro fisicoquímico. De la sección de resultados, se observa que en las figuras cuatro a diez los valores planteados para cada parámetro disminuyen y aumentan en cada semana evaluada; por lo tanto no hubo uniformidad en aceites vegetales residuales.

Los valores de ácidos grasos libres iniciales en muestras de aceite vegetal residual, estuvieron por arriba de valores aceptados por normas RTCA 67.04.40:07 (Reglamento Técnico Centroamericano); por lo tanto fue necesario realizar proceso de esterificación ácida para disminuir ácidos grasos libres a los valores aceptados, máximo 2% de ácidos grasos libres. (Ref. 10). Para evitar realizar esterificación ácida a cada semana evaluada, es factible colocar el aceite vegetal residual en un solo tanque el cual con un agitador homogenizará la muestra a evaluar.

Se realizó esterificación ácida (esterificación de fisher), agregando en exceso metanol anhidro y ácido sulfúrico a causa de que no había volumen establecido de consumo para cada reactivo de acuerdo a la cantidad de muestra evaluada de aceite vegetal residual en reacción de esterificación ácida.

Se determinó que hubo un porcentaje aceptable de ácido sulfúrico residual en reacción de esterificación ácida (tabla XXIX), lo cual indicó que la cantidad de ácido sulfúrico utilizado fue suficiente para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en las 6 diferentes muestras evaluadas. Además se logró determinar la cantidad de ácido sulfúrico necesario para reducir la cantidad de ácidos grasos libres por debajo del 2% (figura 14 y tabla XXIX), la función que se determinó fue polinómica de quinto grado.

Para la determinación del grado de neutralización se utilizó el rota evaporador *Buchi Switzerland*, se seleccionó el programa para recuperación de metanol y automáticamente estableció los parámetros de trabajo (Apéndice 2, inciso 8), el tiempo que se adquirió para el proceso fue de quince minutos porque ya no se observó que hubiera condensación de metanol. Se midió el volumen recuperado de metanol y se restó del volumen inicial utilizado, proporcionando el volumen consumido necesario en reacción de esterificación ácida para disminuir ácidos grasos libres hasta un 2%, llegando a obtener parámetros aceptables de acuerdo a norma RTCA 75.02.43:07 (tabla XXVIII) .

En la sección de resultados la figura 12 se ajusta a una función polinómica de cuarto grado, demostrando que existe una disminución entre los parámetros de metanol e índice de acidez; además se observa que hubo mayor consumo de metanol a mayor índice de acidez presente en cada muestra de aceite vegetal residual evaluado.

De la sección de resultados, se observa en la figura 11 la cantidad de metanol que reaccionó en el proceso de esterificación ácida en función de las diferentes cantidades de ácidos grasos libres iniciales, en cada una de las muestras de aceite vegetal residual.

Se determinó la curva de correlación la cual estableció el grado de esterificación ácida en función de metanol consumido a diferentes índices de acidez (Datos calculados, tabla XXIX). La figura once se ajusta a una función polinómica de quinto grado, demostrando una relación de disminución en consumo de metanol para cada índice de acidez evaluado.

Después del proceso de esterificación ácida se determinaron los parámetros fisicoquímicos de ácidos grasos libres residuales, índice de peróxidos residuales y humedad residual (Apéndice 3, tabla XXVII), los cuales estuvieron dentro del rango permitido por norma RTCA 75.02.43:07, para utilizar el aceite vegetal esterificado como materia prima en la producción de biodiesel.

En la figura 13, se observa la relación que se da entre la cantidad de ácidos grasos libres finales e índice de peróxidos finales, se estableció una función polinómica de cuarto grado, demostrando que después del proceso de esterificación ácida los dos parámetros tienden a disminuir.

También se estableció la cantidad de catalizador necesario para llevar a cabo la reacción de esterificación ácida y también disminuir el porcentaje de ácidos grasos libres (Apéndice 3, tabla XXVIII), se pudo observar que el valor más pequeño de acidez y el valor más alto tendieron a establecerse por debajo del 2% de ácidos grasos libres utilizando la misma cantidad de catalizador; además se determinó que es necesario tener un 3% de catalizador sin reaccionar para tener un valor confiable al momento de realizar proceso de esterificación ácida. Todo el proceso de esterificación ácida se llevó a cabo dentro de la campana de extracción para evitar fugas de vapores producidos durante la reacción.

Se realizó un análisis estadístico a través del método de ANOVA o análisis de varianza de un tratamiento con varios grupos, con el cual se determinó que si existe variabilidad significativa entre cada una de las propiedades de las muestras analizadas de aceite vegetal residual.

A partir de la correlación de Pearson se pudo determinar que no es necesario realizar todas las caracterizaciones fisicoquímicas de aceite vegetal residual, debido a que existen relaciones entre parámetros (Apéndice 3, figura 16), evitando así gasto de reactivos, tiempo y energía.

## CONCLUSIONES

1. En la caracterización fisicoquímica de aceite vegetal residual se determinó que existe diferencia significativa en parámetros fisicoquímicos de aceite vegetal residual de las diferentes semanas evaluadas
2. El índice de peróxido disminuyó en los diferentes valores de ácidos grasos libres que presentaron las muestras de aceite vegetal residual, después de llevarse a cabo el proceso de esterificación ácida.
3. La cantidad de ácido sulfúrico residual fue aceptable, pero se estableció que para tener un valor de mayor confianza deberá ser del 3%.
4. Es determinante una ecuación polinómica para obtener la relación de ácido sulfúrico necesario para disminuir las diferentes cantidades de ácidos grasos libres presentes en aceite vegetal residual.
5. Se estableció una ecuación que permite determinar la cantidad de metanol necesario en un proceso de esterificación ácida en aceite vegetal residual con diferentes valores de ácidos grasos libres.



## RECOMENDACIONES

1. Ejecutar un estudio de transesterificación de aceite vegetal residual esterificado a escala laboratorio.
2. Realizar un estudio de producción de biodiesel a nivel planta piloto utilizando aceites vegetales residuales.
3. Desarrollar un estudio sobre el tratamiento que debe de efectuarse a los residuos de sulfatos obtenidos en el proceso de transesterificación.
4. Llevar a cabo el proceso de esterificación a diferentes temperaturas, para con ello obtener resultados más completos en el transcurso del proceso.
5. Evaluar el comportamiento que tienen los aceites vegetales residuales en el proceso de esterificación ácida utilizando otro catalizador.



## BIBLIOGRAFIA

1. *Aceites de fritura.* [en línea].  
<<http://bdnhome.com/tecnologia/temas/fritura.pdf>>. [Consulta: 12 de mayo de 2011].
2. \_\_\_\_\_ . [en línea].  
<[http://www.camposureno.cl/site/index.php?option=com\\_content&view=%20articl%20e&id=305:el-biodiesel-esta-frito&catid=1:ultima-hora&Itemid=1](http://www.camposureno.cl/site/index.php?option=com_content&view=%20articl%20e&id=305:el-biodiesel-esta-frito&catid=1:ultima-hora&Itemid=1)>. [Consulta: 7 de mayo de 2011].
3. *Aceites fijos.* [en línea].  
<<http://www.buenastareas.com/ensayos/Aceites-fijos/339652.html>>. [Consulta: 12 de mayo de 2011].
4. RIVERA, Dafne. *Caracterización de aceites esenciales por cromatografía de gases de tres especies del género piper y evaluación de la actividad citotóxica.* [en línea].  
<[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06\\_2677.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_2677.pdf)>. [Consulta: 22 de septiembre de 2011].
5. HERRERA, Juan. *Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible.* [en línea].  
<<http://repositorio.utp.edu.co/tesisdigitales/texto/6626H565.pdf>>. [Consulta: 22 de septiembre de 2011].

6. *Consideraciones ambientales en torno a los biocombustibles líquidos.*  
[en línea]. <<http://www.eclac.org/cgibin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/1/34201/P34201.xml&xsl=/dmaah/tpl/p9f.xsl&base=/dmaah/tpl/top-bottom.xsl>>. [Consulta: 20 de abril de 2011].
  
7. *Diseño de una instalación de pretratamiento de aceites con alto contenido en ácidos grasos libres para producción de biodiesel.*  
[en línea]. <<http://rodin.uca.es:8081/xmlui/bitstream/handle/10498/6570/33727429.pdf?sequence=1>>. [Consulta: 22 de septiembre de 2011].
  
8. *Especificaciones biodiesel.* [en línea]. <[http://www.mific.gob.ni/LinkClick.aspx?fileticket=YQv\\_B3OwRo%3D&tabid=437&language=en-US](http://www.mific.gob.ni/LinkClick.aspx?fileticket=YQv_B3OwRo%3D&tabid=437&language=en-US)>. [Consulta: 12 de mayo de 2011].
  
9. *Especificaciones grasas y aceites.* [en línea]. <[http://www.puntofocal.gov.ar/notific\\_otros\\_miembros/hnd43\\_t.pdf](http://www.puntofocal.gov.ar/notific_otros_miembros/hnd43_t.pdf)>. [Consulta: 12 de mayo de 2011].
  
10. CORDERO, Jorge. *Evaluación de las propiedades fisicoquímicas del biodiesel.* [en línea]. <[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0849\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0849_Q.pdf)>. [Consulta: 15 de mayo de 2011].

11. DE LEÓN, Víctor. *Evaluación preliminar sobre el aprovechamiento de aceites comestibles desechados de proceso de fritura, mediante su caracterización en la elaboración de jabón*. [en línea]. <[http://biblos.usac.edu.gt/getFicha.asp?glx=402980.glx&skin=&recnum=1&maxrecnum=3&searchString=\(%20VICTOR%20and%20HERBERT\)%20and%20\(%20S\)&orderBy=titulo disp\[a\]&pg=1&biblioteca=>](http://biblos.usac.edu.gt/getFicha.asp?glx=402980.glx&skin=&recnum=1&maxrecnum=3&searchString=(%20VICTOR%20and%20HERBERT)%20and%20(%20S)&orderBy=titulo disp[a]&pg=1&biblioteca=>)>. [Consulta: 22 de septiembre].
12. GANDUGLIA, Federico. *Manual de biocombustibles*. Argentina: IICA, 2009. 200 p.
13. *Glosario del Ingeniero químico*. [en línea]. <<http://www.elprisma.com/apuntes/curso.asp?id=13917>>. [Consulta: 6 de septiembre de 2011].
14. Grasas, aceites, ácidos grasos, triglicéridos. [en línea]. <<http://www.scientificpsychic.com/fitness/aceites-grasas.html>>. [Consulta: 6 de marzo de 2011].
15. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. 4ª ed. Mexico: McGraw-Hill. 2006. 839 p.
16. *Instrumento importante para política ambiental*. [en línea]. <<http://www.marn.gob.gt/documentos/novedades/pp+l.pdf>>. [Consulta: 12 marzo de 2011].

17. LUNA, Glenda. Análisis fisicoquímico y evaluación del rendimiento de extracción del aceite de semilla de moro proveniente de las regiones de Estancuela, Zacapa y San Agustín Acasaguastlán, El Progreso. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 110 p.
18. *Manejo y calibración de equipo volumétrico*. [en línea]. <http://www.ciens.ucv.ve:8080/generador/sites/martinezma/archivos/Calibracion.pdf>>. [Consulta: 6 de junio de 2011].
19. *Manual de biocombustibles*. [en línea]. <[http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/argentina/Documents/Agroenergia/Manual\\_Biocombustibles\\_ARPEL\\_IICA.pdf](http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/argentina/Documents/Agroenergia/Manual_Biocombustibles_ARPEL_IICA.pdf)>. [Consulta: 2 de agosto de 2011].
20. McMURRY, John. *Química orgánica*. 6ª ed. Cengage Learning, 2005. 1338 p.
21. MILLAR, J. C. *Estadística para química analítica*. 2ª ed. USA: Addison-Wesley Iberoamericana, 1993. 113 p.
22. *Programa de análisis de emisiones de biodiesel*. [en línea]. <<http://www.epa.gov/otaq/models/biodsl.htm>>. [Consulta: 12 de marzo de 2011].
23. ZORRILLA A., Santiago ; TORRES X., Miguel. *Guía para elaborar la tesis*. 2ª ed. México: McGraw-Hill, 2005. 111 p.

## APÉNDICE 1

### DATOS ORIGINALES

**Pesos obtenidos en el proceso de medición de la densidad utilizando picnómetro.**

Semana	Peso picnómetro vacío (g)	Peso picnómetro con muestra (g)		
		Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
1	46.33	92.409	92.358	92.409
2	46.33	92.509	92.509	92.509
3	46.33	92.308	92.258	92.258
4	46.33	92.308	92.308	92.258
5	46.33	92.258	92.208	92.208
6	46.33	92.308	92.308	92.308

Fuente: Balanza analítica Boeco Germany, Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales LIEXVE, Química Industrial, USAC.

**Pesos obtenidos en la determinación de humedad en las diferentes muestras de aceite vegetal residual.**

Semana	Peso beacker (g)	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
		Peso inicial muestra (g)	Peso final muestra (g)	Peso inicial muestra (g)	Peso final muestra (g)	Peso inicial muestra (g)	Peso final muestra (g)
1	32.1	25	24.9989	25	24.999	25	24.9988
2	32.1	25	24.9989	25	24.999	25	24.998
3	32.1	25	24.9989	25	24.999	25	24.9982
4	32.1	25	24.9989	25	24.999	25	24.9928
5	32.1	25	24.9989	25	24.999	25	24.9938
6	32.1	25	24.9989	25	24.999	25	24.9936

Fuente: Balanza analítica Boeco Germany, Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales LIEXVE, Química Industrial, USAC.

**Volúmenes consumidos de hidróxido en la determinación de ácidos grasos libres para las diferentes muestras de aceites vegetales residuales**

Semana	Volumen etanol (mL)	Peso muestra aceite (g)	Concentración de [KOH]	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
				Volumen consumido de KOH (mL)	Volumen consumido de KOH (mL)	Volumen consumido de KOH (mL)
1	50	28.2	0.1 N	5.50	5.70	5.50
2	50	28.2	0.1 N	7.80	7.84	7.84
3	50	28.2	0.1 N	6.70	6.70	6.75
4	50	28.2	0.1 N	9.40	9.42	9.40
5	50	28.2	0.1 N	7.45	7.50	7.50
6	50	28.2	0.1 N	8.25	8.20	8.20

Fuente: Unidad de titulación, Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, LIEXVE, Química Industrial. USAC.

**Volúmenes consumidos del agente titulante en determinación de índice de yodo para muestra de aceite vegetal residual**

Semana	Volumen solución Wijs (mL)	Peso muestra aceite (g)	Concentración de tiosulfato de sodio	Blanco 1	Blanco 2	Blanco 3
				Volumen consumido de tiosulfato de sodio (mL)	Volumen consumido de tiosulfato de sodio (mL)	Volumen consumido de tiosulfato de sodio (mL)
1	25	0.13	0.1 N	29.00	37.20	36.80
2	25	0.13	0.1 N	26.50	26.61	26.47
3	25	0.13	0.1 N	28.08	27.75	28.09
4	25	0.13	0.1 N	24.00	23.65	23.79
5	25	0.13	0.1 N	26.06	26.19	26.41
6	25	0.13	0.1 N	23.48	23.09	23.51

Semana	Volumen solución Wijs (mL)	Peso muestra aceite (g)	Concentración de tiosulfato de sodio	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
				Volumen consumido de tiosulfato de sodio (mL)	Volumen consumido de tiosulfato de sodio (mL)	Volumen consumido de tiosulfato de sodio (mL)
1	25	0.13	0.1 N	18.00	18.60	18.40
2	25	0.13	0.1 N	16.00	16.20	16.00
3	25	0.13	0.1 N	17.50	17.20	17.50
4	25	0.13	0.1 N	14.30	14.10	14.20
5	25	0.13	0.1 N	15.80	15.70	15.90
6	25	0.13	0.1 N	13.60	13.40	13.70

Fuente: Unidad de titulación, Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, LIEXVE, Química Industrial. USAC.

**Temperaturas obtenidas del punto de ebullición para cada muestra de aceite vegetal residual.**

Semana	Temperatura °C		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
1	296	296	295
2	299	298	298
3	299	299	296
4	297	298	298
5	299	299	298
6	296	297	297

Fuente: Plancha VWR 7X7 Ceramic y termómetro, Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, LIEXVE, Química Industrial. USAC.

**Volúmenes consumidos de agente titulante en determinación de índice de peróxidos cada muestra de aceite vegetal residual.**

Semana	Volumen de cloroformo-ácido acético (3:2) (mL)	Peso (g)	Tiosulfato de sodio	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Blanco 1
				Tio-sulfato de sodio (mL)			
1	30	5	0.1 N	4.36	4.23	4.35	0.7
2	30	5	0.1 N	6.36	6.38	6.36	0.7
3	30	5	0.1 N	5.32	5.37	5.36	0.7
4	30	5	0.1 N	7.71	7.58	7.89	0.7
5	30	5	0.1 N	5.92	5.91	5.93	0.7
6	30	5	0.1 N	6.51	6.56	6.60	0.7

Fuente: Unidad de titulación, Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, LIEXVE, Química Industrial. USAC.

**Volúmenes consumidos de agente titulante en la determinación de índice de saponificación para cada muestra de aceite vegetal residual.**

Semana	Hidróxido de potasio alcohólica (mL)	Peso (g)	Ácido clorhídrico	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Blanco 1
				Ácido clorhídrico (mL)	Ácido clorhídrico (mL)	Ácido clorhídrico (mL)	Ácido clorhídrico (mL)
1	25	2	0.5 N	1.78	1.74	1.79	11.80
2	25	2	0.5 N	0.80	0.75	0.76	11.80
3	25	2	0.5 N	0.93	0.96	0.92	11.80
4	25	2	0.5 N	0.11	0.10	0.13	11.80
5	25	2	0.5 N	0.85	0.86	0.87	11.80
6	25	2	0.5 N	0.65	0.62	0.53	11.80

Fuente: Unidad de titulación, Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, LIEXVE, Química Industrial. USAC.

## APÉNDICE 2

### MUESTRA DE CÁLCULO

1. Cálculo de la media aritmética:

$$X = \frac{\sum X_i}{N} \quad (1)$$

Donde:

X : Media aritmética

$X_i$  : Dato de la i-ésima observación

N : Número de observación

- 1.1. Cálculo de la media aritmética de los pesos obtenidos de las diferentes muestras de aceite vegetal residual en la medición de la densidad.

$$X = \frac{(92.409 \text{ g} + 92.358 \text{ g} + 92.409 \text{ g})}{3} = 92.392 \text{ g}$$

Los resultados para las siguientes corridas de la media aritmética de los pesos para cada una de las caracterizaciones realizadas, se presentan en la sección de datos calculados.

2. Cálculo de las densidades de las diferentes muestras de aceite vegetal residual.

$$\rho = \frac{(P_2 - P_1)}{V_1} \quad (2)$$

Donde:

$\rho$  : Densidad de la solución (g/mL)

$P_1$  : Peso del picnómetro (g)

$P_2$  : Peso de la muestra de aceite, más el peso inicial de picnómetro (g)

$V_1$  : Volumen de picnómetro (50.195 mL)

2.1. Cálculo de la densidad de aceite vegetal residual de la primera semana evaluada a 23 +- 1°C.

$$\rho = \frac{(92.409 \text{ g} - 46.330 \text{ g})}{50.195 \text{ mL}} = 0.918 \text{ g/mL}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las muestras de aceite vegetal residual en las distintas semanas evaluadas, se presentan en la sección de datos calculados.

3. Cálculo de ácidos grasos libres presentes en las muestras de aceite vegetal residual

$$\% \text{ AGL} = \frac{(\text{mL Base} * \text{N} * 28.2)}{\text{PM}} \quad (3)$$

Donde:

%AGL : Ácidos grasos libres (%)

Base : Volumen de hidróxido de sodio consumido (mL)

N : Concentración de hidróxido de sodio (N)

PM : Peso de muestra de aceite vegetal residual (g)

- 3.1. Cálculo de ácidos grasos libres de la primer semana evaluada

$$\% \text{ AGL} = \frac{(5.50 \text{ mL} * 1 \text{ N} * 28.2)}{28.2 \text{ g}} = 5.50\%$$

Los resultados para las siguientes corridas de las muestras de aceite vegetal residual, se presentan en la sección de datos calculados.

4. Cálculo de humedad presente en aceite vegetal residual

$$\text{H (g)} = (\text{Po aceite} - \text{Pf aceite}) \quad (4)$$

Donde:

H : Humedad presente en aceite vegetal residual (g)

Po : Peso inicial de aceite vegetal residual (g)

Pf : Peso final de aceite vegetal residual (g)

- 4.1. Cálculo para determinar humedad presente en muestra de aceite vegetal residual de primer semana evaluada.

$$H (g) = ( 25 \text{ g} - 24.99 \text{ g} ) = 0.01 \text{ g}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las muestras de aceite vegetal residual, se presentan en la sección de datos calculados.

5. Cálculo para determinar índice de yodo en muestras de aceite vegetal residual.

$$\text{Índice de yodo} = \frac{( B - S ) * N * 12.69}{Pm} \quad (5)$$

Donde:

B : Volumen consumido de agente titulante en el blanco (mL)

S : Volumen consumido de agente titulante en muestra de aceite (mL)

N : Normalidad de solución de tiosulfato de sodio

Pm : Peso de muestra de aceite vegetal residual (g)

- 5.1. Cálculo para determinar índice de yodo en aceite vegetal residual de primer semana evaluada.

$$\text{Índice de yodo} = \frac{(29 \text{ mL} - 18 \text{ mL}) * 0.1 * 12.69}{0.13 \text{ g}} = 107.37 \text{ (cg/gmuestra)}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las muestras de aceite vegetal residual, se presentan en la sección de datos calculados.

6. Cálculo para índice de peróxidos en muestras de aceite vegetal residual.

$$IP = \frac{(S - B) * N * 80}{Pm} \quad (6)$$

Donde:

IP : Índice de peróxidos (meq/1000g)

S : Volumen consumido de agente titulante en muestra (mL)

B : Volumen consumido de agente titulante en blanco (mL)

N : Normalidad de solución de tiosulfato de sodio

6.1. Cálculo de índice de peróxidos en muestra de aceite vegetal residual de primer semana evaluada.

$$IP = \frac{((4.36 \text{ mL} - 0.7 \text{ mL}) * 0.1N * 80)}{5 \text{ g}} = 6.99 \text{ (meq/1000g)}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las muestras de aceite vegetal residual, se presentan en la sección de datos calculados.

7. Cálculo para índice de saponificación en muestras de aceite vegetal residual.

$$SAP = \frac{56.1 * N * (Titulación\ blanco - Titulación\ muestra)}{Pm} \quad (7)$$

Donde:

SAP : Índice de saponificación (mg KOH / g muestra)

N : Concentración de ácido clorhídrico (N)

Titulación blanco : Volumen consumido de agente titulante (mL)

Titulación muestra : Volumen consumido de agente titulante (mL)

- 7.1. Cálculo de índice de saponificación de aceite vegetal residual de primer semana evaluada.

$$SAP = \frac{56.1 * 0.5N * (11.8 - 1.77)}{2\text{ g}} = 140.60(\text{mgKOH/gmuestra})$$

Los resultados para las siguientes corridas de las muestras de aceite vegetal residual, se presentan en la sección de datos calculados.

8. Cálculo para determinar la cantidad de metanol que reaccionó en el proceso de esterificación ácida.

$$\text{Metanol} = ( P_o - P_f ) \quad (8)$$

Donde:

Metanol : Volumen de metanol que reaccionó (mL)

P<sub>o</sub> : Gramos iniciales de metanol (mL)

P<sub>f</sub> : Gramos recuperado de metanol sin reaccionar (mL)

- 8.1. Cálculo de metanol que reaccionó en proceso de esterificación ácida en primer semana evaluada, utilizando 100 mL de muestra de aceite vegetal residual esterificado. Los parámetros trabajados en el rota evaporador fueron:

Tbaño : 60°C      Tebullición: 40°C      Trefrigerante: 20°C

Presión: 337 mbar      Patmosférica: 843 mbar

$$\text{Metanol} = ( 23.7 \text{ g} - 16.79 \text{ g} ) = 6.91 \text{ g}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las muestras de aceite vegetal residual esterificado, se presentan en la sección de datos calculados.

9. Determinación de curvas de correlación para evaluar el grado de esterificación ácida en función de metanol consumido.

Se determinó ploteando los índices de ácidos grasos libres iniciales contra la cantidad de gramos de metanol que reaccionaron en el proceso de esterificación ácida, por medio de una hoja de cálculo de Excel, con su respectiva ecuación matemática y coeficiente de correlación.

- 9.1. La ecuación de correlación para evaluar el grado de esterificación ácida a través de metanol consumido en función de ácidos grasos libres iniciales:

$$y = 0.0899C^5 - 1.5853C^4 + 10.458C^3 - 31.666C^2 + 42.784C - 13.183$$

$$R^2 = 1$$

Donde:

y : Cantidad de metanol necesario para lograr proceso de esterificación ácida en aceites vegetales residuales (g)

C : Porcentaje de ácidos grasos libres (%)

Los resultados de cantidades necesarias para lograr proceso de esterificación ácida con diferentes valores de ácidos grasos libres, se presentan en la sección de datos calculados.

10. Cálculo para evaluar el grado de neutralización de aceite vegetal residual en función de la demanda de alcohol en proceso de esterificación ácida.

Se determinó ploteando los valores de alcohol consumido contra la cantidad de ácidos grasos libres finales en el proceso de esterificación ácida, por medio de una hoja de cálculo de Excel, con su respectiva ecuación matemática y coeficiente de correlación.

- 10.1. La ecuación de correlación para evaluar el grado de neutralización de aceite vegetal residual a través de alcohol consumido en proceso de esterificación ácida en función de ácidos grasos libres finales:

$$y = 0.0315C^5 - 0.5618C^4 + 3.7771C^3 - 11.88C^2 + 17.4C - 8.1$$
$$R^2 = 1$$

Donde:

C : Cantidad de metanol necesario para neutralizar ácidos grasos libres en proceso de esterificación ácida (g)

y : Porcentaje de ácidos grasos libres (%)

Los resultados de cantidades necesarias para lograr el grado de neutralización en proceso de esterificación ácida con diferentes valores de ácidos grasos libres, se presentan en la sección de datos calculados.

11. Cálculo de índice de peróxidos en función de ácidos grasos libres después del proceso de esterificación ácida de aceites vegetales residuales.

Se determinó ploteando los valores de índice de peróxidos contra la cantidad de ácidos grasos libres después del proceso de esterificación ácida, por medio de una hoja de cálculo de Excel, con su respectiva ecuación matemática y coeficiente de correlación.

- 11.1. La ecuación de correlación para determinar la variación de índice de peróxidos en función de ácidos grasos libres después del proceso de esterificación ácida es la siguiente:

$$y = -0.015C^4 + 0.2473C^3 - 1.4564C^2 + 3.6883C - 1.617$$
$$R^2 = 1$$

Donde:

C : Cantidad de ácidos grasos libres (%) presentes después del proceso de esterificación ácida de aceites vegetales residual

y : Índice de peróxidos después del proceso de esterificación ácida.

Los resultados de índice de peróxidos finales y ácidos grasos libres finales, se presentan en la sección de datos calculados.

## APÉNDICE 3

### DATOS CALCULADOS

Parámetros fisicoquímicos de aceite vegetal residual, de las diferentes semanas evaluadas.

Semana	Parámetros						Índice de Saponificación (mg KOH/gmuestra)
	Densidad (g/mL)	Humedad (%)	Ácidos grasos libres (%)	Punto de ebullición (°C)	Yodo (cg/g muestra)	Índice de Peróxido (Meq/1000g)	
1	0.918	0.11	5.50	296	107.37	6.99	140.600
	0.917	0.10	5.70	296	107.80	6.78	141.100
	0.918	0.12	5.50	295	106.80	6.96	140.400
2	0.920	0.19	7.80	299	102.49	10.19	154.300
	0.920	0.17	7.84	298	101.60	10.22	155.000
	0.920	0.20	7.84	298	102.20	10.18	154.800
3	0.916	0.16	6.70	299	103.25	8.52	152.400
	0.915	0.18	6.70	299	102.95	8.60	152.000
	0.915	0.18	6.75	296	103.40	8.58	152.600
4	0.916	0.77	9.40	297	94.65	12.35	164.000
	0.916	0.70	9.42	298	93.20	12.14	164.100
	0.915	0.72	9.40	298	93.60	12.63	163.700
5	0.915	0.61	7.45	299	100.20	9.48	153.600
	0.914	0.65	7.50	299	102.40	9.46	153.400
	0.914	0.62	7.50	298	102.60	9.50	153.300
6	0.916	0.68	8.25	296	96.44	10.43	156.400
	0.916	0.70	8.20	297	94.60	10.50	156.800
	0.916	0.64	8.20	297	95.80	10.56	158.000

Fuente: Apéndices 1 y 2.

**Valores promedio y desviación estándar de la densidad, humedad y ácidos grasos libres**

Semana	Densidad (g/mL)	Media X	Desviación estándar	Humedad (%)	Media X	Desviación estándar	Ácidos grasos libres (%)	Media X	Desviación estándar
1	0.918	0.917	0.001	0.11	0.103	0.010	5.50	5.567	0.115
	0.917			0.10			5.70		
	0.918			0.12			5.50		
2	0.920	0.920	0.000	0.19	0.177	0.015	7.80	7.827	0.023
	0.920			0.17			7.84		
	0.920			0.20			7.84		
3	0.916	0.915	0.001	0.16	0.173	0.012	6.70	6.717	0.029
	0.915			0.18			6.70		
	0.915			0.18			6.75		
4	0.916	0.916	0.001	0.77	0.723	0.036	9.40	9.407	0.012
	0.916			0.70			9.42		
	0.915			0.72			9.40		
5	0.915	0.914	0.001	0.61	0.637	0.021	7.45	7.483	0.029
	0.914			0.65			7.50		
	0.914			0.62			7.50		
6	0.916	0.916	0.000	0.68	0.693	0.031	8.25	8.217	0.029
	0.916			0.70			8.20		
	0.916			0.64			8.20		

Fuente: Apéndices 1 y 2.

**Valores promedio y desviación estándar de punto de ebullición,  
índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación**

Ebullición (°C)	Media X	Desviación estándar	Yodo (cg/g muestra)	Media X	Desviación estándar	Peróxido (Meq/1kg)	Media X	Desviación estándar	Saponificación (mg KOH/Mguez tra)	Media X	Desviación estándar
296	296	0.577	107.37	107.32	0.50	6.99	6.91	0.11	140.600	140.70	0.36
296			107.80			6.78			141.100		
295			106.80			6.96			140.400		
299	298	0.577	102.49	102.10	0.45	10.19	10.20	0.02	154.300	154.70	0.36
298			101.60			10.22			155.000		
298			102.20			10.18			154.800		
299	299	0.577	103.25	103.20	0.23	8.52	8.57	0.04	152.400	152.33	0.31
299			102.95			8.60			152.000		
298			103.40			8.58			152.600		
297	298	0.577	94.65	93.82	0.75	12.35	12.37	0.25	164.000	163.93	0.21
298			93.20			12.14			164.100		
298			93.60			12.63			163.700		
299	299	0.577	100.20	101.73	1.33	9.48	9.48	0.02	153.600	153.43	0.15
299			102.40			9.46			153.400		
298			102.60			9.50			153.300		
296	297	0.577	96.44	95.61	0.93	10.43	10.50	0.07	156.400	157.07	0.83
297			94.60			10.50			156.800		
297			95.80			10.56			158.000		

Fuente: Apéndices 1 y 2.

**Datos de media aritmética de metanol residual, ácidos grasos residuales, índice de peróxidos finales, humedad final de aceite vegetal residual**

Semana	Metanol residual (%)	Media X	Acidez residual (%)	Media X	Índice de peróxidos final (Meq/1000g)	Media X	Humedad residual (%)	Media X
1	70.84	70.90	0.65	0.67	0.83	0.85	3.92	3.92
	71.39		0.70		0.89		3.91	
	70.46		0.65		0.83		3.92	
2	70.97	70.91	1.40	1.42	1.78	1.80	3.96	3.96
	70.80		1.40		1.78		3.97	
	70.97		1.45		1.84		3.95	
3	73.06	73.15	1.35	1.32	1.72	1.67	3.96	3.95
	73.20		1.30		1.65		3.95	
	73.20		1.30		1.65		3.95	
4	71.26	71.37	1.65	1.62	2.10	2.05	3.96	3.96
	71.47		1.60		2.03		3.96	
	71.39		1.60		2.03		3.96	
5	73.08	73.19	1.40	1.43	1.78	1.82	3.92	3.92
	73.41		1.45		1.84		3.93	
	73.08		1.45		1.84		3.90	
6	71.81	71.81	1.50	1.53	1.91	1.95	3.92	3.91
	71.56		1.55		1.97		3.90	
	72.06		1.55		1.97		3.90	

Fuente: Apéndices 1 y 2.

**Valores de ácidos grasos libres iniciales y finales, índices de peróxidos iniciales y finales; y los delta para cada semana evaluada**

Semana	(%) Ácidos grasos libres iniciales	(%) Ácidos grasos libres finales	Δ (%) Ácidos grasos libres	Índice de peróxidos inicial (Meq/1000g)	Índice de peróxidos final (Meq/1000g)	Δ índice de peróxidos (Meq/1000g)
1	5.57	0.67	4.90	6.91	0.85	6.06
2	7.83	1.42	6.41	10.20	1.80	8.40
3	6.72	1.32	5.30	8.57	1.67	6.90
4	9.41	1.62	7.97	12.37	2.05	10.32
5	7.48	1.43	5.95	9.48	1.82	7.66
6	8.22	1.53	6.60	10.50	1.95	8.55

Fuente: Apéndices 1 y 2.

**Valores de ácido sulfúrico consumidos, porcentajes de ácido sulfúrico sin reaccionar en el proceso de esterificación ácida de aceites vegetales residual. Cantidad inicial utilizada 2 mL.**

Semana	Volumen de ácido sulfúrico consumido (mL)	Media aritmética X	Ácido sulfúrico que reaccionó (%)	Ácido sulfúrico sin reaccionar (%)
1	0.222	0.222	88.917	11.083
	0.223			
	0.220			
2	0.045	0.045	97.767	2.233
	0.045			
	0.044			
3	0.187	0.187	90.633	9.367
	0.186			
	0.189			
4	0.021	0.022	98.883	1.117
	0.023			
	0.023			
5	0.048	0.049	97.567	2.433
	0.049			
	0.049			
6	0.038	0.038	98.083	1.917
	0.039			
	0.038			

Fuente: Apéndices 1 y 2.

**Porcentajes de metanol consumido y residual en proceso de esterificación  
ácida utilizando 100 mL de aceite vegetal residual**

Metanol utilizado (g)	Metanol residual (g)	Metanol consumido (g)	(%) Metanol residual	(%) Metanol consumido
23.70	16.80	6.90	70.90	29.10
23.70	16.81	6.89	70.91	29.09
23.70	17.74	5.96	73.19	26.81
23.70	16.92	6.78	71.70	28.30
23.70	17.37	6.33	73.15	26.85
23.70	17.02	6.68	71.83	28.17

Fuente: Apéndices 1 y 2.

**Valores de correlación de Pearson**

Correlations (Pearson)

	Saponific	Iyodo	AcidosGra	Densidad	Ebullici	Humedad
Iyodo	-0.9064					
AcidosGra	0.9249	-0.9311				
Densidad	-0.2465	0.2880	-0.1594			
Ebullici	0.3621	-0.1763	0.3418	-0.1283		
Humedad	0.7324	-0.8445	0.7847	-0.5771	0.1559	
Iperoxido	0.9212	-0.9208	0.9954	-0.1249	0.3504	0.7527

Cases Included 18      Missing Cases 0

Fuente: Apéndice 4, Programa ANOVA.



## APÉNDICE 4

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

Este análisis se realizará a través del método de ANOVA o análisis de varianza, denominado “Análisis de Varianza de Clasificación Simple”, con la cual se determinará si existe o no una diferencia o variabilidad significativa entre cada una de las propiedades de las muestras analizadas. El procedimiento es el siguiente:

- **Variación dentro de las muestras:**

Para una muestra de  $n$  mediciones  $X_1, X_2, \dots, X_n$  se define como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los datos de las mediciones y su media  $X'$  correspondiente, dividida entre  $n$  menos uno, así:

( 9)

$$V_d = \frac{\sum_i^n ((X_i - X')^2)}{n - 1}$$

Donde:

$\Sigma$  : Sumatoria

$V_d$  : Variación dentro de las muestras

$X_i$  : Valor de la propiedad medida

$X'$  : Valor de la media de propiedades

$n$  : Número de mediciones

- Se calcula el valor de la media de las muestras ( $X_m$ ).
- Se calcula el cuadrado de medias dentro de las muestras ( $CDM_d$ ), con:

$$CDM_d = \frac{\sum_i^h (V_{di})}{n} \quad \text{con } gl = h*(n-1) \quad ))$$

Donde:

V<sub>di</sub> : Valor de la variación para cada muestra

gl : Grados de libertad

h : Número de muestras

n : Número de propiedades

- **Variación entre las muestras**

Esta variación se define como la sumatoria de los cuadrados de las diferencias entre la media de propiedades y el valor de la media de las muestras  $X_m$ , así:

$$V_e = \frac{\sum_i^h ((X'_i - X_m)^2)}{h-1} \quad 11)$$

Donde:

Ve : Variación entre las muestras

X'<sub>i</sub> : Media de las propiedades de n mediciones

h : Número de muestras

X<sub>m</sub> : Media de las muestras de h mediciones

- Se calcula el cuadrado de las medias entre las muestras (CDMe) así:

$$CDM_e = V_e * (h-1) \quad \text{con } gl = (h-1)$$

- Se divide el CDMe entre el CDMd, el cociente forma el valor calculado de la función F de cola, así:

$$F_{[(h-1)/(h(n-1))]} = \frac{CDM_e}{CDM_d} \quad (13)$$

- Se compara el valor de F con el valor de  $F_c$  o valor crítico de F para una prueba de dos colas (Referencia 1.5), utilizando la distribución de F-Fisher ( $\alpha/2$ ) teniendo en cuenta los grados de libertad correspondientes y utilizando una significancia de 5% ( $\alpha = 0.05$ ).
- Conclusiones:
  - Si  $F \leq F_c$ : No existe variabilidad significativa.
  - Si  $F > F_c$ : Si existe variabilidad significativa.
- En la siguiente tabla se resume el método:

### Resumen del método ANOVA

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F
Entre las muestras	$CDM_e$	$h-1$	$V_e$	$\frac{CDM_e}{CDM_d}$
Dentro de las muestras	$CDM_d$	$h*(n-1)$	$V_d$	

Fuente: J. C. Millar, Estadística para Química Analítica, p. 52.

Utilizando el programa estadístico ANOVA se obtuvieron los siguientes resultados en caracterización de aceite vegetal residual:

**Análisis de la variación de parámetros fisicoquímicos en aceite vegetal residual de las diferentes semanas evaluadas**

<b>Propiedades fisicoquímicas</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>CV</b>	<b>Existe diferencia significativa</b>
Densidad	6.18E-05	1.24E-05	74.2	0.04	<b>No</b>
Humedad	1.24293	0.24859	405.3	5.94	<b>Si</b>
Ácidos grasos libres	25.7986	5.15973	1897.73	0.69	<b>Si</b>
Punto de ebullición	19.1667	3.83333	5.48	0.28	<b>No</b>
Índice de yodo	379.088	75.8175	107.49	0.83	<b>Si</b>
Índice de peróxido	51.4194	10.2839	877.05	1.12	<b>Si</b>
Índice de saponificación	959.205	191.841	25.88	1.77	<b>Si</b>

Fuente: Apéndices 3 y 4.

## APÉNDICE 5

### PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN

**Descripción de cristalería necesaria para realizar caracterización físicoquímica de aceite y esterificación ácida.**

MATERIAL Y EQUIPO					
	Cant.	Artículo	Descripción	Capacidad	Total Q.
<b>CRISTALERÍA</b>	5	Agitadores	Magnéticos	1 pulgada	226.6
	4	Balón aforado	Vidrio	1000 mL	809
	10	Beaker	Vidrio Boeco	500 mL	302
	10	Beaker	Vidrio Boeco	100 mL	281
	2	Bureta	Llave teflón	25 mL	647.5
	1	Embudo	Vidrio		18.75
	10	Erlenmeyer	Vidrio Boeco	250 mL	765
	1	Espátula	Mango de madera	15 cm longitud	62
	1	Papel filtro	Whatman	12.5 cm	165.5
	1	Picnómetro	Vidrio	25 mL	250
	2	Pipeta volumétrica	Vidrio	25 mL	89
	1	Pipeta volumétrica	Vidrio	5 mL	27.45
	1	Pizeta	Plástico	125 mL	23.52
	2	Probeta	Vidrio	25 mL	168.7
	1	Termómetro	Vidrio	300 °C	225
	10	Tubos de ensayo	Vidrio		126
	1	Varilla de Agitación	Vidrio	8*300 mm	10.3
	10	Viales	Vidrio	100 mL	25
				<b>SUB-TOTAL</b>	4,233.82

Fuente: elaboración propia.

**Equipo necesario para realizar caracterización fisicoquímica de aceite  
y esterificación ácida.**

EQUIPO	Nombre	Descripción	Precio (Q.)	Depre- ciación (Q.)	Total (Q.)
	Balanza analítica	Boeco Germany Max 210 g d = 0.1 mg	18,395.00	919.75	17,475.25
	Campana de extracción	PREMLAB Laboratory Fume Hoods Modelo APV-655 Voltaje 110 Amperio 7 Serie 120	36,957.00	1847.8 5	35,109.15
	Rota evapo- rador	*BUCHI SWITZERLAND Vacuum Pump V-700 *BUCHI Vacuum Controller V- 850 *BUCHI Rotavapor RII	32,000.00	1600	30,400
	Plancha de calenta- miento	VWR 7x7 Ceramic Volts 120 VAC Watts 900 50/60 Hz 1 phase 10 amperios 250 Volts	3,280.00	164	3,116
		<b>SUB-TOTAL</b>			<b>86,100.40</b>

Fuente: elaboración propia.

**Reactivos necesarios para realizar caracterización fisicoquímica de  
aceite y esterificación ácida.**

<b>REACTIVOS</b>	<b>Cant</b>	<b>Reactivo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo Unitario (Q.)</b>
	1	Metanol	2.5 L MERCK	250.75
	1	Etanol	2.5 L MERCK	314.20
	1	Hidróxido de sodio	500 g MERCK	210.30
	1	Hidróxido de potasio	500 g MERCK	198.45
	1	Agua desmineralizada	18.9 L	12.73
	1	Fenolftaleína	25 g MERCK	340.10
	1	Reactivo de Wijs	1 L	480.00
			<b>SUB-TOTAL</b>	<b>Q. 1,806.53</b>

Fuente: elaboración propia.

**Energía consumida por cada equipo utilizado en la caracterización  
físicoquímica de aceite y esterificación ácida.**

<b>ENERGÍA</b>					
<b>Equipo</b>	<b>Potencia (Watts)</b>	<b>No. Horas</b>	<b>kW-hora totales</b>	<b>Costo kW- hora</b>	<b>Costo Total (Q.)</b>
Plancha de Calentamiento	1113	21	23.373	1.67	39.03291
Balanza Analítica	6	30	0.18	1.67	0.3006
Campana de extracción	8000	2	16	1.67	26.72
				<b>SUB- TOTAL</b>	<b>Q. 66.05</b>
<b>COSTO TOTAL DE INVERSIÓN</b>				<b>Q. 89,617.09</b>	

Fuente: elaboración propia.

## APÉNDICE 6

### FOTOGRAFÍAS DE LA INVESTIGACIÓN

#### Detalle de la unidad de utilizada en la determinación de humedad



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

#### Detalle de la unidad utilizada en la determinación de índice de saponificación



Fuente: Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

**Detalle de la unidad utilizada para la titulación de los diferentes parámetros fisicoquímicos analizados**



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

**Detalle de la preparación de las diferentes muestras de aceite vegetal residual para cada semana evaluada**



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

**Detalle de rota evaporador utilizado, para determinar cantidad de metanol que reaccionó en proceso de esterificación ácida.**



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

**Detalle de balanza analítica utilizada para determinar pesos en las diferentes muestras de aceite vegetal residual**



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



# APÉNDICE 7

## HOJA TÉCNICA DEL REACTIVO DE METANOL



### Specification

<http://certificates.merck.de>

Date of print: 03.06.2010

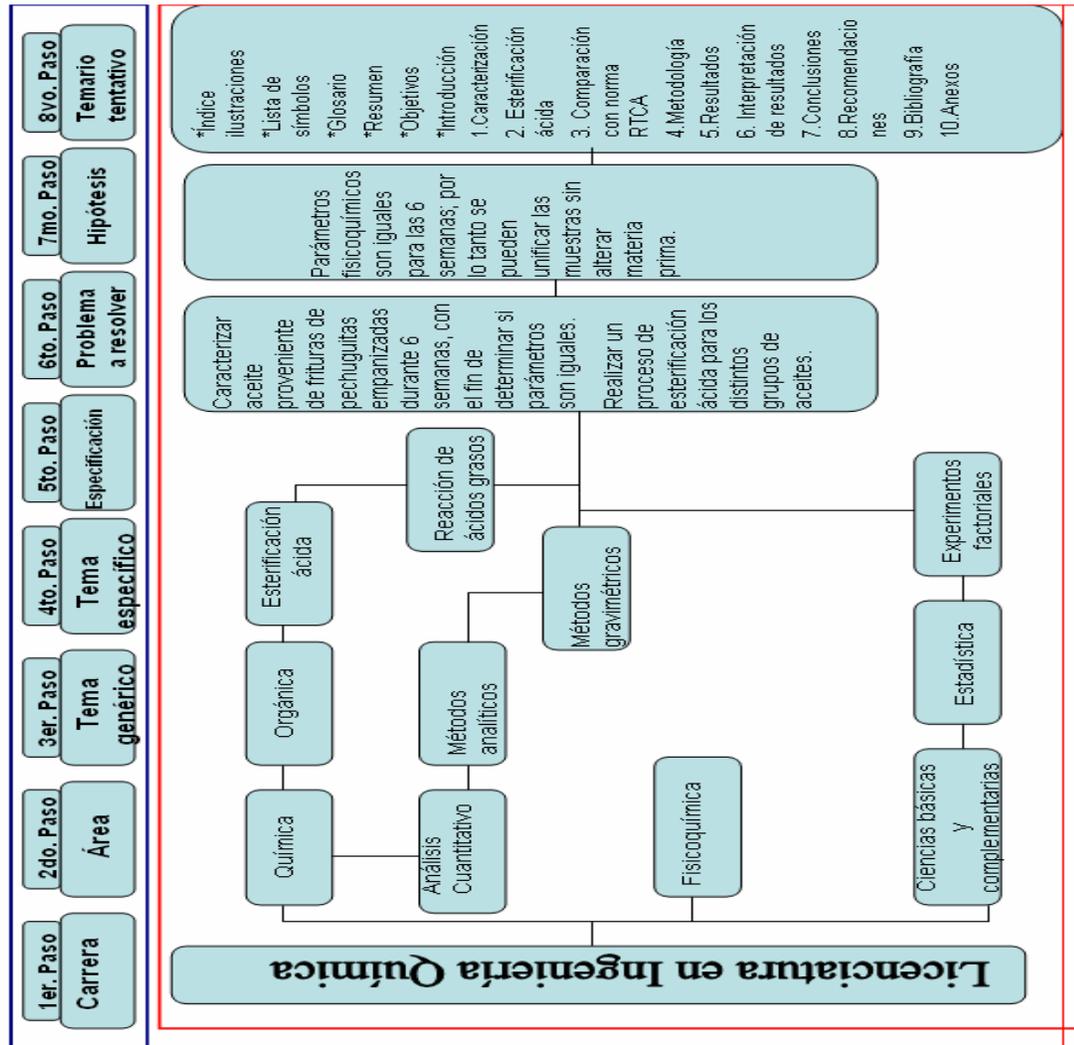
1.06009.5000 Methanol for analysis EMSURE®  
ACS,ISO,Reag. Ph Eur

	Spec. Values	
Purity (GC)	≥ 99.9	%
Identity (IR)	conforms	
Appearance	clear	
Colour	≤ 10	Hazen
Solubility in water	conforms	
Acidity	≤ 0.0002	meq/g
Alkalinity	≤ 0.0002	meq/g
Density (d 20 °C/20 °C)	0.791 - 0.793	
Boiling point	64 - 65	°C
Ethanol (GC)	≤ 0.05	%
Acetone	≤ 0.001	%
Acetaldehyde	≤ 0.001	%
Formaldehyde	≤ 0.001	%
Readily carbonizable substances	conforms	
Carbonyl compounds (as CO)	≤ 0.001	%
Chloride (Cl)	≤ 0.5	ppm
Sulphate (SO <sub>4</sub> )	≤ 1	ppm
Substances reducing potassium permanganate (as O)	≤ 0.00025	%
Ag (Silver)	≤ 0.000002	%
Al (Aluminium)	≤ 0.00005	%
As (Arsenic)	≤ 0.000002	%
Au (Gold)	≤ 0.000002	%
Ba (Barium)	≤ 0.00001	%
Be (Beryllium)	≤ 0.000002	%
Bi (Bismuth)	≤ 0.000002	%
Ca (Calcium)	≤ 0.00005	%
Cd (Cadmium)	≤ 0.000005	%
Co (Cobalt)	≤ 0.000002	%



## ANEXO 1

### Requerimiento académico para la elaboración del trabajo de graduación de caracterización de aceite vegetal residual y proceso de esterificación ácida, en la carrera de Ingeniería Química

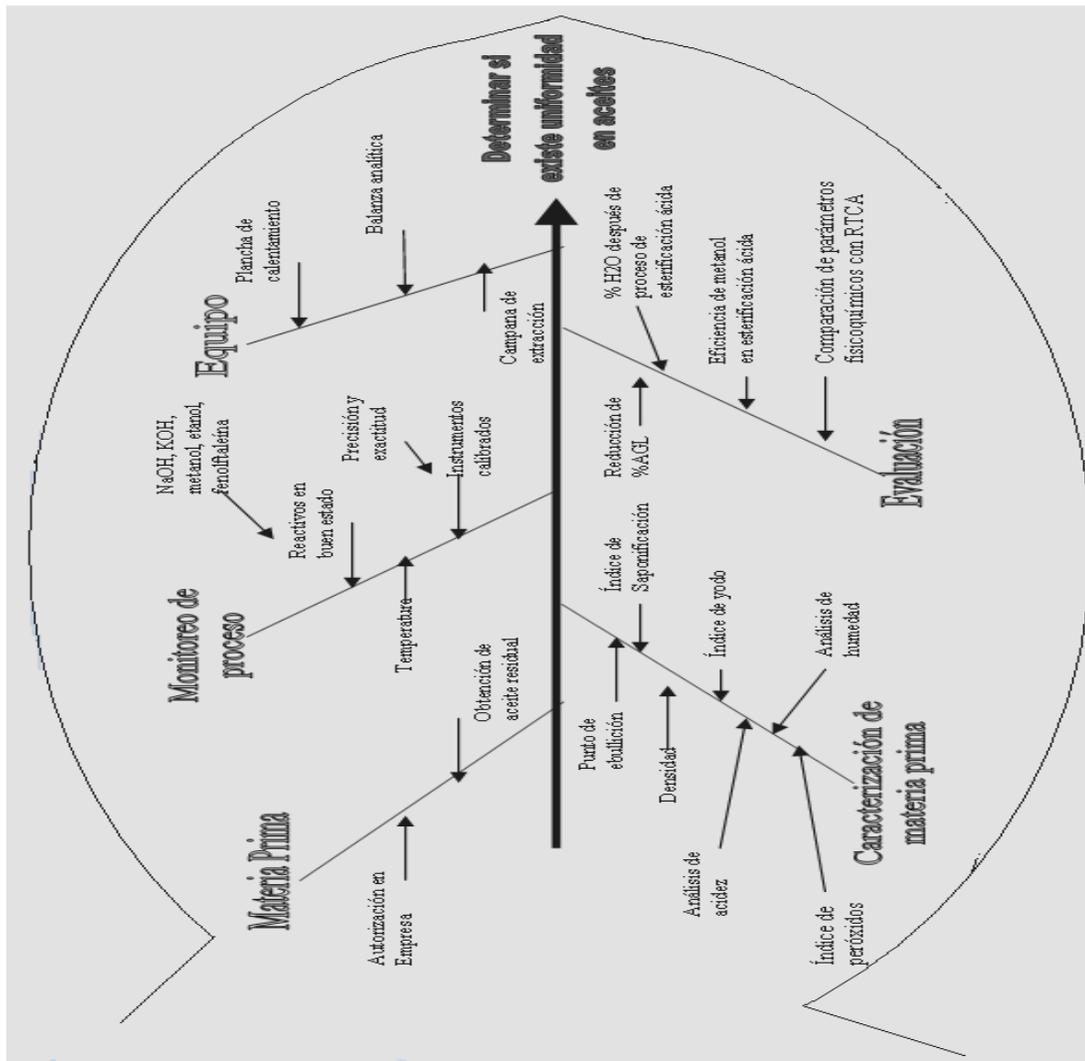


Fuente: Zorrila A., Santiago y Torres X., Miguel. Guía para elaborar la tesis, p. 50.



## ANEXO 2

Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en un proceso de caracterización fisicoquímica de aceite vegetal residual y proceso de esterificación ácida



Fuente: elaboración propia.