



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

**ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA  
TERNARIO ETANOL-BIODIESEL-AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**

**María Verónica Espinal Corrales**

Asesorado por el Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

Co-asesorado por la Inga. Qca. Natalia Cristina Espinal Corrales

Guatemala, noviembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA  
TERNARIO ETANOL-BIODIESEL-AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARIA VERONICA ESPINAL CORRALES**

ASESORADO POR EL ING. QCO. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA  
CO-ASESORADO POR LA INGA. QCA. NATALIA CRISTINA ESPINAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo 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 Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ETANOL-BIODIESEL-AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha agosto de 2009.

**María Verónica Espinal Corrales**



Guatemala, 10 de agosto 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 HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final del trabajo de graduación titulado “ESTUDIO PARA LA GENERACION DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ETANOL-BIODIESEL-AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg” , de la estudiante de Ingeniería Química María Verónica Espinal Corrales quien se identifica con el carne número 2005-12168.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. César Alfonso García Guerra  
Jefe de Sección  
Química Industrial  
CII/USAC  
Asesor



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

Guatemala, 26 de Octubre de 2011  
Ref.EIQ.TG.235.2011


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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-67-2010-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, María Verónica Espinal Corrales, identificada con carné No. 2005-12168, titulado: "ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ETANOL-BIODIESEL-AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg", el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico César Alfonso García Guerra

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

"DID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.  
COORDINADORA  
Tribunal que revisó el informe final  
Del trabajo de graduación



C.c.: archivo



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, **MARÍA VERÓNICA ESPINAL CORRALES** titulado: **"ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ETANOL-BIODIESEL-AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg"**. 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, noviembre de 2011

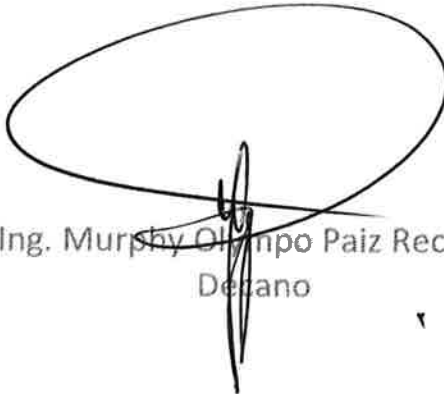
Cc: Archivo  
WGAM/ale



DTG. 462.2011.

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: **ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ETANOL-BIODIESEL-AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**, presentado por la estudiante universitaria **María Verónica Espinal Corrales**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 18 de noviembre de 2011.

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por traerme al mundo y ser la fuerza suprema que me ha sacado adelante en todo momento. Por quien el día de hoy logro alcanzar la meta de ser una profesional.

### **Mis padres**

Arnaldo Espinal Zepeda y Natalia Corrales Katín. Gracias a sus esfuerzos logramos juntos este éxito y me es posible recibir el día de hoy el título de Ingeniera Química.

### **Mi familia**

Abuelitos y abuelitas, tíos y tías, primos y primas, porque aún en la distancia he recibido su apoyo en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Dios**

Siempre he tenido claro que sin ti soy nada. Gracias mi lindo por permitirme alcanzar una meta más.

### **Mis padres**

Este logro es por y para ustedes. Son los mejores padres del mundo. Les amo infinitamente.

### **Mi hermanos**

Arnaldo Emilio, Natalia Cristina y Miriam Elena. Haber nacido después de ustedes y formar parte de este grupo de hermanos me enorgullece.

### **Familia De León Monroy**

Agradezco por todo el apoyo y cariño manifestado a lo largo de mi carrera.

### **Esposos Ayala Ramos**

Hno. Héctor y Hna. Oly por acogerme en el seno de su hogar como a una hija.

### **Mis amigos**

Jennifer García, Carmen Baldetti, Wendy Serrano, Eddy De León, Miguel Saquimux, Eder Vega, Henry Herrera, José Ortíz, Víctor Barrios, Eduardo Andrade, Edgar Chaj, Izahú Méndez y

tantos otros amigos que no alcanzo a mencionar, han sido de bendición en mi vida. Los quiero.

**Ing. César García**

Por su apoyo y dedicación en su papel como asesor de mi trabajo de graduación.

**Mis madrinas de graduación**

Mis lindas hermanas Miriam y Naty, son un ejemplo a seguir para mí. Las quiero y les admiro.

**Pueblo de Guatemala y  
Universidad de San Carlos de  
Guatemala**

Porque gracias a ellos pude adquirir las herramientas y conocimientos necesarios para lograr culminar con éxito la carrera de Ingeniería Química

***“Nada es imposible a menos que tú creas que sí lo es”***

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	I
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Métodos de separación .....	13
2.1.1. Extracción líquido líquido .....	13
2.1.2. Aplicaciones de la extracción líquido-líquido.....	14
2.1.3. Corrientes implicadas en la operación .....	14
2.1.4. Relaciones de equilibrio en la extracción .....	15
2.1.4.1. Regla de las fases .....	15
2.1.4.2. Equilibrio de fases .....	16
2.1.4.3. Coeficientes de distribución.....	16
2.1.5. Representación gráfica de sistemas ternarios.....	16
2.1.5.1. Coordenadas triangulares equiláteras.....	17
2.1.5.2. Sistemas ternarios de interés en la extracción en fase líquida.....	19
2.1.5.2.1. Tipo I. Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles .....	20
2.1.5.2.2. Tipo II. Formación de dos pares	

	de líquidos parcialmente miscibles.....	22
	2.1.5.2.3. Tipo III. Formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles .....	23
	2.1.5.2.4. Tipo IV. Formación de fases sólidas .....	24
2.1.6.	Curvas de distribución .....	24
2.1.7.	Propiedades deseables del disolvente.....	24
	2.1.7.1. Selectividad.....	24
	2.1.7.2. Recuperabilidad .....	26
	2.1.7.3. Coeficiente de distribución .....	26
	2.1.7.4. Capacidad.....	26
	2.1.7.5. Solubilidad del disolvente.....	26
	2.1.7.6. Densidad.....	27
	2.1.7.7. Tensión interfacial .....	27
	2.1.7.8. Toxicidad .....	27
2.2.	Biodiesel.....	28
2.2.1.	¿Qué es el biodiesel? .....	28
2.2.2.	Materias primas para la obtención de biodiesel.....	28
	2.2.2.1. Características químicas de aceites vegetales y biodiesel.....	29
	2.2.2.2. Alcoholes .....	32
	2.2.2.3. Las reacciones de transesterificación .....	33
2.2.3.	Proceso de obtención de biodiesel .....	35
	2.2.3.1. Los co-productos y subproductos de la producción de biodiesel.....	38
2.2.4.	Teoría de lavado del biodiesel.....	39
	2.2.4.1. Métodos de lavado .....	40
2.2.5.	Propiedades de caracterización de biodiesel.....	42
	2.2.5.1. Punto de inflamación.....	42

2.2.5.2.	Viscosidad .....	43
2.2.5.3.	Densidad .....	43
2.2.5.4.	Cenizas sulfatadas .....	43
2.2.5.5.	Azufre .....	44
2.2.5.6.	Número de cetano .....	44
2.2.5.7.	Índice de yodo .....	44
2.2.5.8.	Punto de nube .....	44
2.2.5.9.	Agua y sedimentos .....	45
2.2.5.10.	Residuo carbonoso .....	45
2.2.5.11.	Número ácido, TAN .....	45
2.2.5.12.	Contenido en metales (Na,K,P) y ácidos grasos.....	45
2.2.5.13.	Glicerina libre.....	46
2.2.5.14.	Glicerina total.....	46
2.2.5.15.	Contenido de alcohol.....	46
2.2.6.	La calidad del biodiesel .....	47
2.3.	Características físicas y químicas de los solventes puros a utilizar .....	49
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	51
3.1.	Variables .....	51
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	51
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	52
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	52
3.4.1.	Reactivos .....	52
3.4.2.	Equipo auxiliar e instrumentos de medición .....	52
3.4.3.	Cristalería .....	53
3.4.4.	Material de laboratorio.....	53
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	54

3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	56
3.6.1.	Método para la elaboración de la curva desolubilidad .....	57
3.6.2.	Procedimiento preparatorio para el lavado de biodiesel .....	58
3.6.3.	Procedimiento experimental para el sistema líquido-líquido etanol-biodiesel-agua .....	59
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	60
3.8.	Análisis estadístico .....	61
4.	RESULTADOS .....	63
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	83
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES .....	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97
	APÉNDICE .....	101
	ANEXOS .....	155

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Biodiesel producido por Guatebiodiesel.....	6
2.	Biodiesel producido en Biopersa.....	7
3.	Planta industrial de producción de biodiesel de la empresa biocombustibles de Guatemala, sociedad anónima.....	8
4.	Utilización de biodiesel de la Empresa Comunidad Nueva Alianza. ....	9
5.	Operación de extracción líquido-líquido.....	15
6.	Diagrama de equilibrio ternario.....	17
7.	Coordenadas para un diagrama triangular.....	18
8.	Diagrama de fases líquido-líquido en el que los componentes A y B son parcialmente miscibles.....	19
9.	Sistema de tres líquidos, A y B parcialmente miscibles.....	21
10.	Sistema de tres líquidos, A-B y B-C parcialmente miscibles.....	22
11.	Diagramas de sistemas ternarios con tres pares parcialmente miscibles.....	23
12.	Curvas de distribución.....	25
13.	Proceso Lurgi de producción continua.....	36
14.	El proceso Axens.....	38
15.	Flujograma de la metodología para la realización del trabajo de graduación.....	55
16.	Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria etanol-agua a temperatura ambiente .....	63



17.	Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria etanol-biodiesel a temperatura ambiente .....	64
18.	Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria etanol-agua a temperatura ambiente.....	65
19.	Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria etanol-biodiesel a temperatura ambiente.....	66
20.	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema etanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones etanol-agua, mediante la adición de biodiesel a temperatura ambiente en función de la correlación de índices de refracción contra concentración de etanol.....	67
21.	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema etanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones etanol-biodiesel, mediante la adición de agua a temperatura ambiente en función de la correlación de índices de refracción contra concentración de etanol.....	68
22.	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad tipo I, obtenidos para el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente en función de la correlación de índices de refracción contra concentración de etanol.....	69
23.	Domo de solubilidad tipo I de los datos experimentales para el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente en función de la correlación de índices de refracción contra concentración de etanol.....	70

24. Líneas de amarre para distintas relaciones de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente (Primer ciclo de lavado) .....72
25. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 10:1 de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente.....73
26. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 5:1 de mezcla biodiesel:agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente .....74
27. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 2.5:1 de mezcla biodiesel:agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente .....75

28.	Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 1.25:1 de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente .....	76
29.	Curva de ciclos de lavado en la relación 2.5:1 de mezcla biodiesel:agua en función de porcentaje de etanol en biodiesel, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente.....	78
30.	Curva de ciclos de lavado en la relación 1.25:1 de mezcla biodiesel:agua en función de porcentaje de etanol en biodiesel, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente .....	79
31.	Sensibilidad del parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias etanol-agua y etanol-biodiesel.....	84
32.	Parámetro de monitoreo de la densidad para las soluciones binarias etanol-agua y etanol-biodiesel.....	87

## TABLAS

I.	Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza.....	30
II.	Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales.....	31
III.	Especificaciones de biodiesel del RTCA.....	47
IV.	Propiedades físicas del agua desmineralizada.....	49
V.	Propiedades físicas del biodiesel.....	49
VI.	Propiedades físicas y químicas del glicerol.....	50
VII.	Composición del punto de pliegue en el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente.....	71
VIII.	Valores de los coeficientes de distribución (K) obtenidos a partir del cociente entre el porcentaje de etanol distribuido en la fase de biodiesel y el porcentaje de etanol distribuido en la fase acuosa a temperatura ambiente.....	71
IX.	Datos de las concentraciones de etanol en agua para determinar la cantidad de ciclos de lavado, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol con agitación constante a 400 revoluciones por minuto y durante un tiempo de 25 minutos a temperatura ambiente.....	77
X.	Número de ciclos de lavado estimados para el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, según la especificación de 0,20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, en función de las ecuaciones de regresión obtenidas.....	80

XI.	Resultado del análisis de varianza de un factor, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema etanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de etanol en agua a temperatura ambiente.....	80
XII.	Resultado del análisis de varianza de un factor, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema etanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de etanol en biodiesel a temperatura ambiente.....	81
XIII.	Comparación del grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción) para los sistemas ternarios de trabajos de graduación estudiados anteriormente.....	85

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
<b>K</b>	Coeficiente de distribución (adimensional)
<b>C</b>	Concentración (porcentaje en peso)
$X_i$	Dato de la i-ésima observación
$\rho$	Densidad de la solución (g/ml)
$x$	Fracción volumen de la solución (% en peso nominal)
<b>°C</b>	Grados Centígrados
<b>N</b>	Índice de refracción
$M_t$	Masa total de la mezcla ternaria
$\bar{X}$	Media aritmética
$N$	Número de observación
<b>P</b>	Peso (g)
<b>%</b>	Porcentaje
<b>V</b>	Volumen (ml)



## GLOSARIO

<b>AEA</b>	Alianza en Energía y Ambiente
<b>AMS</b>	Agente Material de Separación
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
<b>Azeótropo</b>	Mezcla líquida de dos o más componentes que posee un único punto de ebullición constante y fijo, y que al pasar al estado de vapor se comporta como un compuesto.
<b>Constante dieléctrica</b>	Es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.
<b>Curva de distribución</b>	Representa la solubilidad de una sustancia en otros dos componentes.
<b>EN</b>	<i>European Norm</i> (Norma Europea)
<b>EUR</b>	Euro



<b>Extracción</b>	Separación de una sustancia que puede disolverse en dos disolventes no miscibles entre sí, con distinto grado de solubilidad y que están en contacto a través de una interfase.
<b>FAEE</b>	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i> (Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos)
<b>FAME</b>	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i> (Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos)
<b>FFA</b>	Fat Free Acids (Ácidos Grasos Libres)
<b>Índice de refracción</b>	Razón entre las velocidades de la luz en el vacío y en el medio estudiado.
<b>Inmiscibilidad</b>	Incapacidad de algunos líquidos para mezclarse en cualquier proporción, formando un sistema de dos fases.
<b>Picnometría</b>	Del griego <i>pyknós</i> que significa densidad, es un método para determinar la densidad de una sustancia líquida por medio del uso de un picnómetro.
<b>Punto de pliegue</b>	Es un punto de la curva en la cual la composición del soluto tanto en la fase de alimentación como en la fase de extracto es la misma.

<b>Refinado</b>	En extracción líquido - líquido, es la alimentación ya tratada.
<b>Refractometría</b>	Es una técnica analítica que consiste en medir el índice de refracción de una muestra.
<b>RTCA</b>	Reglamento Técnico Centroamericano
<b>Sol</b>	Solución
<b>Solubilidad</b>	Es una medida de la capacidad de una determinada sustancia para disolverse en otra.
<b>Solución</b>	Mezcla homogénea en la que una o más sustancias (soluto) se encuentran disueltas en un solvente.
<b>Soluto</b>	La fase dispersa (disuelta) de una solución.
<b>Solvente</b>	Líquido capaz de disolver otros materiales, (sólidos, líquidos o gases), para formar una solución.
<b>Titulación</b>	Es un método corriente de análisis químico cuantitativo en el laboratorio, que se utiliza para determinar la concentración desconocida de un reactivo conocido.

**Transesterificación**

Es el proceso de sustitución nucleofílica del grupo alcoxi de un éster por otro alcohol (grupo saliente), a partir de la reacción entre un éster y un alcohol menor.

**USDA**

*United States Department of Agriculture*  
(Departamento de Agricultura de Estados Unidos)

## RESUMEN

La investigación consistió en la caracterización experimental del sistema ternario etanol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a nivel de laboratorio a temperatura ambiente ( $23\pm 1^\circ$  grados centígrados) y presión de 640 milímetros de mercurio, con el objetivo de determinar cuál es la relación óptima Biodiesel: agua y número de ciclos de lavado requeridos para la refinación del biodiesel con una concentración porcentual determinada de etanol, con un tiempo de contacto específico mediante técnica de lavado con agitación.

Los métodos empleados en la experimentación fueron refractometría y picnometría, aplicados en soluciones binarias.

En base a los resultados obtenidos se tiene que fue factible la realización de la investigación, pudiendo alcanzar los objetivos planteados. Se determinó que la hipótesis nula de la investigación es asertiva y estadísticamente existe variabilidad significativa para los datos sometidos a análisis de varianza.



# OBJETIVOS

## General

Generar datos experimentales a nivel de laboratorio para determinar la distribución de la solubilidad del etanol en el sistema inmiscible agua-biodiesel a temperatura ambiente, catalogando el tipo de sistema ternario.

## Específicos

1. Obtener correlaciones de datos experimentales de índice de refracción en función de la concentración en porcentaje en peso de soluciones acuosas de etanol a temperatura ambiente.
2. Obtener correlaciones de datos experimentales de índice de refracción en función de la concentración en porcentaje en peso de soluciones de etanol en biodiesel a temperatura ambiente.
3. Obtener correlaciones de datos experimentales de densidad en función de la concentración en porcentaje en peso de soluciones acuosas de etanol a temperatura ambiente.
4. Obtener correlaciones de datos experimentales de densidad en función de la concentración en porcentaje en peso de soluciones de etanol en Biodiesel a temperatura ambiente.

5. Obtener y correlacionar datos experimentales del equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario etanol-agua-biodiesel, a partir de soluciones de etanol/agua adicionando Biodiesel.
6. Obtener y correlacionar datos experimentales del equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario etanol-agua-biodiesel, a partir de soluciones de biodiesel-etanol adicionando agua.
7. Construir el equilibrio ternario líquido-líquido a partir de los datos experimentales generados para el sistema etanol-agua-biodiesel mediante el uso del programa TriDraw 4.5, para determinar el tipo de sistema ternario obtenido.
8. Determinar cuál es la relación óptima biodiesel-agua y número de ciclos de lavado requeridos para la refinación del biodiesel con una concentración porcentual determinada de etanol, con un tiempo de contacto específico mediante técnica de lavado con agitación.

## **HIPÓTESIS**

Es posible realizar una evaluación experimental a nivel de laboratorio para la generación de datos de equilibrio de inmiscibilidad en el estudio del sistema ternario etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente y 640 mmHg.

### **HIPÓTESIS ESTADÍSTICA**

Para variable respuesta distribución porcentual en equilibrio de inmiscibilidad:

Hipótesis nula

Ho: es posible realizar una evaluación experimental a nivel de laboratorio para la generación de datos de equilibrio de inmiscibilidad en el estudio del sistema ternario etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente y 640 mmHg.

Hipótesis alterna

Ha: no es posible realizar una evaluación experimental a nivel de laboratorio para la generación de datos de equilibrio de inmiscibilidad en el estudio del sistema ternario etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente y 640 mmHg.





## INTRODUCCIÓN

La importancia de la investigación radica en el refinamiento de biodiesel, producto que actualmente se elabora en Guatemala pero no recibe ningún tratamiento de refino que reduzca el porcentaje de los subproductos presentes en el biodiesel luego de ser manufacturado, los cuáles afectan el funcionamiento del motor de los vehículos al ser utilizado como combustible.

La investigación se basó en determinar la metodología necesaria para reducir uno de estos componentes indeseados: el etanol. Se procedió a la evaluación de un sistema de tres componentes: agua, alcohol y biodiesel a través de diagramas triangulares, cuyos datos de equilibrio se graficaron en base a datos obtenidos empleando una extracción líquido-líquido con los componentes de estudio, comprobando la hipótesis planteada.

La caracterización del equilibrio ternario se basó en la interpretación del contenido de soluto al equilibrio, para lo cual se emplearon técnicas de picnometría y refractometría. Otro punto de partida fue tomar como base la especificación establecida por la norma EN 14214 del 0,20 por ciento en peso máximo de alcohol en biodiesel.



## 1. ANTECEDENTES

El proyecto de investigación de tesis se realizó en el Laboratorio de Ensayos Fisicoquímicos de la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Laboratorio del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química y en el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -LIEEXVE-, perteneciente al Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería -CII-. El fundamento teórico de este estudio lo sustentan las investigaciones de tesis de graduación de Ingeniería Química sobre producción de biodiesel a nivel laboratorio anteriormente realizadas.

Los siguientes tres trabajos de graduación, junto con esta investigación forman parte de una línea de investigación sobre refinamiento de biodiesel.

Durante el 2009 se realizó la investigación de tesis de la Inga. María Gabriela Hernández Castellanos, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario Glicerol-Biodiesel-Agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 milímetros de mercurio”, para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida. De la cual se concluyó que el sistema es del tipo II, y que es factible utilizar una relación 10:1 de biodiesel/agua con dos ciclos de lavado para que cumpla la especificación de la norma ASTM 6751, con agitación constante durante 15 minutos y a una velocidad de 300 revoluciones por minuto.

Durante el 2010 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Nancy Karina Díaz Fulgan, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el

título “Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio, que permitan caracterizar el sistema ternario Metanol-Biodiesel-Agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 milímetros de mercurio”, de la cual se concluyó que el sistema es del tipo II, teniendo un refinamiento del biodiesel del 0,4543 por ciento de metanol al inicio a un 0,1818 por ciento al final, con tres ciclos de lavado en una relación de 10:1 de biodiesel y agua con 10 por ciento de metanol.

Durante el 2011 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Wendy Lissette Serrano Mejía, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario Isopropanol(IPA)-Biodiesel-Agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 milímetros de mercurio”, de la cual se concluyó que el sistema es del tipo I, teniendo un refinamiento del biodiesel máximo del 2,2550 por ciento de isopropanol para las relaciones 5:1 y 2.5:1 de biodiesel al tercer ciclo lavado, no cumpliendo así con el 0,20 por ciento de alcohol establecido por la norma europea EN 14214.

La fundamentación teórica sobre sistemas ternarios lo sustentan las investigaciones de tesis de graduación de Ingeniería Química que se presentan a continuación.

Durante el 2002 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Ligia Marilú Rivas Méndez para el sistema acetona-agua-hexano, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y cuyo título es “Evaluación de un método experimental de obtención de datos que permitan caracterizar el equilibrio ternario del sistema agua-hexano-acetona a dos temperaturas”, en esta investigación se determinó que el sistema agua-hexano-acetona pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo I (con formación de un par de líquidos

parcialmente miscibles) dentro del rango de temperaturas de  $28 \pm 7$  grados centígrados.

Durante el 2002 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Olinda Margarita López Velásquez para el sistema etanol-agua-hexano, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y cuyo título es “Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario etanol-hexano-agua a dos temperaturas diferentes”. en dicha investigación se llegó a determinar que el punto de pliegue experimental obtenido para el sistema etanol-hexano-agua a 23 grados centígrados es: 22 por ciento agua, 71 por ciento etanol, 7 por ciento hexano y a 43 grados centígrados es 23 por ciento agua, 68 por ciento etanol y 9 por ciento hexano.

Durante el 2003 realizó el Ing. Marco Vinicio Pajarito Ángel, la investigación de tesis asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y cuyo título es “Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario isopropanol-hexano-agua en equilibrio líquido de inmiscibilidad, a tres temperaturas y a 640 milímetros de mercurio”, en la investigación se determinó que existe una diferencia significativa entre las isotermas de temperatura de 10 y 50 grados centígrados para el sistema de isopropanol-hexano-agua, a partir de las curvas binoidales al equilibrio de inmiscibilidad y de los puntos de pliegue obtenidos.

Durante el 2003 realizó el Ing. Ramiro Antonio Prado Córdova, la investigación de tesis asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y la Inga. Telma Maricela Cano y cuyo título es “Evaluación del efecto de la concentración de cloruro de sodio en el sistema cuaternario agua-glicerol-1-butanol-cloruro de sodio sobre la distribución de equilibrio del glicerol para determinar la factibilidad de un proceso alternativo de recuperación de glicerina

en una planta de saponificación”. En la investigación se determinó que el efecto del factor glicerol sobre el coeficiente de distribución del glicerol en el sistema cuaternario agua-glicerol-1-butanol-cloruro de sodio, es tal que alcanza un mínimo cuando el porcentaje de glicerol es de 5 por ciento luego del cual se incrementa al aumentar la cantidad de glicerol en el sistema.

Durante el 2004 la investigación del Ing. José Luis Alfaro Soto, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y cuyo título es “Evaluación de un método experimental de generación de datos par el estudio del sistema ternario aceite esencial de eucaliptol (1-8 cineol)-agua-hexano en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640 milímetros de mercurio”.

Durante el 2005 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Marisol Amado Rodas para el sistema Limoneno-etanol-hexano, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de terpenos del fruto de naranja (Limoneno)-etanol-hexano en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640 milímetros de mercurio”, de la cual se determinó que el sistema es del tipo II, con un punto de pliegue a 10 grados centígrados a 62 por ciento de A. E. limoneno, 33 por ciento de etanol y 5 por ciento de hexano y un punto de pliegue a 25 grados centígrados a 54 por ciento de A. E. Limoneno, 40 por ciento etanol y 6 por ciento hexano.

Durante el 2006 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Krista Ivonne Aguilar Ovando, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de cardamomo (*elletaria cardamomum*) - (alcohol isopropílico-agua)<sub>50%</sub> - benceno en

equilibrio a dos temperaturas diferentes y 640 mm Hg”, de la cual se concluyó que el sistema es del tipo II, con un error máximo aproximado del 2 por ciento. Con guía de este trabajo se realizará una comparación de los datos experimentales que los dos estudios pretenden obtener como lo son las relaciones entre hidrocarburos “oxigenados” respecto a hidrocarburos (monoterpenos) “no oxigenados” entre pares de solventes inmiscibles; uno de ellos mixto ((isopropílico-agua)<sub>75%</sub>)

Por otra parte, se tiene que la producción de biodiesel en Guatemala es llevada a cabo por las siguientes empresas que trabajan a pequeña escala, en las cuales no se les da tratamiento de refino al biodiesel. Se puede apreciar en la descripción de cada una la capacidad de producción, materias primas utilizadas y usos. He aquí la importancia de que se le de tratamiento a este producto después de su elaboración.

Guatebiodiesel (Combustibles Ecológicos S.A.), ubicada en ciudad de Guatemala con capacidad para producir de 1500 a 2000 galones/día de biodiesel (5,680 a 7,570 litros/día); emplea aceites usados (soya, maíz, girasol) cuando están disponibles y busca obtener semillas de tempate (*Jatropha curcas*) para poder crecer su producción que hoy es de alrededor de 2000 galones por mes. El biodiesel producido está siendo usado para pruebas en vehículos propios y eventualmente se hace alguna comercialización en negociación directa con el cliente.



Figura 1. **Biodiesel producido por Guatebiodiesel**



Fuente: Serrano, Wendy. Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario isopropanol(IPA)-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 mm Hg. p. 15.

Octagon (Biocombustibles de Guatemala), ubicada en ciudad de Guatemala con capacidad para 1000 galones/día (3780 litros/día); recibió un financiamiento de EUR 90.000 de la Alianza en Energía y Ambiente (AEA) de Finlandia para desarrollar la producción de biodiesel a partir de tempate. El proceso de producción de biodiesel se hace en una etapa de reacción, existe recuperación del metanol en exceso usado en el proceso, la fase de glicerina no recibe ningún tratamiento y se estudian alternativas para usarla en quemadores industriales.

El biodiesel ya producido fue empleado en vehículos propios (B100), en una flota de camiones (mezcla B10), y probado en calderas que trabajan en ambientes cerrados, hornos de panaderías y generadores eléctricos estacionarios. La materia prima principal hasta ahora es el aceite usado pues no existe producción suficiente de Jatropha. Según el representante de la

empresa, alrededor del 80 por ciento del biodiesel producido fue originado de aceites usados y alrededor del 20 por ciento de piñón.

Biopersa es una empresa dedicada al desarrollo, implementación e innovación de procesos de producción de energía renovable. Se enfoca en la reducción y eliminación de emisiones contaminantes a la atmosfera, integrando líneas de acción en búsqueda de un desarrollo sostenible. Para esto la empresa está realizando el proyecto “Reciclaje de aceite quemado y su uso como Biodiésel (B-20, B-50, B-100) en los vehículos de la Municipalidad de La Antigua Guatemala y el Hospital de Obras Sociales del Hermano Pedro, La Antigua Guatemala, Sacatepéquez, Guatemala”, el cual se basa en la elaboración de biodiesel a partir de aceite quemado utilizado en las frituras que realizan en los restaurantes y hoteles de dicha ciudad.

Figura 2. **Biodiesel producido en biopersa**



Fuente: Serrano, Wendy. Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario isopropanol(IPA)-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 mm Hg. p. 15.

Biocombustibles de Guatemala, S.A., se basa en la elaboración de biodiesel en el ámbito agrícola, industrial y renovable, produce biodiesel a partir de aceites vegetales entre los cuales se encuentran las semillas oleaginosas, siendo una de las principales la *Jatropha curcas* L., comúnmente conocida

como Piñón. En base a la producción agrícola de dichas semillas se obtiene la producción industrial que actualmente tienen la piensan ampliar conforme el área agrícola aumente.

**Figura 3. Planta industrial de producción de biodiesel de la empresa biocombustibles de Guatemala, sociedad anónima**



Fuente: Serrano, Wendy. Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario isopropanol(IPA)-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 mm Hg. p. 16.

La empresa Fuerza Verde, ubicada en ciudad de Guatemala tiene capacidad para producir 50 galones/día (190 litros/día) de biodiesel; ya produjo biodiesel a partir de grasas animales, de aceites de cocina usados y de palma, siempre de forma experimental. No tiene clientes fijos y emplea el biodiesel producido para pruebas en un vehículo propio, en mezclas B20, B50 y puro (B100).

La Comunidad Nueva Alianza, ubicada en El Palmar, Quetzaltenango con capacidad para 50 galones/día (190 litros/día) de biodiesel. Es una cooperativa de productores de macadamia que produce biodiesel para uso propio en motores estacionarios. Como materias primas emplea las semillas de macadamia rechazadas para comercialización y aceite usado, pero está empezando a desarrollar siembras de higüerillo y tempate.

Figura 4. **Utilización de biodiesel de la Empresa Comunidad Nueva Alianza**



Fuente: Serrano, Wendy. Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario isopropanol(IPA)-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 mm Hg. p. 17.

La Empresa Helios ubicada en Zacapa (oriente) y con capacidad para producir 290 galones/día (1090 litros/día) de aceite de palma tratado para uso en motores (no hace la transesterificación). Produce alrededor de 2000 a 3000 galones por mes (de 7570 a 11350 litros por mes) de aceite de palma tratado para uso directo en motores (no es biodiesel) con fines de pruebas. La empresa no ve cómo producir biodiesel pues no existen aún materias primas con precios adecuados.

Como estrategia, la empresa está en contacto con los productores de palma, y está desarrollando conversiones de vehículos para el empleo de aceite de palma tratado para eliminar metales y silicio que causan daños al motor. El representante de la empresa informó que ya fueron convertidos algunos motores estacionarios y que una flota de 50 minibuses ya está usando el aceite en motores convertidos desde el mes de septiembre. Él defiende que los pequeños productores deben verticalizarse para poder aumentar sus ingresos a partir de la comercialización del aceite de palma sin transesterificación para motores modificados.

La empresa Mazat Agui, también realiza biodiesel a partir del Piñón, ya que esta semilla se da en varios lugares del País, y el impacto ambiental de la extracción del aceite de la semilla es positivo, así mismo aumenta el trabajo agrícola en áreas marginales, este biodiesel producido, se utiliza para pruebas en automóviles y también en maquinaria agrícola.

Desde el punto de vista del proceso de producción, las cuatro empresas que producen biodiesel realizan la neutralización de la materia prima (cuando se emplean aceites usados o grasa animal). La reacción de transesterificación la hacen en una sola etapa la Fuerza Verde, la Comunidad Nueva Alianza y Octagon, mientras que la Guatebiodiesel hace la reacción en dos etapas. Para purificación del producto emplean lavado con agua y posteriormente secan el biodiesel. A excepción de la Octagon, las demás empresas aún no hacen la recuperación del metanol por motivos de escala de producción actual.

El subproducto de la reacción, la fase de glicerina que contiene aún impurezas, agua y metanol, no es tratada y no tiene mercado en Guatemala. Los productores afirman que están almacenando esta fase pero una solución definitiva para este problema debe aún ser desarrollada.

Así pues, debido a la demanda y oferta (aunque en bajo porcentaje) de biodiesel que se tiene en el país, se hace necesario el estudio cada vez más profundo de este biocombustible.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Métodos de separación**

En la naturaleza, raramente se encuentran las sustancias en estado puro. Se presentan mayormente en forma de mezclas, disoluciones y suspensiones. Es posible separar las anteriores de diferentes formas hasta llegar a sus componentes más simples. Estos métodos se clasifican según sus características, siendo éstos los métodos de separación química, los cuáles implican alteración en la estructura molecular de las sustancias originales, se caracterizan por la necesidad de efectuar una reacción química previa a la separación. Por otra parte se encuentran los métodos físicos en los cuales no se destruyen las sustancias.

La selección del método de separación a emplear se basa en propiedades químicas y físicas de cada sustancia.

#### **2.1.1. Extracción líquido-líquido**

La extracción líquido-líquido consiste en la separación de los componentes de una solución líquida por contacto con otro líquido inmiscible. Los componentes de la solución original se distribuyen de manera distinta entre las dos fases de líquidos, logrando cierto grado de separación de los componentes que puede aumentarse utilizando contactos múltiples.



### **2.1.2. Aplicaciones de la extracción líquido-líquido**

La implantación de la operación de extracción líquido-líquido a gran escala en procesos industriales ha sido más tardía que el resto de operaciones, tales como destilación y absorción. Sin embargo la importancia del proceso de extracción líquido-líquido ha ido en aumento debido a la creciente demanda de productos sensibles a la temperatura, mayores requerimientos de pureza, equipos más eficientes y la disponibilidad de disolventes más selectivos.

Por otro lado, se suele preferir la aplicación del proceso de extracción a la destilación en los siguientes casos: (a) si existen sustancias inorgánicas complejas disueltas en soluciones orgánicas o acuosas ; (b) si es preciso retener un componente que se encuentra en una concentración muy pequeña; (c) en la recuperación de sustancias sensibles a la temperatura; (d) si la separación se basa más en la naturaleza de las sustancias que en su distinta volatilidad; (e ) si la mezcla posee puntos de ebullición o de fusión muy próximos; (f) si la mezcla presenta azeótropos.

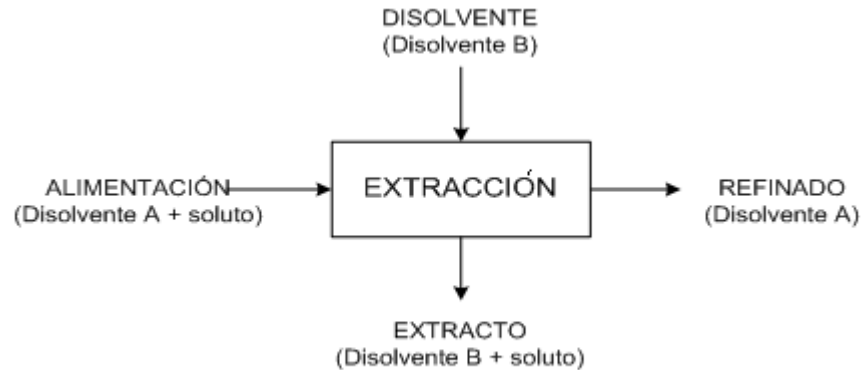
La extracción líquido-líquido presenta una amplia aplicación en la industria de petróleo para separar alimentaciones líquidas en función de su naturaleza química más que por su peso molecular o la diferencia de volatilidad. Como ejemplo se tiene la separación de hidrocarburos aromáticos, alifáticos y naftélicos.

### **2.1.3. Corrientes implicadas en la operación**

En la figura 5 se muestra un esquema de las corrientes de entrada y salida en la operación. Se denomina alimentación a la disolución cuyos componentes se pretende separar, disolvente de extracción al líquido que se va

a utilizar para separar el componente deseado, refinado a la alimentación ya tratada y extracto a la disolución con el soluto recuperado.

Figura 5. **Operación de extracción líquido-líquido**



Fuente: Universidad Autónoma de Madrid. Extracción líquido-líquido. [20 de marzo de 2010]  
<[http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/mgillar/experimentacionIQII/ExtracLiqLiq2006.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgillar/experimentacionIQII/ExtracLiqLiq2006.pdf)>

## 2.1.4. Relaciones de equilibrio en la extracción

### 2.1.4.1. Regla de las fases

El equilibrio entre dos fases en cualquier caso, está restringido por la regla de las fases:

$$F = C - P + 2$$

Donde P es el número de fases en equilibrio, C es el número de componentes totales en las dos fases (cuando no se verifican reacciones químicas), y F es el número de variantes o grados de libertad del sistema. <sup>1</sup>

(1) Geankoplis, Christie J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. p. 186.

#### **2.1.4.2. Equilibrio de fases**

La separación de los componentes por medio de la extracción líquido-líquido depende básicamente de la distribución del equilibrio termodinámico de los componentes en las dos fases líquidas.

#### **2.1.4.3. Coeficientes de distribución**

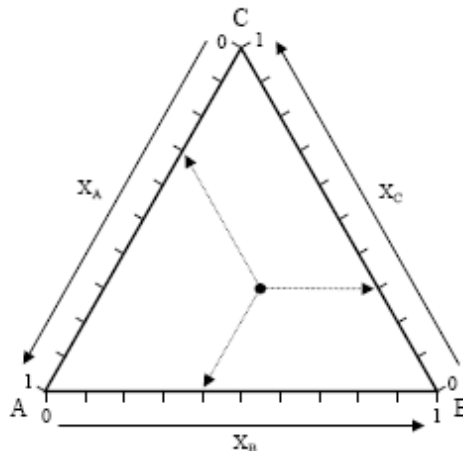
En el equilibrio se conoce como coeficiente de distribución o reparto  $K$  al cociente de la fracción en peso del soluto en la fase del extracto  $y$ , dividida por la fracción en peso del soluto en la fase de refinado  $x$ :

$$K = \frac{y}{x}$$

#### **2.1.5. Representación gráfica de sistemas ternarios**

Una de las formas más habituales de recoger los datos de equilibrio en sistemas ternarios son los diagramas triangulares. En la figura 6 se muestra un diagrama triangular equilátero. Los vértices del triángulo representan compuestos puros, un punto sobre un lado correspondería a una mezcla binaria y un punto en el interior del triángulo representaría una mezcla ternaria. La composición de una mezcla puede determinarse por lectura directa en el diagrama, tal como se muestra en la figura. La concentración de los componentes en el diagrama se muestra como fracción molar o fracción másica.

Figura 6. Diagrama de equilibrio ternario



Fuente: Universidad Autónoma de Madrid. Extracción líquido-líquido.[20 de marzo de 2010]  
<[http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/ExtraccLiqLiq2006.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/ExtraccLiqLiq2006.pdf)>

Los diagramas líquidos ternarios son de valor considerable en los problemas referentes a procesos de separación por extracción líquida. Al estudiar dichos diagramas es posible deducir si la separación buscada puede realizarse y definir las mejores condiciones de operación para lograr resultados óptimos. <sup>2</sup>

### 2.1.5.1. Coordenadas triangulares equiláteras

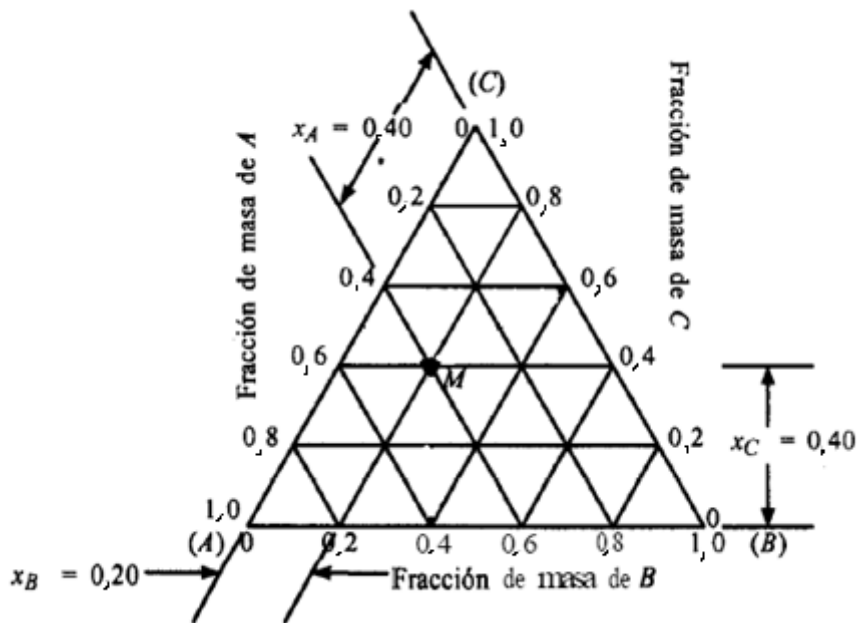
Las coordenadas triangulares equiláteras se usan con mucha frecuencia para representar los datos de equilibrio de un sistema de tres componentes, puesto que se tienen tres ejes. Esto se muestra en la figura 7.

(2) Perry, Robert. Manual del Ingeniero Químico, Tomo III. p. 15-26

Cada uno de los tres vértices representa un componente puro, A, B o C. El punto M representa una mezcla de A, B y C, la distancia perpendicular desde el punto M hasta la base AB representa a la fracción de masa  $x_C$  de C en la mezcla en el punto M; la distancia a la base CB es la fracción de masa  $x_A$  de A, y la distancia a la base AC es la fracción de masa  $x_B$  de B. De esta forma,

$$X_A + X_B + X_C = 1$$

Figura 7. **Coordenadas para un diagrama triangular**

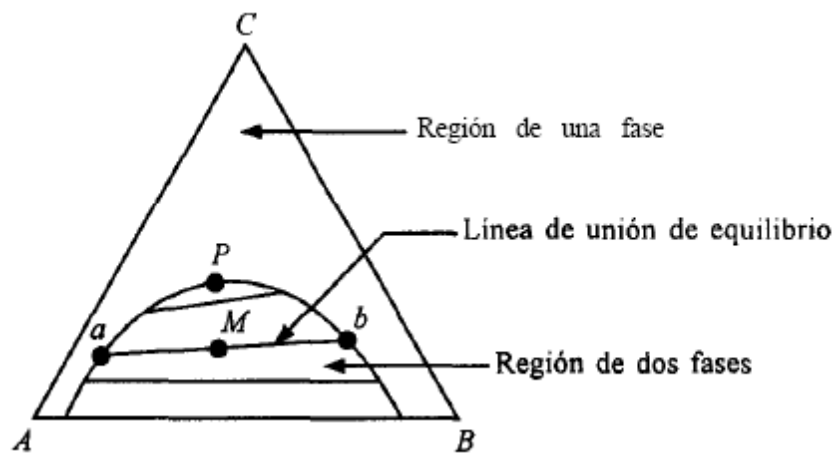


Fuente: C. J. Geankoplis. Proceso de transporte y operaciones unitarias. p. 785

En la figura 7 se muestra un diagrama de fases común de un par de componentes A y B parcialmente miscibles. Con respecto a la figura 8, el líquido C se disuelve por completo en A o B. El líquido A es muy poco soluble en B y

B es un poco soluble en A. La región de dos fases corresponde a la zona delineada por la curva envolvente. Una mezcla original de composición M se separa en dos fases a y b que están en la línea de unión de equilibrio que pasa a través del punto M. (Se muestran también otras de líneas de unión.) Ambas fases son idénticas en el punto P, que se llama *punto de Plait*.

Figura 8. **Diagrama de fases líquido – líquido en el que los componentes A y B son parcialmente miscibles**



Fuente: C. J. Geankoplis. Proceso de transporte y operaciones unitarias. p. 786

### 2.1.5.2. **Sistemas ternarios de interés en la extracción en fase líquida**

Si los tres componentes se mezclan en todas proporciones con formación de soluciones homogéneas, el sistema carece de importancia para la extracción en fase líquida. Los sistemas en que ocurre inmiscibilidad, se clasifican de la siguiente manera:

Tipo I.	Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles.	
Tipo II.	Formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles.	
Tipo III.	Formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles.	
Tipo IV.	Formación de fases sólidas.	

#### **2.1.5.2.1. Tipo I. Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles**

Para un sistema ternario con un par parcialmente soluble, puede decirse que el tipo de sistema que se encuentra más comúnmente en la extracción. En este tipo de sistemas, es costumbre trabajar con coordenadas triangulares utilizadas como isotermas. De la figura 9, se observa, que el líquido C se disuelve completamente en A y B, pero A y B sólo se disuelven entre sí, hasta cierto grado, para dar lugar a las soluciones líquidas saturadas en L (rica en A) y en K (rica en B).

Una mezcla binaria en J, se separará en dos fases líquidas insolubles de composiciones en L y K, ya que las cantidades relativas de las fases dependen de la posición J. La curva LRPEK, es la curva binodal de solubilidad, que indica el cambio en la solubilidad de las fases ricas en A y B al agregar C. Una mezcla fuera de esta curva será una solución homogénea de una fase líquida.

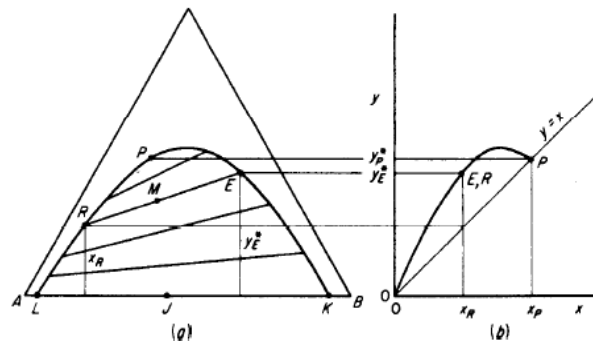
Una mezcla ternaria por debajo de la curva, como M, forma dos fases líquidas insolubles saturadas de composiciones en el equilibrio, indicadas por R (rico en A) y E (rico en B). La línea RE que une estas composiciones en el

equilibrio es una línea de unión, que necesariamente debe pasar a través del punto M que representa la mezcla como un todo. Hay un número finito de líneas de unión en la región de dos fases, pero sólo se muestran unas cuantas. Rara vez son paralelas; por lo general, su pendiente cambia lentamente en una dirección, como se muestra.

La dirección de la pendiente de la línea de unión cambia en relativamente pocos sistemas; una línea de unión será horizontal. Se dice que estos sistemas son “solutrópicos”. El punto P, punto de pliegue, la última de las líneas de unión y el punto en donde se encuentran las curvas de solubilidad del soluto rico en A y rico en B, generalmente no se encuentra en el valor máximo de C sobre la curva de solubilidad.

El porcentaje de C en la solución E es claramente mayor que en R; se dice que en este caso la distribución de C favorece la fase rica en B. Esto se muestra convenientemente en el diagrama de distribución.<sup>3</sup>

Figura 9. Sistema de tres líquidos, A y B parcialmente miscibles



Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa. p. 530

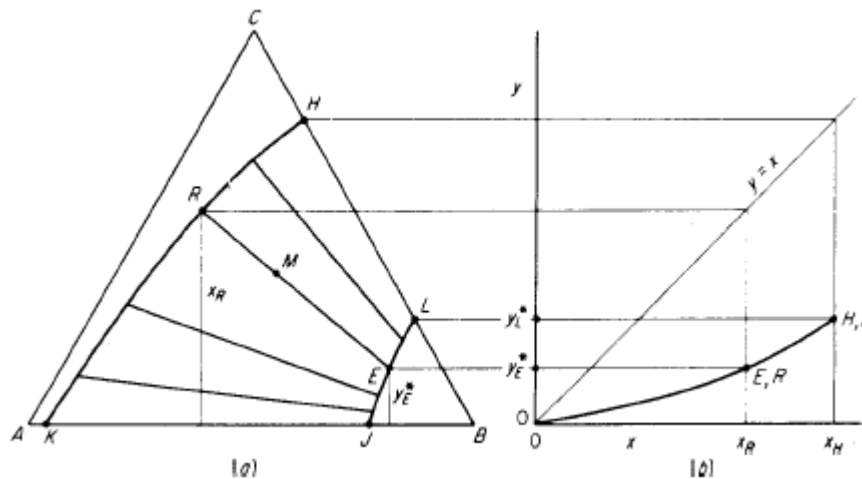
(3) Treybal, Robert E. Operaciones de Transferencia de Masa. p. 529-542.



### 2.1.5.2.2. Tipo II. Formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles

Un ejemplo de este tipo es el sistema clorobenceno(A)-agua(B)-metil-etil-cetona(C), en donde A y C son completamente solubles, mientras que los pares A-B y B-C presentan únicamente una solubilidad limitada. Obsérvese la figura 10(a), una isoterma típica. A la temperatura predominante, los puntos K y J representan las solubilidades mutuas de A y B, y los puntos H y L, las de B y C. Las curvas KRH (rica en A) y JEL (rica en B) son las curvas de solubilidad ternarias; las mezclas fuera de la banda entre estas curvas forman soluciones líquidas homogéneas de una sola fase. Las mezclas como M, dentro del área heterogénea, forman dos fases líquidas en el equilibrio, en E y R, unidas mediante líneas de unión.

Figura 10. Sistema de tres líquidos, A-B y B-C parcialmente miscibles



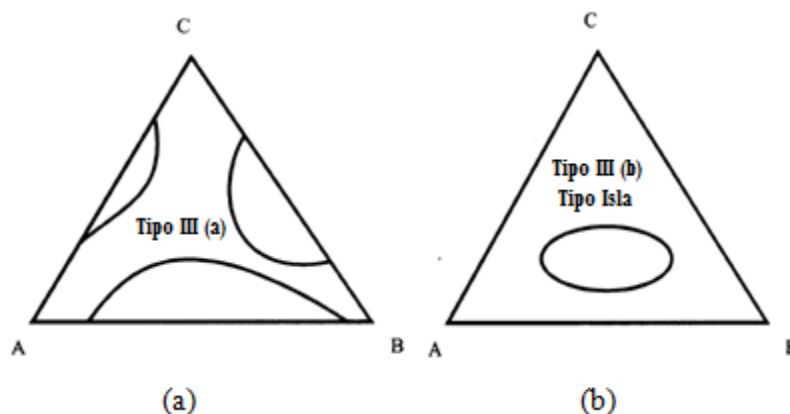
Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa. p. 535.

### 2.1.5.2.3. Tipo III. Formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles

Estos sistemas son inusuales y pueden llegar a ser muy complejos en las relaciones variables que surgen al cambiar la temperatura.

Cuando los tres líquidos son parcialmente solubles entre sí, se producen tres curvas binodales (figura 11a), a temperaturas lo suficientemente elevadas, como para que no existan intersecciones entre dichas curvas. Aquí, de nuevo, las áreas dentro de las curvas indican regiones líquidas bifásicas, mientras que en las áreas externas sólo existe una fase presente. Sin embargo, a temperaturas más bajas puede suceder que, como en la figura 11b, las curvas se intercepten, haciendo que el diagrama adopte la forma mostrada.<sup>4</sup>

Figura 11. Diagramas de sistemas ternarios con tres pares parcialmente miscibles



Fuente: John H. Perry. Manual del ingeniero químico. Tomo III. p. 16

(4) Treybal, Robert E. Liquid Extraction. p. 1-28.

#### **2.1.5.2.4. Tipo IV. Formación de fases sólidas**

Estos sistemas pueden ser muy complejos en cuanto al número de equilibrios existentes.

#### **2.1.6. Curvas de distribución**

La curva de distribución más simple consiste en un punto de la concentración de C en la fase rica en A ( $X_{CA}$ ) contra la concentración al equilibrio de C en la fase rica en B ( $X_{CB}$ ) en coordenadas aritméticas. La figura 12 muestra varias curvas de distribución típicas con relación a su correspondiente tipo de diagrama de fases.

#### **2.1.7 Propiedades deseables del disolvente**

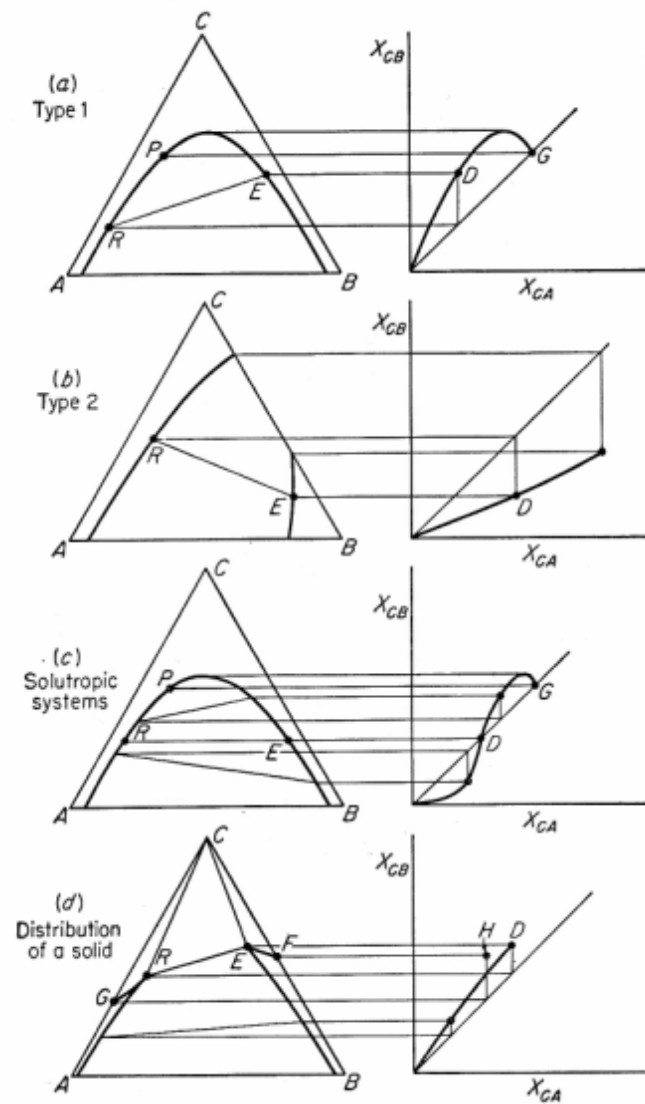
Las propiedades de un disolvente potencial se deben considerar antes de su utilización en un proceso de extracción líquido-líquido.

##### **2.1.7.1 Selectividad**

La separación relativa o selectiva  $\alpha$  de un disolvente es el cociente de la razón de los dos componentes en la fase del disolvente de extracción, dividida por la razón de los mismos componentes en la fase del disolvente de alimentación. El poder de la separación de un sistema líquido-líquido está regulado por la desviación de  $\alpha$  con respecto a la unidad, de forma similar a la volatilidad relativa en destilación. Una separación relativa con  $\alpha = 1,0$  no proporciona separación de los componentes entre las dos fases líquidas. Por lo

general, las concentraciones diluidas de soluto proporcionan los factores más elevados de separación relativa.

Figura 12. **Curvas de distribución**



Fuente: Robert Treybal. Liquid Extraction. p. 12

### **2.1.7.2 Recuperabilidad**

Por lo general, el disolvente de extracción debe recuperarse de la corriente de extracto y de la de refinado, en un proceso de extracción. Ya que a menudo se utiliza la destilación, la volatilidad relativa del disolvente de extracción respecto a los componentes no disolventes debe ser significativamente mayor o menor a la unidad. Para un disolvente volátil es deseable un bajo calor latente de evaporación.

### **2.1.7.3 Coeficiente de distribución**

El coeficiente de distribución de un soluto debe ser grande, para que se pueda utilizar una baja cantidad de disolvente de extracción respecto a la alimentación.

### **2.1.7.4 Capacidad**

Esta propiedad se refiere a la carga del soluto por peso del disolvente de extracción que se puede lograr en una capa de extracto, en el punto triple de un sistema Tipo I o en el límite de solubilidad de un sistema Tipo II.

### **2.1.7.5 Solubilidad del disolvente**

Una baja solubilidad del solvente de extracción en el refinado suele dar como resultado una alta volatilidad relativa en la separación del refinado o una baja pérdida de disolvente si el refinado no se desolventiza. Una baja solubilidad del disolvente de alimentación en el extracto conduce a una gran separación relativa y, generalmente, a unos bajos costos en la recuperación del soluto.

### **2.1.7.6 Densidad**

La diferencia de densidad entre las dos fases líquidas en el equilibrio afecta no sólo a los caudales de los fluidos que circulando en contracorriente pueden alcanzarse en el equipo de extracción, sino también a las velocidades de coalescencia. La diferencia de las densidades disminuye a cero en el punto triple, pero en algunos sistemas puede llegar a ser igual a cero en una concentración intermedia del soluto (línea de reparto isopícnica o de doble densidad) y puede invertir las fases a concentraciones más elevadas. Los extractores de tipo diferencial no pueden cruzar dicha concentración del soluto, pero los mezcladores-sedimentadores sí pueden hacerlo.

### **2.1.7.7 Tensión interfacial**

Una tensión superficial elevada en la interfase promueve una coalescencia rápida y, por lo general, requiere una agitación mecánica elevada para producir gotas muy pequeñas. Una tensión superficial pequeña en la interfase permite la rotura de la gota con agitación de poca intensidad, pero también conduce a bajas velocidades de coalescencia. La tensión superficial de la interfase disminuye por lo general a medida que se incrementan la solubilidad y la concentración del soluto; asimismo, se reduce a cero en el punto triple.

### **2.1.8.8. Toxicidad**

Debido a la exposición potencial durante las reparaciones del equipo o mientras se desconecta el aparato después de la transferencia del disolvente, se prefiere una baja toxicidad en la inhalación de los vapores del disolvente o en el contacto con la piel. También es deseable una toxicidad baja a la vida acuática y a los bioorganismos cuando la extracción se emplea para el pre-

tratamiento del agua residual, antes de entrara a la planta de tratamiento biológico, y que descarga el efluente a un río o lago. A menudo, la toxicidad del disolvente es baja si su solubilidad en agua es elevada.

## **2.2. Biodiesel**

### **2.2.1. ¿Qué es el biodiesel?**

El biodiesel es un biocombustible líquido, que se obtiene químicamente a partir de aceites vegetales o grasas animales y un alcohol y se puede utilizar en motores diesel, solo o mezclado con gasóleo.

La ASTM (*American Society for Testing Materials*) define al biodiesel como éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables para ser utilizados en motores diesel.<sup>5</sup>

### **2.2.2. Materias primas para la obtención de biodiesel**

Las materias primas para la obtención de biodiesel son aceites vegetales o grasas animales y alcoholes de cadena corta. Los aceites más ampliamente utilizados son aceite de colza (fundamentalmente en países de la Unión Europea), soja y girasol, aunque también se emplean, entre otros, los aceites de maní, palma, lino, nabo, aceites comestibles usados o grasas animales.

(5) Romano, Silvia Daniela. Combustibles Alternativos. p. 11-88.

### **2.2.2.1. Características químicas de aceites vegetales y biodiesel**

Los aceites vegetales y grasas son lípidos. Los lípidos son constituidos básicamente por mezclas de diferentes triglicéridos (tri-ésteres de ácidos grasos) pero contienen otros compuestos como los fosfatídeos, diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres en pequeñas cantidades. Los ácidos grasos que componen un triglicérido pueden ser diversos. Mono, di o triglicéridos son ésteres de uno, dos o tres ácidos grasos, iguales o no, unidos por un puente de glicerina. El biodiesel es una mezcla de alquil-ésteres de ácidos grasos.

Los diversos aceites o grasas se caracterizan por diferentes proporciones de los ácidos grasos descritos arriba. Como ejemplo, la tabla II muestra la composición de algunos que otros aceites vegetales y grasas animales, en términos de sus principales ácidos grasos.

Otros aceites poseen otras composiciones, pero es de notarse que los aceites más empleados para producir el biodiesel están fuertemente concentrados en ácidos con 16 ó 18 átomos de carbón en sus cadenas, sean ellas saturadas o insaturadas (ácidos palmítico, esteárico, oléico, linoléico o ricinoléico). Llama la atención el caso del aceite de higüerillo, que posee fuerte concentración de ácido ricinoléico. Este ácido es muy particular, pues posee un grupo hidroxilo en su cadena, que le confiere propiedades muy distintas de todos los demás, especialmente por su alto poder lubricante y alta viscosidad.



Tabla I. Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza

Nombre usual	Nombre IUPAC	Símbolo	Fórmula Mínima
Butírico	Butanóico	C4:0	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>
Capróico	Hexanóico	C6:0	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>
Caprílico	Octanóico	C8:0	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>
Caprílico	Decanóico	C10:0	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>
Otusílico	Cis-4-decenóico	C10:1(n4)	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>
Caproleico	Cis-9-decenóico	C10:1(n9)	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>
Láurico	Dodecanóico	C12:0	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>
Lauroleico	Cis-5-dodecenóico	C12:1(n5)	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>
Lindérico	Cis-4-dodecenóico	C12:1(n4)	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>
Mirístico	Tetradecanóico	C14:0	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>
Miristoleico	Cis-9-tetradecenóico	C14:1(n9)	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>
Tsuzuico	Cis-4-tetradecenóico	C14:1(n4)	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>
Palmítico	Hexadecanóico	C16:0	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
Palmitoleico	Cis-9-tetradecenóico	C16:1(n9)	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>
Estearico	Octadecanóico	C18:0	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>
Petroselinico	Cis-6-octadecenóico	C18:1(n6)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>
Oléico	Cis-9-octadecenóico	C18:1(n9)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>
Eládico	Trans-9-octadecenóico	C18:1(tn9)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>
Vaccénico	Cis-11-octadecenóico	C18:1(n11)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>
Linoleico	Cis-9-cis-12-octadecadienóico	C18:2(n9,n12)	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
Linolénico	Cis-9-cis-12-cis-15-octadecatrienóico	C18:3(n9,n12,n15)	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>
Ricinoleico	12-hidroxi-cis-9-octadecenóico	C18:1(n9):OH(n12)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>3</sub>
Araquídico	Icosanóico	C20:0	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>
Gadoleico	Cis-9-icosenóico	C20:1(n9)	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>

Fuente: CEPAL. [20 de marzo de 2010]. <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791->

1.pdf

Tabla II. **Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales**

Aceite	Ácidos grasos – símbolos conforme Tabla 1					
	C16 %	C18 %	C18:1(n9) %	C18:2(n9,12) %	C18:1(n9): OH(n12) %	Otros %
Algodón	17-23	1-3	23-41	34-55	---	0-5
Maní	8-10	1-4	30-50	34-56	---	0-4
Canola	5	2	58	21	---	14
Colza	2-5	1-2	10-15	10-20	---	55-70
Palma	32-47	1-6	40-52	2-11	---	1-6
Girasol	6	4	19	69	---	2
Higüerillo	2	1	3	5	88	1
Coco	7-10	1-4	5-8	1-3	---	75-86
Soya	7-11	3-6	22-34	50-60	---	11-22
Oliva	14	---	76	10	---	---
Maíz	8-10	1-4	30-50	34-56	---	1-4
Jatropha	16	10	41	32	---	1
Grasa ganado	23-29	21-26	39-42	2	---	4-11
Grasa cerdo	25-30	12-16	41-51	4-22	---	5-18
Aceite usado	17	12	55	8	---	8

Fuente: CEPAL. [20 de marzo de 2010]. <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>

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 (de los terpenos, fenoles y otras sustancias aromáticas) y poseen muy alto valor económico por sus propiedades aromáticas. Ejemplos son el aceite de la cáscara de naranja y el aceite de pino.

Muchas especies de oleaginosas no son empleadas para la producción de aceite y son usadas exclusivamente para la alimentación. El alto valor de estas oleaginosas en granos vuelve poco económica la extracción del aceite;

como es el caso de varios tipos de semillas, como las nueces, las avellanas, el pistacho, la macadamia, el marañón, etc. En algunos casos, el aceite producido tiene también alto valor para fines farmacéuticos o cosméticos, como ocurre con el aceite de almendra.

#### **2.2.2.2. Alcoholes**

Los alcoholes que se pueden utilizar para la producción de biodiesel son los de cadena corta. Entre ellos, metanol, etanol, propanol, butanol y alcohol amílico.

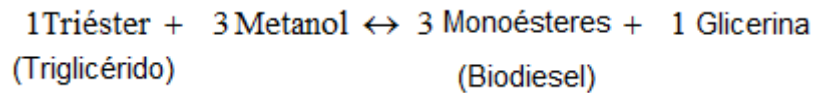
El metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y el etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) son los más usados debido fundamentalmente al bajo costo y a sus propiedades <sup>6</sup> Aunque el etanol es mucho menos tóxico que el metanol, tiene que ser usado en su forma pura, totalmente deshidratada, la cual es más cara de obtener. Generalmente, el etanol es solamente 95 por ciento puro; el cinco por ciento restante tiene que ser destilado por un proceso químico. Adicionalmente, cuando se usa el etanol, el aceite tiene que estar totalmente seco. Ambas condiciones son muy difíciles de conseguir, especialmente con el aceite de restaurantes, el cual es usado para freír vegetales, carne, pescado etc.

La reacción con el metanol no requiere tanto secado; siempre es mejor usar el aceite mas seco posible, pero un poco de agua no arruinará la reacción; tal vez resulte en una mayor producción de jabón, y puede que retarde la reacción un poco, pero aún es posible producir biodiesel de buena calidad.

(6) Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel [en línea]. [ 20 de marzo de 2010]. Disponible en: < <http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>>

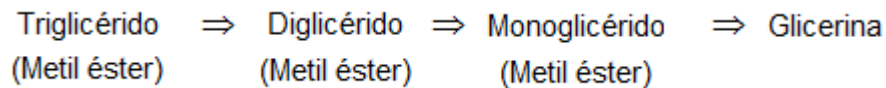
### 2.2.2.3. Las reacciones de transesterificación

La reacción química que produce el biodiesel a partir de los triglicéridos se llama transesterificación y su representación esquemática global está dada por:

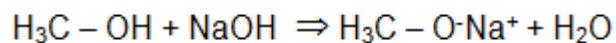


Cada molécula de biodiesel es un monoéster metílico, del tipo  $R-COO-CH_3$ , donde R es un radical de ácido graso y el grupo  $CH_3$  proviene del metanol. En el caso de uso de etanol para la reacción, las moléculas de biodiesel serán monoésteres etílicos del tipo  $R-COO-C_2H_5$ .

La reacción real ocurre en etapas y puede ser representada esquemáticamente:

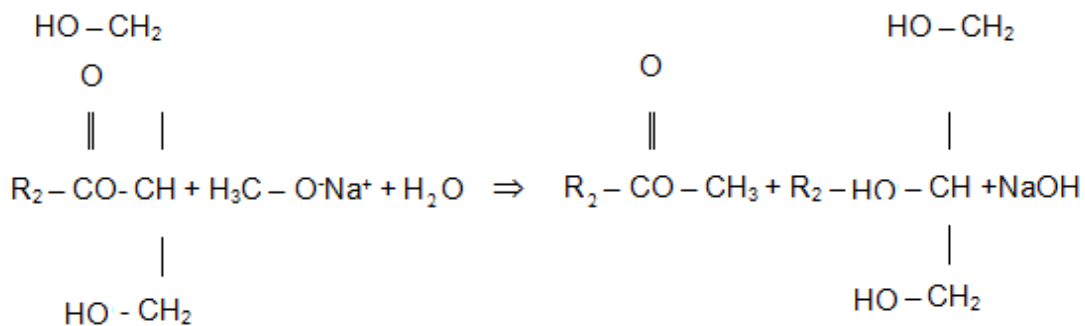
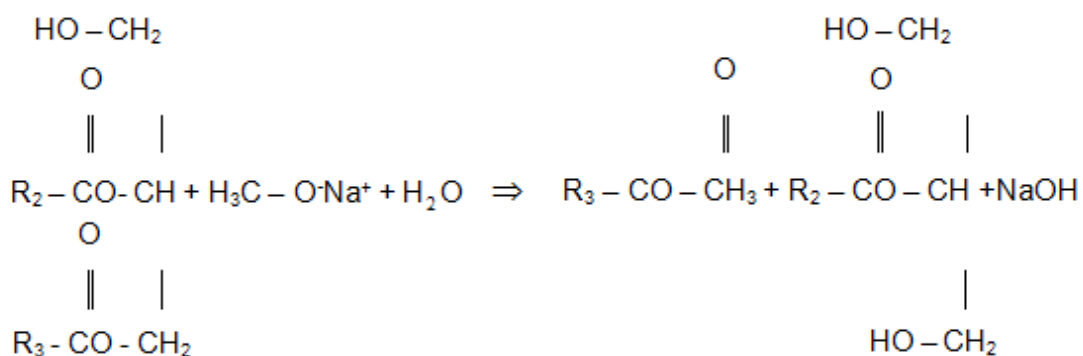


La descripción detallada de las etapas con participación del catalizador alcalino (NaOH o KOH) se da a continuación. En primer lugar, ocurre la formación de metóxido de sodio o de potasio cuando se mezclan el metanol y el catalizador:



Es decir, el grupo metil del metóxido se une a uno de los ácidos grasos, produciendo una molécula de metil – éster (biodiesel) y transformando el triglicérido en un diglicérido. Es de notarse que el catalizador es restituido

(NaOH). La reacción del diglicérido para monoglicérido es similar a la reacción de arriba empleando una molécula más de metóxido y agua con la formación de una nueva molécula de biodiesel, un monoglicérido y NaOH. Lo mismo ocurre entonces para el monoglicérido que se transforma finalmente en glicerina liberando la tercera molécula de biodiesel y de NaOH.



La reacción de transesterificación es reversible por lo que es necesario trabajar con exceso de metanol (o etanol) para lograr altos porcentajes de

conversión de triglicéridos en glicerina con la consecuente producción de biodiesel. La conversión de los triglicéridos en glicerina nunca es del 100 por ciento y siempre restan productos intermediarios o laterales de la reacción, tales como diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres (FFA). Esta es la razón para la necesidad de hacer siempre la purificación del biodiesel antes de su liberación para uso final. Como se trabaja con exceso de metanol, es importante separar el metanol de la agua y reutilizarlo en el proceso.

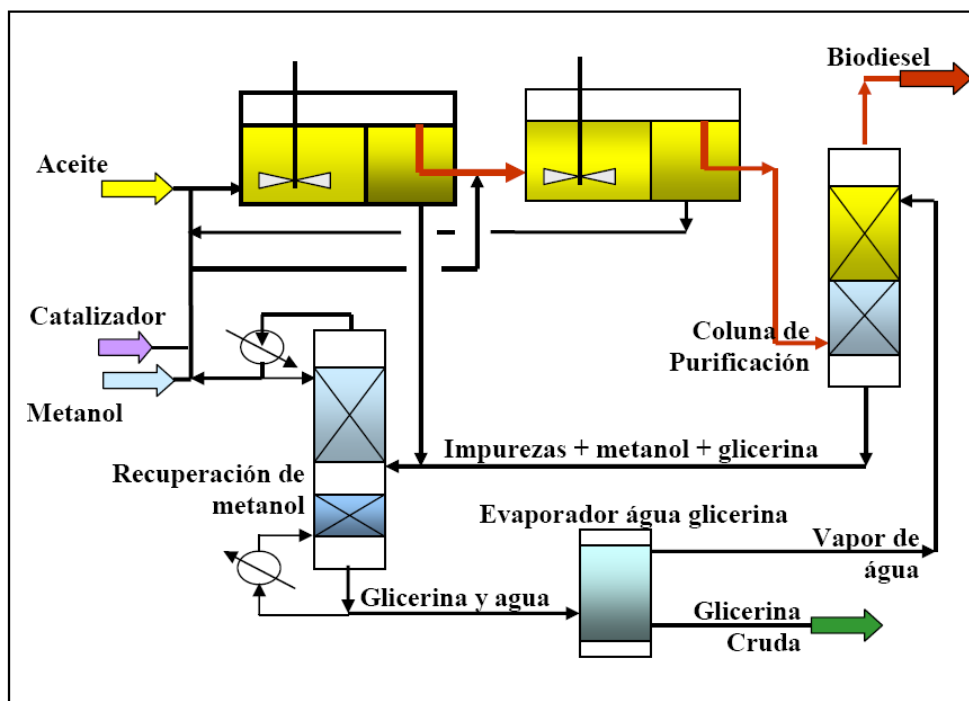
### **2.2.3. Proceso de obtención de biodiesel**

En la figura 13 se muestra el proceso Lurgi de producción en flujo continuo de biodiesel, el más empleado. Aceite, metanol y catalizador alimentan el reactor 1, donde son mezclados; con la reacción de transesterificación, ocurre una separación de dos fases. La fase más ligera, constituida por ésteres y aceite, es drenada para el segundo reactor, donde recibe metanol y catalizador adicionales. Esta segunda etapa de reacción maximiza la eficiencia de uso del aceite, reduce la cantidad de mono y diglicéridos y mejora la calidad del biodiesel.

También en este reactor ocurre la separación de fases, en donde la fase ligera (biodiesel) es conducida por una columna de purificación donde el biodiesel es lavado con agua, que remueve la glicerina y metanol residuales, así como otras impurezas. El producto final debe ser seco.<sup>7</sup>

(7) Díaz Fulgan, Nancy Karina. Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio, que permitan caracterizar el sistema ternario Metanol-Biodiesel-Agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 mm Hg. p.40-42

Figura 13. **Proceso Lurgi de producción continua**



Fuente: CEPAL. [20 de marzo de 2010]. <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>

La fase más pesada del reactor 2 contiene glicerina y aún mucho metanol y catalizador, por lo que es reciclada para el reactor 1. La fase más pesada del reactor 1 contiene glicerina, mucho metanol y otras impurezas y es conducida a un destilador que hace la recuperación del metanol, para reciclarlo.

El agua empleada para lavar el biodiesel es conducida también para el recuperador de metanol. En la destilación, el metanol a ser reciclado sale en la parte de arriba y en el fondo sale una mezcla de agua, glicerina e impurezas. Para reducir el consumo de agua y hacer la concentración de la glicerina, esta

mezcla va a un evaporador, donde el agua se evapora y es reconducida para la columna de purificación. La glicerina cruda posee una concentración alrededor del 80 por ciento y contiene las impurezas retenidas en el proceso. Para obtener mejores precios, la glicerina debe ser purificada por destilación.

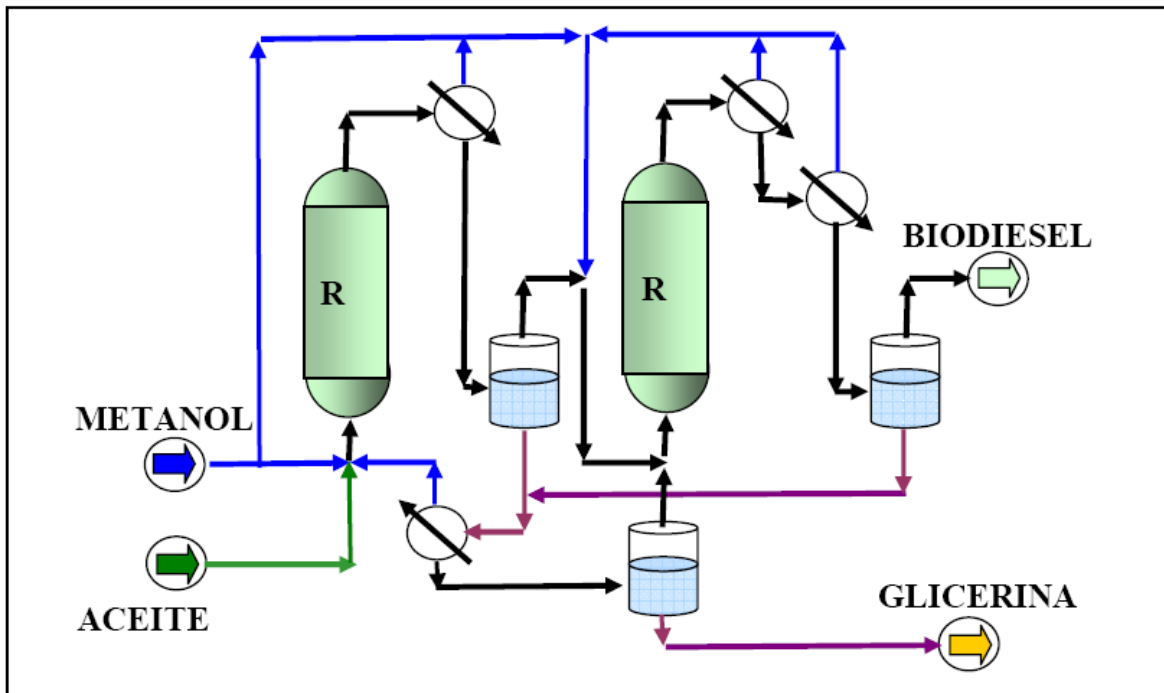
Las características más interesantes del proceso Lurgi son que puede ser adoptado para muchas materias primas diferentes, opera a presión atmosférica y con temperatura alrededor de 60 grados centígrados, recupera metanol en exceso y el agua, la separación de fases ocurre por gravedad (no emplea centrifugas). Su eficiencia de conversión del aceite es de alrededor del 98 por ciento.

La empresa Axens, que desarrolla comercialmente los proyectos del Instituto Francés del Petróleo, hizo la propuesta de un sistema de producción de biodiesel también con dos reactores en serie, pero con catalizadores sólidos fijos, por lo que no es necesario alimentar el proceso con catalizador y la separación del biodiesel y glicerina se vuelve más simple. La figura 14 presenta esquemáticamente el proceso que se presta a grandes volúmenes de producción.

Las ventajas anunciadas del proceso con catalizador sólido son la alta pureza de la glicerina (98 por ciento), la gran eficacia de conversión de aceite en biodiesel ( $\approx 100$  por ciento), la inexistencia de sub-productos a tratar (ni FFA, ni aguas de proceso), y que no hay consumo de sustancias químicas ni se maneja el catalizador.



Figura 14. El proceso Axens



Fuente: CEPAL. [20 de marzo de 2010]. <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>

### 2.2.3.1. Los co-productos y subproductos de la producción del biodiesel

Los principales co-productos de producción del biodiesel son la glicerina y el alcohol en exceso.

El aprovechamiento del alcohol en exceso y recuperado es fundamental ya que se recomiendan desde 50 por ciento (metanol) hasta 300 por ciento (etanol) de exceso de alcohol en la reacción de transesterificación. La recuperación y deshidratación del alcohol permite su reutilización en la

reacción, disminuyendo la necesidad de alcohol nuevo para reposición de las cantidades efectivamente usadas en la reacción y eventuales pérdidas.

La producción de glicerina ya sea bruta (alrededor de 65 por ciento glicerina) o destilada (arriba de 95 por ciento) también es muy importante por varias razones: no se puede descartar esta fase por motivos ambientales y los precios de la glicerina ayudan a viabilizar económicamente el proyecto. Las principales impurezas presentes en la glicerina bruta producida en la transesterificación son agua, catalizador, trazos de ésteres, y propanodiol.

El mercado de glicerina es sensible a la penetración del biodiesel en grandes cantidades. Por otro lado, con la caída de los precios de la glicerina, las posibilidades de su empleo en otras aplicaciones hasta ahora no atractivas se pueden materializar, movimiento que puede evitar depreciación elevada de los precios en el mercado de la química de la glicerina. Los subproductos del procesamiento de la glicerina deben ser tratados de forma conveniente.

#### **2.2.4. Teoría de lavado del biodiesel**

Después de la reacción y del asentamiento inicial, algunas impurezas solubles en agua quedan en el biodiesel. Estas impurezas se encuentran en todo biodiesel fabricado artesanalmente, independientemente de la calidad de la reacción o del aceite. La mayoría de los contaminantes son jabones, una pequeña cantidad de residuos de metanol, una pequeña cantidad de residuos de lejía y glicerina libre.<sup>8</sup>

(8) Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel [en línea]. [ 20 de marzo de 2010]. Disponible en: < <http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>>

Lavar el combustible con agua remueve algunas de estas impurezas, pero no remueve mono- y di glicéridos (los contaminantes que resultan de una reacción incompleta).

El lavado también tiene otras dos ventajas: detiene el resto de la reacción lenta que algunas veces ocurre (en el biodiesel no lavado a veces puede observarse la glicerina asentándose durante un período de meses o semanas, lo cual puede detenerse lavando el combustible y removiendo el metanol o el catalizador) y provee información para el control de calidad.

La temperatura es otro factor importante que debe tener en mente al lavar. Es más fácil trabajar con agua y biodiesel tibios. Existe una menor probabilidad de causar una emulsión que si utiliza estas sustancias heladas. Si se está teniendo dificultades al lavar, agregar calor de primera instancia es una buena solución. Generalmente no es necesario calentar el agua y el biodiesel, lo cual puede resultar costoso a largo plazo.

Entre más tiempo deja que su biodiesel se asiente después de la reacción, más fácil será el proceso de lavado.

#### **2.2.4.1. Métodos de lavado**

Existen cuatro maneras principales de lavar el biodiesel: lavado con burbujas, lavado mediante atomización, lavado con agitación y lavado estático. Estos diversos lavados pueden ser utilizados juntos o separados, pero deben formar una estrategia de lavado cohesiva.

- Lavado con burbujas: consiste en añadir agua gentilmente al biodiesel, agregar una piedra de aire de acuario y colocar una bomba de aire en la porción de agua (localizada bajo una capa flotante de biodiesel) que burbujee el aire a

través del agua. Las burbujas de aire recogen una diminuta cantidad de agua y la transportan a través del biodiesel, creando una agitación indirecta de los dos líquidos y recogiendo jabones y otros contaminantes en el camino. Cuando la burbuja explota en la superficie, deja caer el agua recogida, la cual absorbe más jabones y otros contaminantes a medida que se hunde.

El tiempo de saturación dependerá de la cantidad de agua que se utilice, de cuántos lavados se han hecho y del sistema de burbujeo. Debe continuar lavando con burbujas hasta que el agua de lavado se mantenga transparente durante un lavado. También se puede medir pH del agua antes y después de un lavado. Si el pH del agua se queda igual antes y después del lavado, significa que no hay más contaminantes siendo extraídos, así que el proceso de lavado está completo.

- Lavado mediante atomización: este sistema utiliza más agua y un equipo más complicado. Se usa un atomizador (generalmente de una tienda de suministros para jardines) suspendido sobre un recipiente de biodiesel. Las minúsculas gotas de agua que rocía el atomizador caen y pasan lentamente por el biodiesel, agitando el combustible menos que el lavado con burbujas y removiendo los contaminantes gradualmente. Una agitación más gentil da menos lugar a que los jabones y los monos- y di-glicéridos formen una emulsión.

- Lavado estático: el lavado estático es la forma de lavado más gentil, no requiere equipo y necesita muy poco trabajo. Consiste en verter agua (preferiblemente caliente) en un tanque de biodiesel y dejar que los líquidos reposen juntos. El contacto entre la capa de agua en la base y la capa de biodiesel arriba crea un efecto de limpieza lento y gentil debido a la polaridad del agua y a las gentiles corrientes de convección creadas a medida que la

temperatura se equilibra. Por ello, el lavado estático es un lavado inicial excelente. El tiempo que tomará para que el agua se sature depende principalmente de su temperatura, la cantidad de agua y el tipo de tanque de lavado que se utilice (el área de la superficie de contacto entre el agua y el biodiesel). El lavado estático puede lavar totalmente un lote de biodiesel, pero esto quizás tomaría varias semanas por cada lote.

- Lavado con agitación: este es el lavado más efectivo, aunque al mezclar mecánicamente el biodiesel con agua se formará una emulsión si se intenta lavar combustible que no ha terminado de reaccionar. El tiempo de agitación necesario variará dependiendo del clima y la estrategia de mezclar. Además, entre más violenta y más larga es tu agitación, es más probable que cause una emulsión.

## **2.2.5. Propiedades de caracterización de biodiesel**

Las propiedades del biodiesel comerciales dependen tanto del proceso de fabricación como de la naturaleza de los lípidos a partir de los cuales se ha producido. El biodiesel en función de la naturaleza de la fuente, animal o vegetal, proporcionará unas características particulares.

### **2.2.5.1. Punto de inflamación**

Este parámetro generalmente se determina para satisfacer temas legales de seguridad. También es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol no reaccionado en el proceso de obtención en el caso del biodiesel.

### **2.2.5.2. Viscosidad**

Debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible. Por la otra parte también se limita la viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño de los motores, y en las características del sistema de inyección.

### **2.2.5.3. Densidad**

Da idea del contenido en energía del combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible mejor.

### **2.2.5.4. Cenizas sulfatadas**

Los materiales que forman cenizas en un biodiesel se pueden presentar de tres formas:

- Sólidos abrasivos
- Jabones metálicos solubles
- Catalizadores no eliminados en el proceso

Tanto los sólidos abrasivos como los catalizadores no eliminados favorecen al desgaste del inyector, bomba de inyección, pistón y anillos, además de contribuir a la formación de depósitos en el motor.

Los jabones metálicos solubles tienen un efecto menor en el desgaste pero pueden afectar más a la colmatación de filtros y depósitos en el motor.

#### **2.2.5.5. Azufre**

Contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente en importancia dependiendo en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor. También pueden afectar al funcionamiento del sistema de control de emisiones y a límites medioambientales.

#### **2.2.5.6. Número de cetano**

Es una medida de la calidad de ignición de un combustible e influye en las emisiones de humo y en la calidad de la combustión. El número de cetano depende del diseño y tamaño del motor, de las variaciones de la carga de velocidad y condiciones de arranque y atmosféricas.

Un bajo número de cetanos conlleva a ruidos en el motor, prolongando el retraso de la ignición y aumentando el peso molecular de las igniciones.

#### **2.2.5.7. Índice de yodo**

Indica la tendencia a la oxidación de un biodiesel porque da idea del grado de insaturaciones que poseen sus ésteres.

#### **2.2.5.8. Punto de nube**

Indica la temperatura a la cual empiezan a precipitar ciertos compuestos del combustible (parafinas, materia insaponificable, etc.). Es una medida muy importante a tener en cuenta cuando se usa el motor en climas fríos. El valor debe ser definido por el usuario, ya que depende del clima en el cual el motor se utilice.

#### **2.2.5.9. Agua y sedimentos**

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

#### **2.2.5.10. Residuo carbonoso**

Da una idea de la tendencia del combustible a formar depósitos carbonosos.

#### **2.2.5.11. Número ácido, TAN**

Determina el nivel de ácidos grasos, o generados por degradación, que se presentan en el combustible. Si posee un alto grado de acidez se forman una cantidad importante de depósitos y también se producirá mayor corrosión en el sistema.

#### **2.2.5.12. Contenido en metales (Na, K, P) y ácidos grasos**

Contribuyen al aumento del residuo carbonoso de manera notable y también a las cenizas, generando residuos inorgánicos parcialmente quemados. Además, también pueden formar jabones que colmatan los filtros de combustible.



#### **2.2.5.13. Glicerina libre**

Determina el nivel de glicerina no enlazada presente en el biodiesel. Su presencia normalmente se debe a una mala purificación del biodiesel. Niveles altos pueden causar problemas de depósitos en el inyector, así como colmatación de filtros. Pueden dañar los sistemas de inyección debido a los compuestos inorgánicos y jabones que se acumulan en la glicerina.

#### **2.2.5.14. Glicerina total**

Determina el nivel de glicerina enlazada y no enlazada presente en el combustible. Niveles bajos significan que se ha producido un alto grado de conversión en el aceite o grasa, y se han formado gran cantidad de monoésteres. Niveles altos de mono, di y triglicéridos pueden provocar la colmatación de los filtros, depósitos carbonosos en los inyectores y pueden afectar adversamente a las propiedades a bajas temperaturas. Esto es debido a que al poseer temperaturas de ebullición superiores provocan que la combustión sea bastante peor. Además, aumentan la viscosidad del biodiesel.

#### **2.2.5.15. Contenido de alcohol**

Puede provocar problemas de lubricidad y en el número de cetano. Desde el punto de vista de la seguridad el punto de inflamación disminuye. Por otro lado, junto a la presencia de alcohol puede venir asociada glicerina disuelta en este con los consiguientes problemas antes comentados.

## 2.2.6. La calidad del biodiesel

Es muy importante fijar estándares de calidad para el biodiesel, teniendo en cuenta que las propiedades del biodiesel varían de acuerdo con su origen (materia prima). Además, en el proceso de fabricación del biodiesel se pueden formar contaminantes en el producto final que deben ser eliminados para que el biodiesel producido tenga las características adecuadas a su uso en motores diesel.

Los principales estándares de calidad son las normas ASTM D6751-03 empleada en los Estados Unidos y la norma EN 14214 usada en la Unión Europea. A pesar de tener muchos puntos en común, estas dos normas también presentan algunas diferencias importantes.

En la tabla III se especifican las características físico-químicas ASTM exigidas para el Biodiesel (B100) en el Reglamento Técnico Centro Americano:

Tabla III. **Especificaciones de biodiesel del RTCA**

<b>Especificaciones ASTM D 6751 para biodiesel</b>			
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>MÉTODO DE ANÁLISIS</b>	<b>VALORES</b>
Aditivos	-----	-----	Reportar
Contenido de ésteres	*(% masa)	EN 14103	96,5 mín.
Contenido de metanol o etanol	*(% masa)	EN 14110	0,20 máx.
Gravedad API a 15,56 °C (60 °F) o Densidad a 15 °C	°API kg/m <sup>3</sup>	ASTM D-287 ASTM D-1298	Reportar
Estabilidad a la oxidación, 110 °C	h	EN 14112	6,0 mín.
Punto de inflamación ("Flash point")	°C	ASTM D 93	130,0 mín.
Agua y sedimentos	**(%	ASTM D 2709	0,050 máx.

	volumen)		
Viscosidad cinemática a 40 °C.	mm <sup>2</sup> /s	ASTMD 445	1,9 – 6,5
Ceniza sulfatada	*(% masa)	ASTM D 874	0,020 máx.
Contenido de azufre total	mg/kg	ASTM D 5453	15 máx.
Corrosión tira de cobre, 3 h, 50 °C	-----	ASTM D 130	N° 3 máx.
Número de Cetano	-----	ASTM D 613	47 mín.
Punto de Enturbiamiento	°C	ASTM D 2500	Reportar
Residuo de carbón	*(% masa)	ASTM D 4530	0,050 máx.
Número Ácido	mg KOH / g	ASTM D 664	0,50 máx.
Glicerina libre	*(% masa)	ASTM D 6584	0,020 máx.
Glicerina total	*(% masa)	ASTM D 6584	0,240 máx.
Contenido de fósforo	*(% masa)	ASTM D 4951	0,001 máx.
Temperatura de destilación, temperatura equivalente atmosférica, 90% recuperado	°C	ASTM D 1160	360 máx.
Sodio (Na) y potasio (K) combinados	mg/kg	UOP 391	5 máx.
Calcio (Ca) y magnesio (Mg) combinados	mg/kg	EN 14538	5 máx.

\*fracción de masa (% masa)

\*\*fracción de volumen (% volumen)

Fuente: Reglamento Técnico Centro Americano RTCA 75.02.43:06

### 2.3. Características físicas y químicas generales de los solventes puros a utilizar

Tabla IV. **Propiedades físicas del agua desmineralizada**

Nombre común	Agua
Apariencia y olor	Líquido transparente sin olor
Punto de ebullición	100 °C
Punto de fusión	0 °C
Densidad relativa	1,00 g/cc a 4 °C
Constante dieléctrica a 25 °C	81,22
Índice de refracción	1,33
Viscosidad dinámica a 20 °C	0,952 mPa s
Masa molecular	18,0148 g/mol
Fórmula estructural	H <sub>2</sub> O

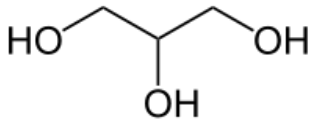
Fuente: Propiedades físicas y químicas del agua desmineralizada [en línea]. [22 de marzo de 2010]. Disponible en: <[www.lenntech.es/agua-desmineralizada.htm](http://www.lenntech.es/agua-desmineralizada.htm)>

Tabla V. **Propiedades físicas del biodiesel**

Glicerina total	0,221 ± 0,001 %
Glicerina libre	0,019 ± 0,003 %
Humedad	1,090 ppm

Fuente: Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel [en línea]. [20 de marzo de 2010]. Disponible en: <<http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>>

Tabla VI. **Propiedades físicas y químicas del glicerol**

<b>General</b>	
Nomenclatura IUPAC	1,2,3-Propanotriol
Otros nombres	Glicerol, Glicerina, Propanotriol, Propan-1,2,3-triol, 1,2,3-Trihidroxipropano
Fórmula molecular	
Fórmula semidesarrollada	HOCH <sub>2</sub> -CHOH-CH <sub>2</sub> OH
Fórmula estructural	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>
Número CAS	56-81-5
<b>Propiedades físicas</b>	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Incoloro
Masa molecular	92.09382 uma
Densidad a 25 °C	1.26 kg
Punto de fusión	291 K (18 °C)
Punto de ebullición	563 K (290 °C)
<b>Peligrosidad</b>	
Punto de inflamabilidad	433 K (160 °C)
Temperatura de autoignición	623 K (350 °C)

Fuente: Hernández, Gabriela. Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario Glicerol-Biodiesel-Agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mmHg. p. 49.

### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Variables**

Variables independientes

- Cantidad porcentual en composición del soluto Etanol en agua y en biodiesel
- Temperatura
- Presión atmosférica.

Variables dependientes

- Índice de refracción: razón entre las velocidades de la luz en el vacío y en el medio estudiado (Soluciones de Etanol).
- Densidad: razón entre la masa de una sustancia dividida en su volumen.
- Concentración real de porcentaje en peso: equivalencia de concentración en función del índice de refracción medido.

#### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en la Universidad de San Carlos de Guatemala en el Laboratorio de Química de la Escuela de Ingeniería Química, el Laboratorio de la Sección de Química Industrial y Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales, los dos últimos pertenecientes al Centro de Investigaciones de Ingeniería ubicado en el edificio T-5, en un tiempo aproximado de tres meses.



- Picnómetro de 10 mL
- Picnómetro de 1 mL
- Termómetro [0-100 °C]
- Plancha de calentamiento      Marca: SYBRON/Thermolyne con  
agitación:  
Modelo: Nuova II, SP18425  
Voltaje: 120 v  
Amperios: 7,5 A  
Potencia: 80 w

### **3.4.3. Cristalería**

- Earlenmeyers tipo pirex de 250 mL
- Pipetas serológicas de 1, 5 y 10 mL
- Buretas de 25 y 10 mL
- Beakers tipo pirex de 25, 50, 250 y 1000 mL
- Probetas de 10, 25, 50 y 100 mL
- Tubos de ensayo de 5, 10 y 40 mL
- Ampolla de decantación de 250 y 500 mL

### **3.4.4. Material de laboratorio**

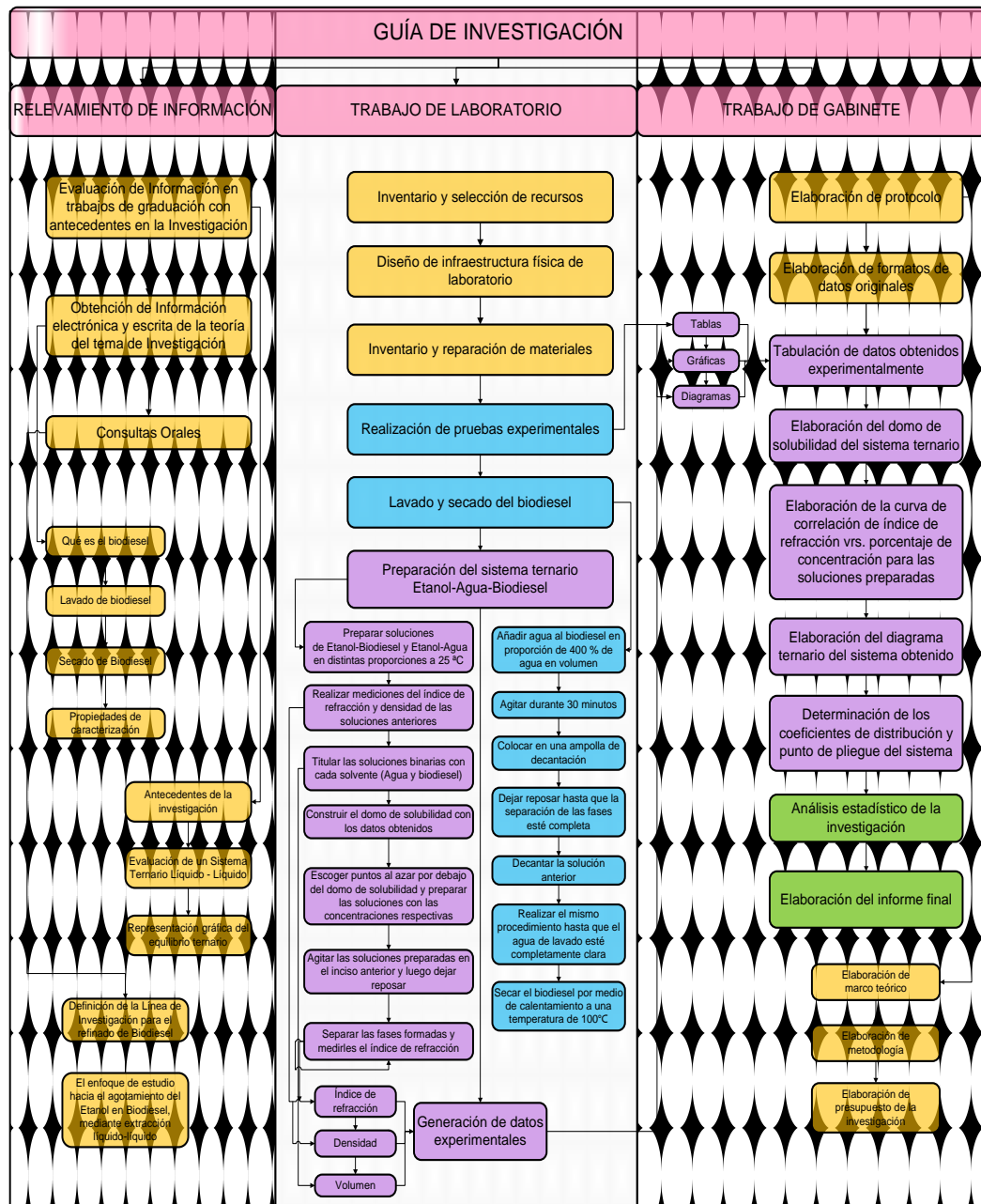
- Pizetas de Polietileno de 125 mL
- Soportes universales
- Anillos metálicos para ampollas de decantación
- Agitador magnético
- Pinzas metálicas para buretas



### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

El estudio se basó en la generación, tabulación y observación de datos obtenidos experimentalmente a nivel laboratorio, para identificar el tipo de sistema ternario en estudio. Por la naturaleza del estudio en mención, se tiene que la técnica utilizada fue de tipo cualitativa, debido a que es una investigación subjetiva, exploratoria, inductiva y descriptiva que comprende los datos mediante un análisis exhaustivo y diverso. Se muestra en el siguiente flujograma la metodología empleada para realizar el trabajo de graduación.

Figura 15. Flujograma de la metodología para la realización del Trabajo de Graduación de Graduación



Fuente: elaboración propia

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

Se determinó, al realizar la parte experimental del presente trabajo de investigación, el comportamiento del sistema ternario etanol-agua-biodiesel, dada la solubilidad del soluto en cada solvente, a temperatura ambiente.

Se prepararon soluciones de etanol/agua y etanol/biodiesel en un rango de concentraciones de 0 a 100 por ciento como porcentaje en peso, tomando valores de 10 en 10. Es decir, se tuvieron concentraciones de 10 por ciento, 20 por ciento, etc. hasta 90 por ciento; siendo por tanto la variable independiente del estudio, la concentración de las soluciones.

Para cada solución, se tomaron mediciones de masa y volumen, para determinar densidades aplicando picnometría, así como índices de refracción utilizando un refractómetro; tomando en cuenta que para fines de precisión y exactitud, se realizaron tres corridas o repeticiones por cada medición.

Luego se realizaron curvas de correlación entre densidad e índice de refracción en función de la composición porcentual en peso para cada solución de etanol/agua y etanol/biodiesel.

Se procedió a la determinación del equilibrio de inmiscibilidad del sistema, titulando soluciones de etanol/agua con biodiesel y soluciones de etanol/biodiesel con agua hasta observar la formación de dos fases.

Los volúmenes de solvente consumidos en cada titulación, se utilizaron para determinar la composición porcentual de cada mezcla ternaria, cálculo para el cual fue necesaria la data de índices de refracción en función de la composición porcentual obtenida anteriormente.

Con lo anterior, se procedió entonces a representar en un diagrama ternario el comportamiento del sistema.

Se prepararon ocho mezclas ternarias con concentraciones diferentes tomadas al azar, que se encuentren en el área de la región de dos fases por debajo de la curva binodal. Luego de realizar estas soluciones, se esperó la formación de las dos fases inmiscibles, agua y biodiesel, conteniendo cada una cierto porcentaje de etanol.

Dado el establecimiento del equilibrio de distribución para estas soluciones, se tomaron mediciones de índice de refracción, sustituyendo dichos valores para cada fase formada en la curva de correlación del índice de refracción versus la composición porcentual en peso obtenida inicialmente, obteniendo la correspondiente composición en peso para cada fase establecida. Se obtuvo con esto, la representación gráfica de las líneas de unión en un diagrama de coordenadas triangulares, determinando a la vez la composición de la mezcla ternaria correspondiente al punto de pliegue.

### **3.6.1. Método para la elaboración de la curva de solubilidad**

- Determinación de densidad

La densidad se determinó aplicando el método experimental de picnometría según la norma ASTM D-45.

- Determinación del índice de refracción
- 

Para medir el índice de refracción se utilizó un refractómetro Abbe modelo 32200, por medio del siguiente procedimiento:

- a) Fue ajustada la escala del refractómetro.
- b) Utilizando una pipeta para aplicar la muestra líquida al prisma, se comprobó que el prisma estuviera limpio. Se tuvo cuidado de no tocar el prisma con el extremo de la pipeta, esto puede rasguñar el cristal suave del prisma, Se colocó de 2 a 3 gotas de solución en el centro de la superficie del prisma.
- c) Cuidadosamente se cerró el prisma secundario.
- d) La lámpara se encendió usando el interruptor en el lado izquierdo, ajustando la lámpara para asegurar el brillo adecuado en el prisma de medición.
- e) Se observó por el ocular, girando la perilla de compensación de color hasta que apareció una línea clara y definida en el campo de visión.
- f) La perilla de medición fue girada alineando la línea delimitadora con las líneas de intersección (ajuste claro y oscuro al centro).
- g) Para obtener la lectura de medición de índice de refracción, se movió la palanca de la parte inferior izquierda y se repitió la operación en función del número de soluciones que se utilizaron.

### **3.6.2. Procedimiento preparatorio para el lavado del biodiesel**

El lavado de biodiesel se realizó para obtener un componente puro sin alcohol por medio del siguiente procedimiento:

- a) Agregando agua al biodiesel se llevó la mezcla en proporción de 400 por ciento de agua en volumen.
- b) La mezcla anterior se agitó durante 30 minutos.
- c) Empleando una ampolla de decantación, se separó la mezcla.
- d) La separación de las fases se obtuvo mediante el reposo de la mezcla.
- e) La solución anterior se decantó.

- f) Hasta que el agua de lavado estuviera completamente clara, se realizó el mismo procedimiento
- g) Mediante calentamiento se eliminó el agua del biodiesel, a temperatura de ebullición del agua durante 10 minutos agitando constantemente.

### **3.6.3. Procedimiento experimental para el sistema líquido-líquido etanol-biodiesel-agua a una temperatura ambiente**

#### Etanol-agua

- a) Soluciones de etanol en agua fueron preparadas, en proporciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 por ciento en volumen.
- b) Tomando tres alícuotas de cada solución, se obtuvieron los valores de índice de refracción.
- c) Tomando tres alícuotas de cada solución, se midió la densidad por medio de un picnómetro.
- d) A tres alícuotas de 3 mililitros de cada solución se agregó biodiesel lentamente, manteniendo la temperatura y agitación constante, hasta que se completaron dos fases, anotando el volumen requerido.
- e) Fue trazado el domo de solubilidad para los datos obtenidos en los incisos anteriores.
- f) Escogiendo 8 puntos al azar por debajo del domo de solubilidad, se prepararon las soluciones con las concentraciones respectivas.
- g) Las soluciones preparadas en el inciso (f) se agitaron aproximadamente por 25 minutos, luego se dejaron reposar por 30 minutos.
- h) Mediante decantación se separaron las dos fases formadas en el inciso (g) de cada solución y se midió el índice de refracción.

## Etanol-biodiesel

- a) Soluciones de etanol en biodiesel fueron preparadas en proporciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 por ciento en volumen.
- b) Tomando tres alícuotas de cada solución, se midió el índice de refracción.
- c) Tomando tres alícuotas de cada solución, se midió la densidad por medio de un picnómetro.
- d) A tres alícuotas de 3 mililitros de cada solución se agregó agua lentamente, manteniendo la temperatura y agitación constante, hasta completar dos fases., anotando el volumen requerido.
- e) Se construyó el domo de solubilidad para los datos obtenidos en los incisos anteriores.
- f) Escogiendo 8 puntos al azar por debajo del domo de solubilidad, se prepararon las soluciones con las concentraciones respectivas.
- g) Las soluciones preparadas en el inciso (f) se agitaron aproximadamente por 25 minutos, luego dejar reposar por 30 minutos.
- h) Mediante decantación, se separaron las dos fases formadas en el inciso (g) de cada solución y se midió el índice de refracción.

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

Los datos y resultados obtenidos experimentalmente de las soluciones de etanol-agua y etanol-biodiesel a temperatura ambiente, se ordenaron en tablas y gráficas con base en lo especificado en el protocolo del trabajo de graduación.

### **3.8. Análisis estadístico**

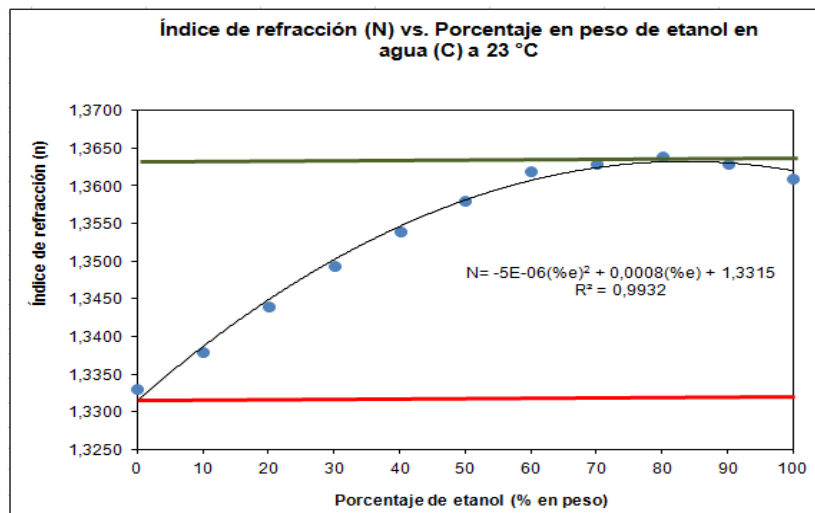
Se aplicó un análisis estadístico a los datos obtenidos del experimento y así se determinaron los resultados bajo el análisis de varianza ANOVA, el cual se basó a la hipótesis planteada (apéndice 4).





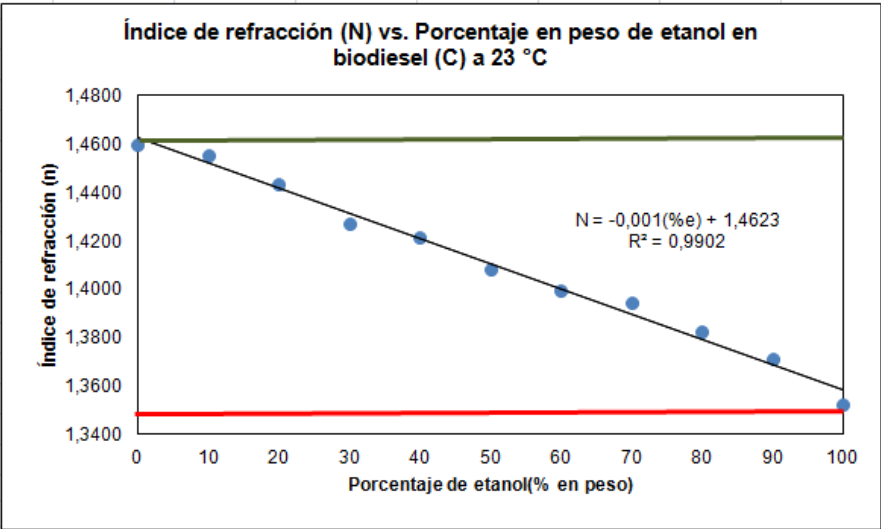
## 4. RESULTADOS

Figura 16. **Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria etanol-agua a temperatura ambiente**



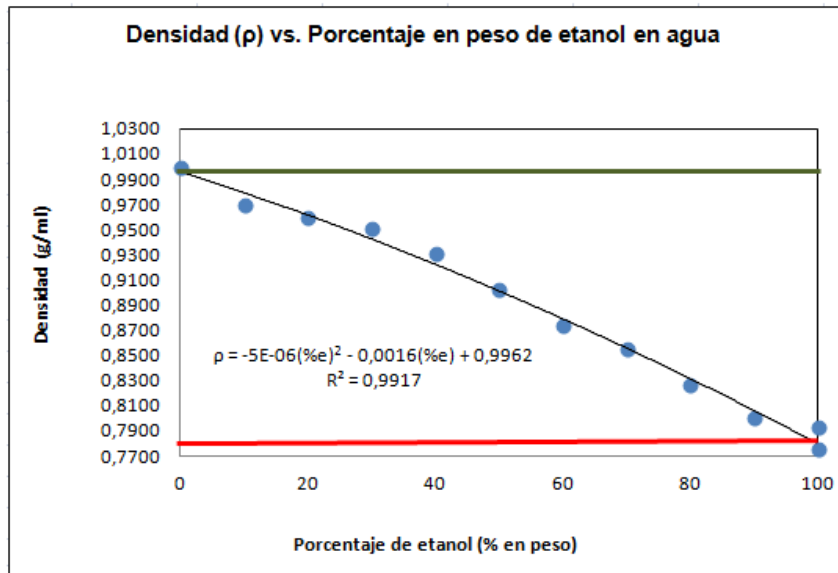
Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 17. Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria etanol-biodiesel a temperatura ambiente



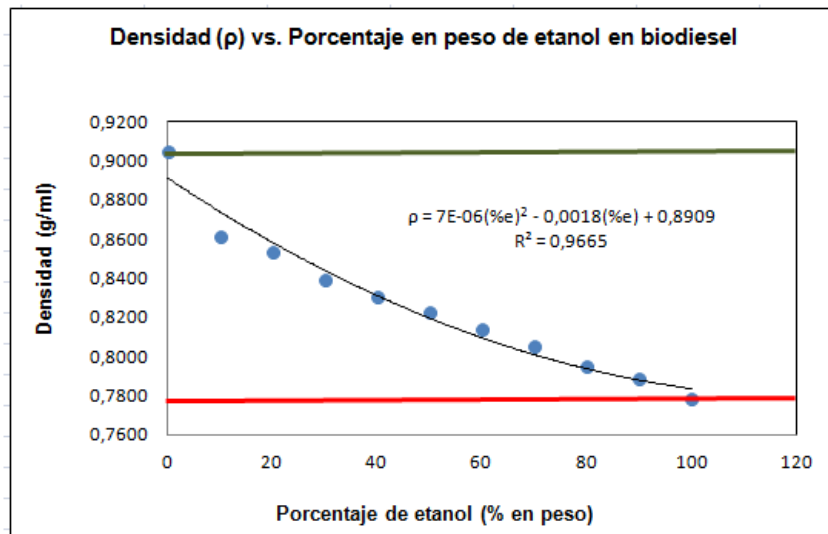
Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 18. **Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria etanol-agua a temperatura ambiente**



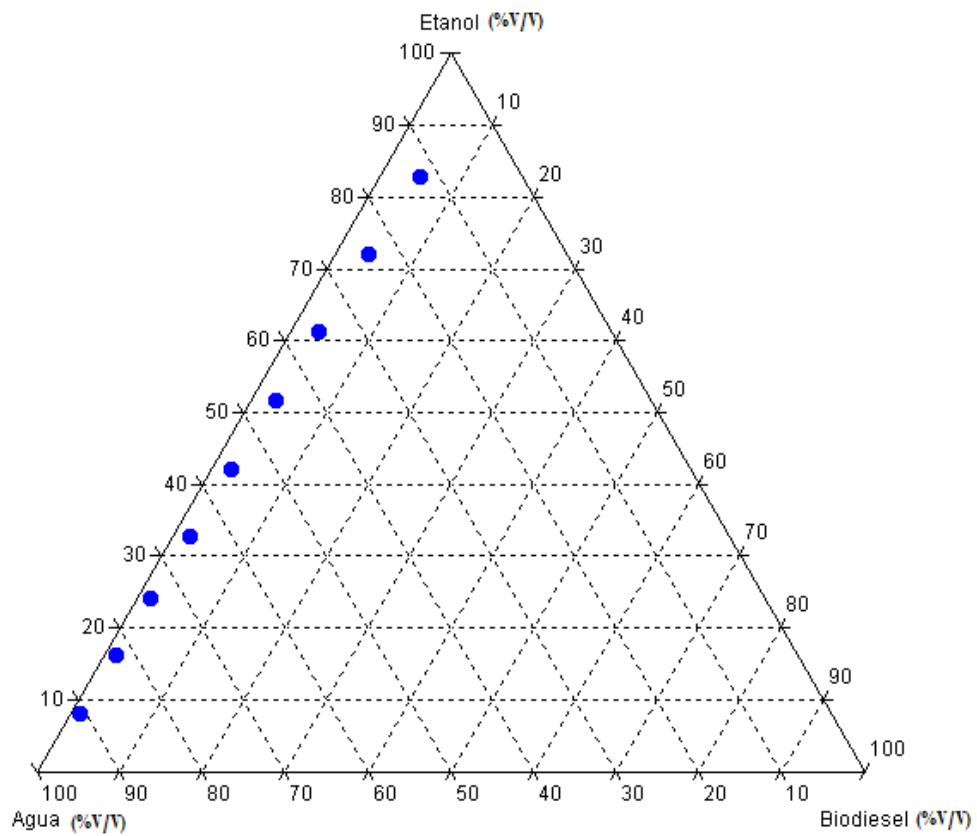
Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 19. **Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria etanol-biodiesel a temperatura ambiente**



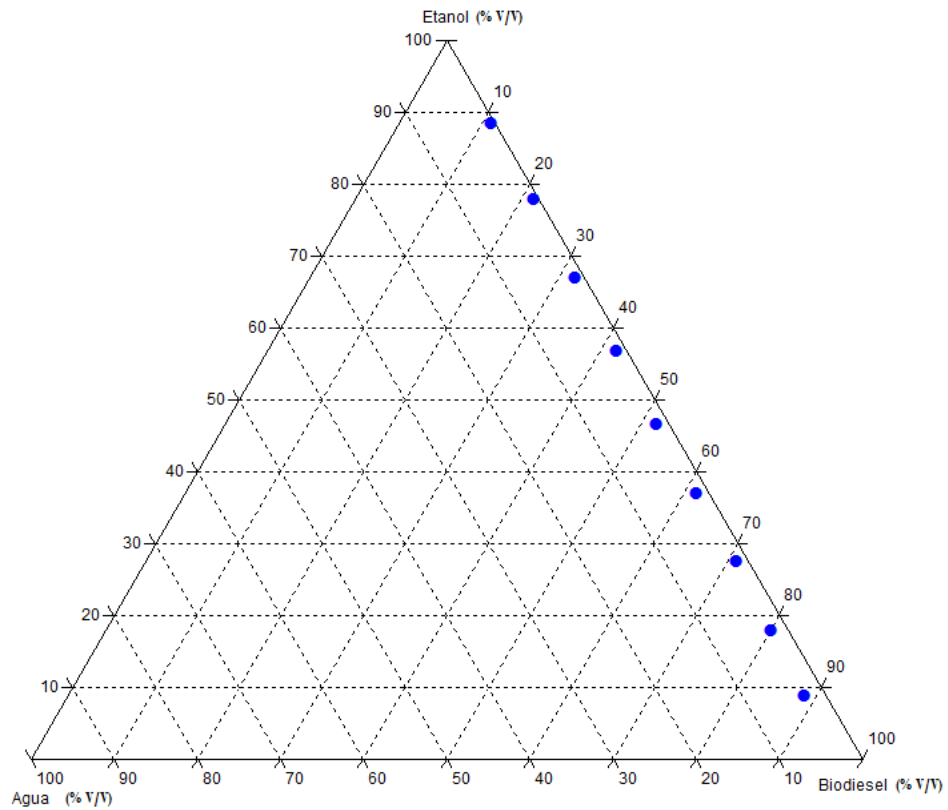
Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 20. **Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema etanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones etanol-agua, mediante la adición de Biodiesel a temperatura ambiente en función de la correlación de índices de refracción contra concentración de etanol**



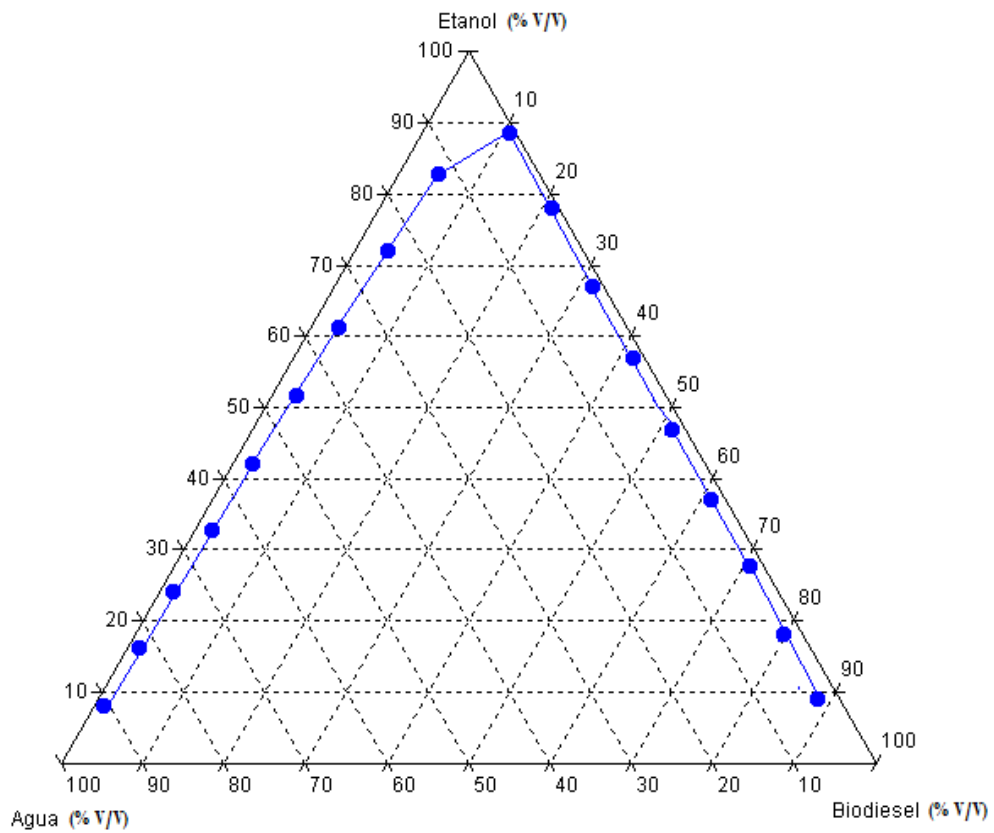
Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 21. **Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema etanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones etanol-biodiesel, mediante la adición de agua a temperatura ambiente en función de la correlación de índices de refracción contra concentración de etanol**



Fuente: datos calculados, apéndice 3.

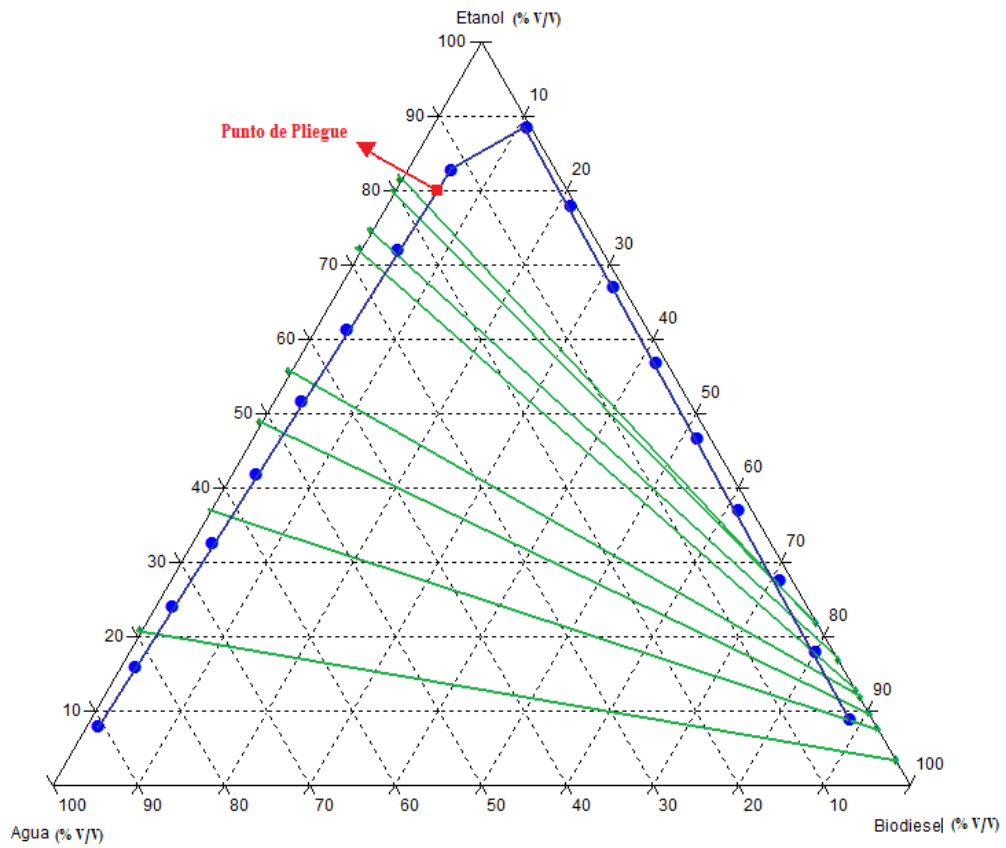
Figura 22. **Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad tipo I, obtenidos para el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente en función de la correlación de índices de refracción contra concentración de etanol**



Fuente: datos calculados, apéndice 3.



Figura 23. **Domo de solubilidad tipo I de los datos experimentales para el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente en función de la correlación de índices de refracción contra concentración de etanol**



Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Tabla VII. **Composición del punto de pliegue en el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente**

<b>Reactivo</b>	<b>Proporción (%v/v)</b>
Etanol	80
Biodiesel	3
Agua	17

Fuente: muestra de cálculo, apéndice 2.

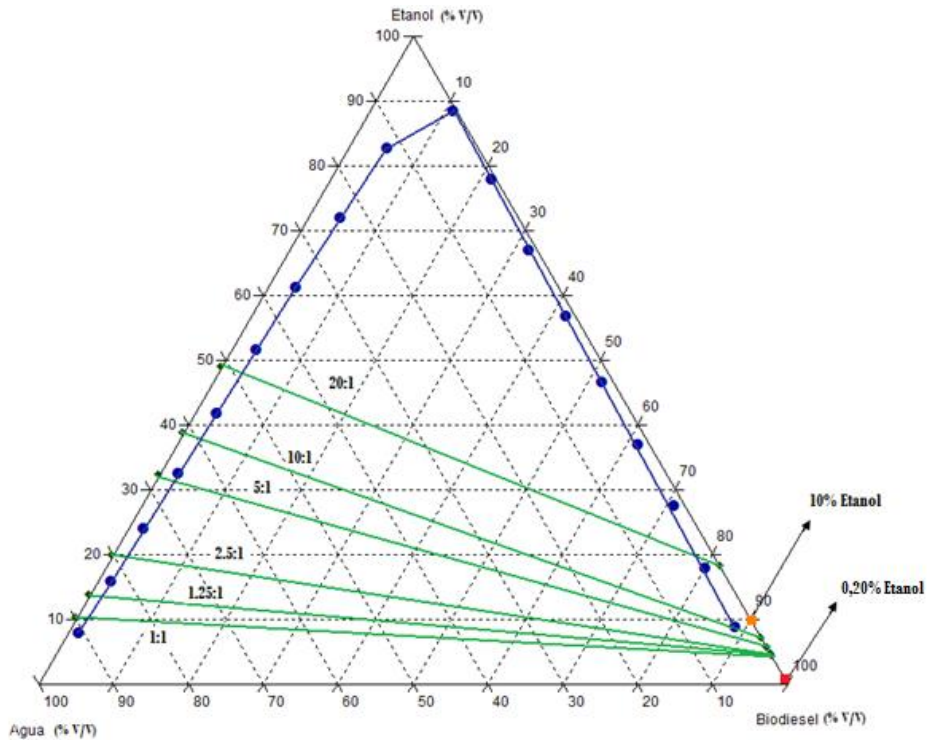
Tabla VIII. **Valores de los coeficientes de distribución (K) obtenidos a partir del cociente entre el porcentaje de etanol distribuido en la fase de biodiesel y el porcentaje de etanol distribuido en la fase acuosa a temperatura ambiente**

<b>Muestra</b>	<b>Etanol (% v/v)</b>	<b>Biodiesel (% v/v)</b>	<b>Agua (% v/v)</b>	<b>K*</b>
1	70	25	5	0,1936
2	30	30	40	0,1416
3	20	60	20	0,0956
4	60	30	10	0,0789
5	10	40	50	0,0759
6	10	80	10	0,0605
7	10	25	65	0,0502
8	20	20	60	0,0418

Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 24.

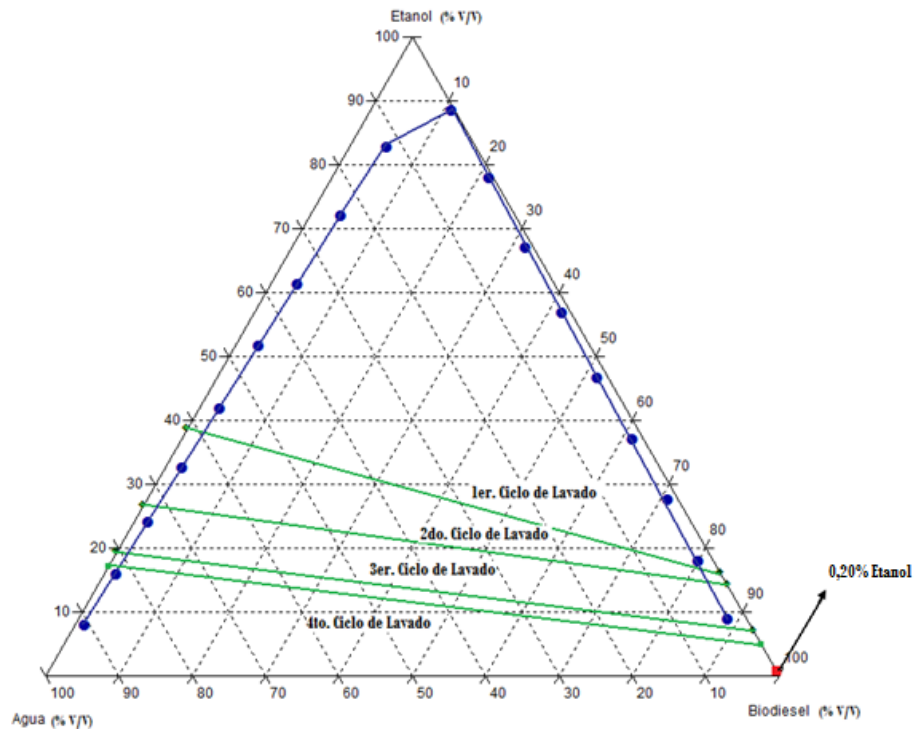
**Líneas de amarre para distintas relaciones de mezcla biodiesel:agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente. (Primer ciclo de lavado)**



Fuente: datos calculados, apéndice 3.

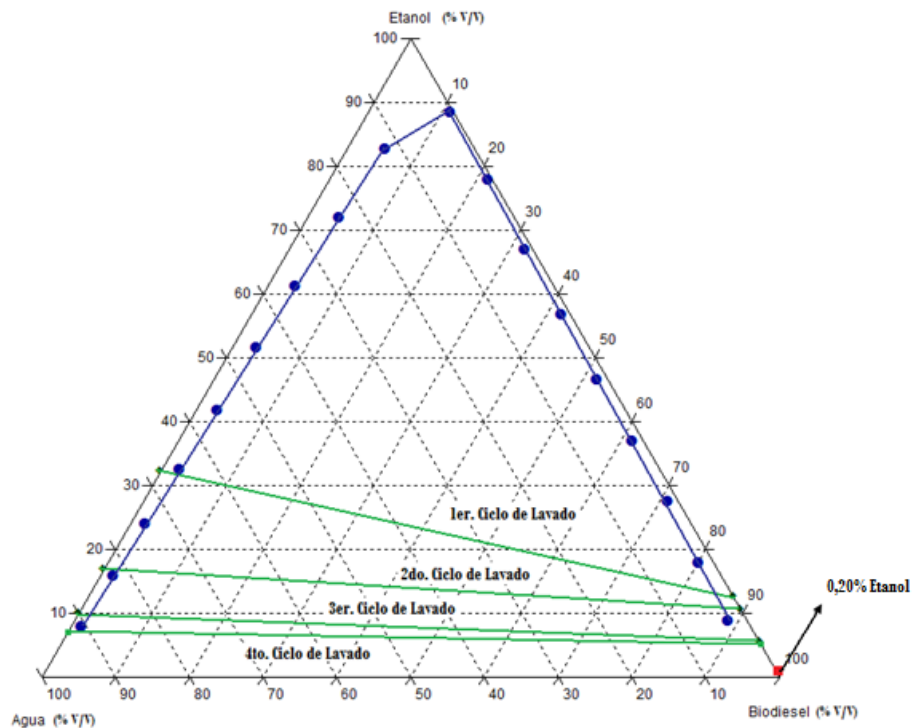
\*  $K = \%$  de etanol en fase biodiesel /  $\%$  de etanol en fase acuosa

Figura 25. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 10:1 de mezcla biodiesel:agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente



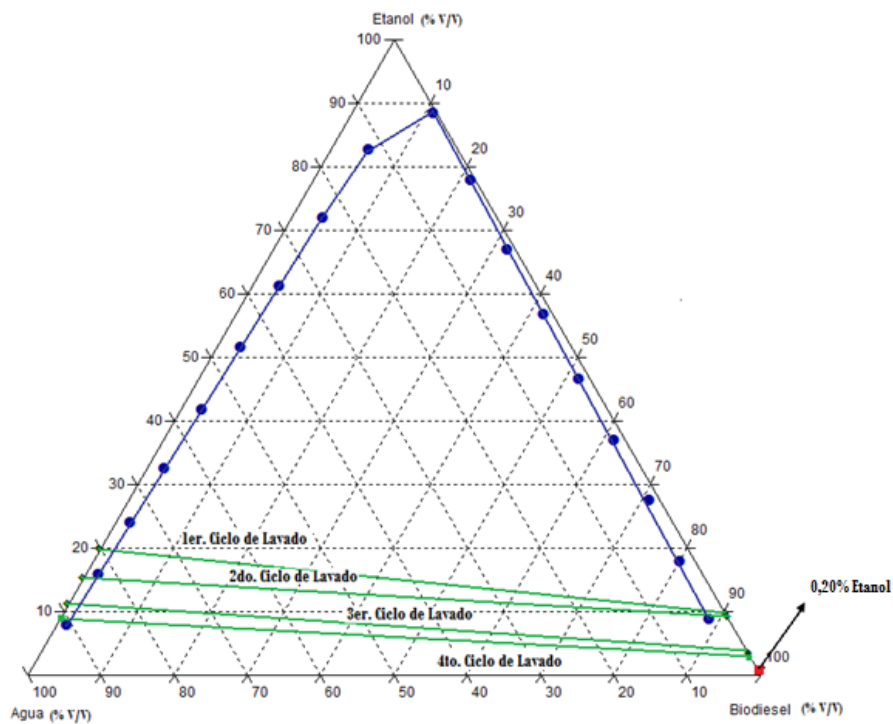
Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 26. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 5:1 de mezcla biodiesel:agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente



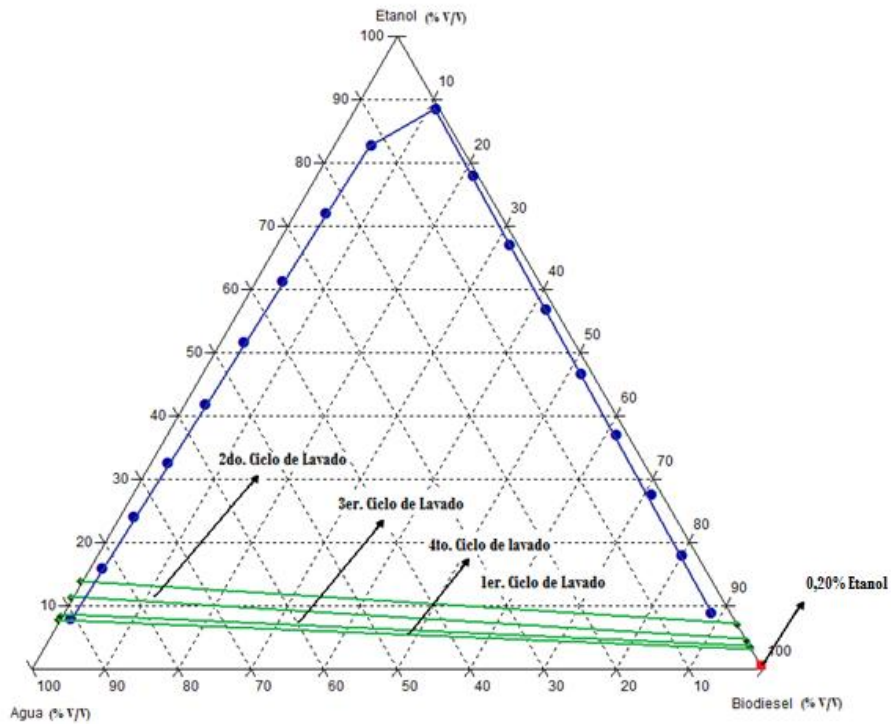
Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 27. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 2.5:1 de mezcla biodiesel : agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0,20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente



Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 28. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 1.25:1 de mezcla biodiesel:agua en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0,20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto durante 25 minutos a temperatura ambiente



Fuente: datos calculados, apéndice 3.

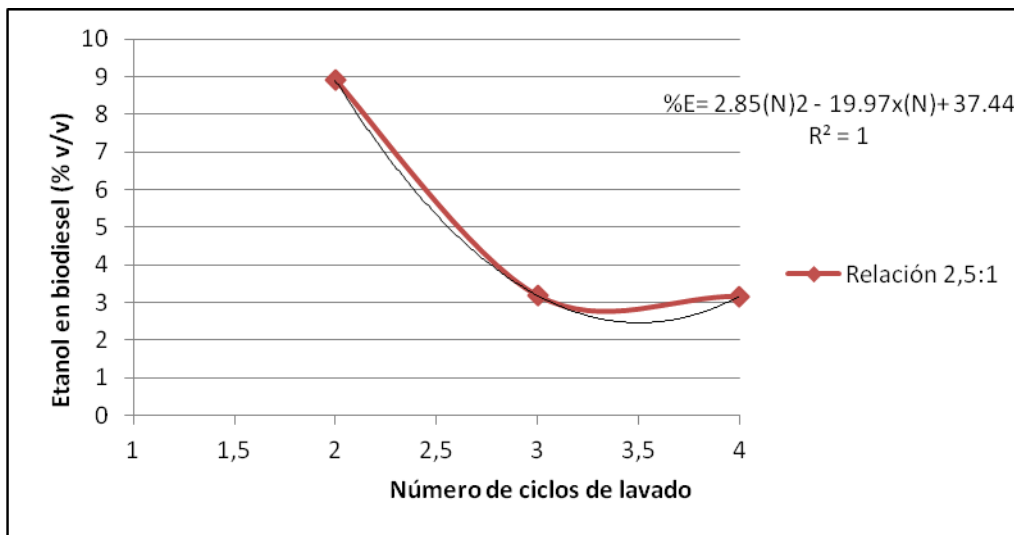
Tabla IX. **Datos de las concentraciones de etanol en agua para determinar la cantidad de ciclos de lavado, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol con agitación constante a 400 revoluciones por minuto y durante un tiempo de 25 minutos a temperatura ambiente**

<b>Relación biodiesel:agua</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Etanol en agua (% v/v)</b>	<b>Etanol en biodiesel (% v/v)</b>
10:1	1	38,52	16,00
	2	26,51	14,17
	3	19,25	7,00
	4	19,00	6,70
5:1	1	32,06	12,67
	2	16,69	12,50
	3	9,90	5,40
	4	8,97	5,40
2,5:1	1	19,73	9,50
	2	15,00	8,90
	3	11,00	3,18
	4	8,94	3,16
1,25:1	1	13,55	6,67
	2	8,99	4,12
	3	7,68	3,16
	4	7,53	3,16

Fuente: apéndice 1 y 2.

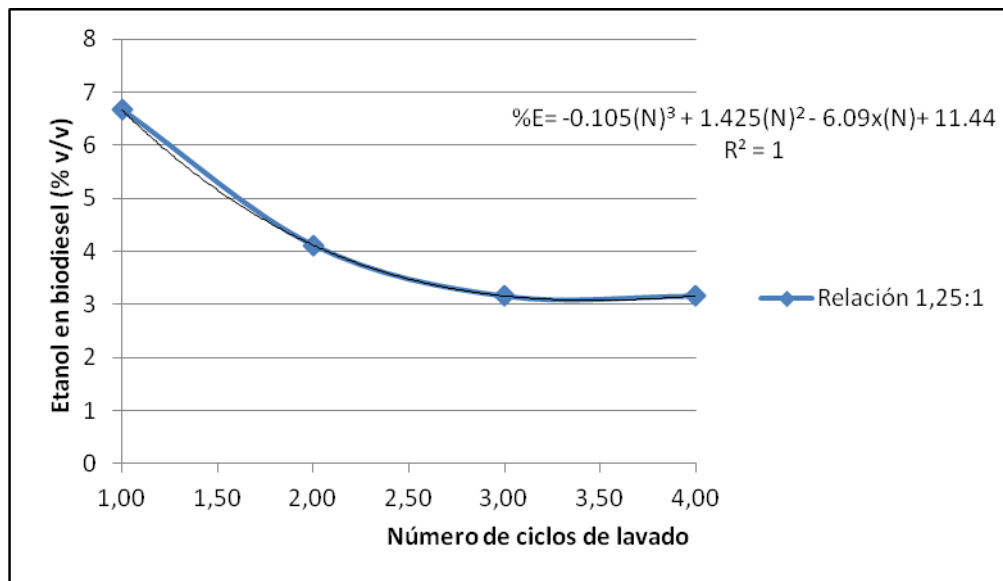


Figura 29. Curva de ciclos de lavado en la relación 2,5:1 de mezcla biodiesel : agua en función de porcentaje de etanol residual, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol con agitación constante a 400 revoluciones por minuto y durante un tiempo de 25 minutos a temperatura ambiente



Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Figura 30. **Curva de ciclos de lavado en la relación 1.25:1 de mezcla biodiesel : agua en función de porcentaje de etanol residual, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol con agitación constante a 400 revoluciones por minuto y durante un tiempo de 25 minutos a temperatura ambiente**



Fuente: datos calculados, apéndice 3.

Tabla X. **Número de ciclos de lavado estimados para el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, según la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, en función de las ecuaciones de regresión obtenidas**

Relación biodiesel:agua	Etanol en biodiesel (%)	No. de ciclos
2,5:1	0,2	6
1,25:1	0,2	9

Fuente: resultados, figuras 36 y 37.

Tabla XI. **Resultado del análisis de varianza de un factor, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema etanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de etanol en agua a temperatura ambiente**

Propiedades	CDM <sub>d</sub>	CDM <sub>e</sub>	F <sub>9,20</sub>	F <sub>c9,20</sub>	F>F <sub>c</sub>	Conclusión
Índice de Refracción	1,111E-07	0,001263	11366,26	2,8400	Si	Existe diferencia significativa
Volumen de biodiesel adicionado	0,00010	2,70011	111,7889	2,8400	Si	Existe diferencia significativa

Fuente: análisis estadístico ANOVA, apéndice 4.

Tabla XII. **Resultado del análisis de varianza de un factor, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema etanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de etanol en biodiesel a temperatura ambiente**

Propiedades	CDM <sub>d</sub>	CDM <sub>e</sub>	F	F <sub>c</sub>	F>F <sub>c</sub>	Conclusión
Índice de Refracción	1,472E-06	0,012012	8159,148	2,8400	Si	Existe diferencia significativa
Volumen de biodiesel adicionado	0,00009	0,00421	47,3125	2,8400	Si	Existe diferencia significativa

Fuente: análisis estadístico ANOVA, apéndice 4.

Donde:

CDM<sub>d</sub>: cuadrado de medias dentro de las muestras con determinado grado de libertad.

CDM<sub>e</sub>: cuadrado de medias entre las muestras con determinado grado de libertad.

F: valor calculado de la función F de cola, con sus respectivos grados de libertad.

F<sub>c</sub>: valor crítico de la función, con sus respectivos grados de libertad.



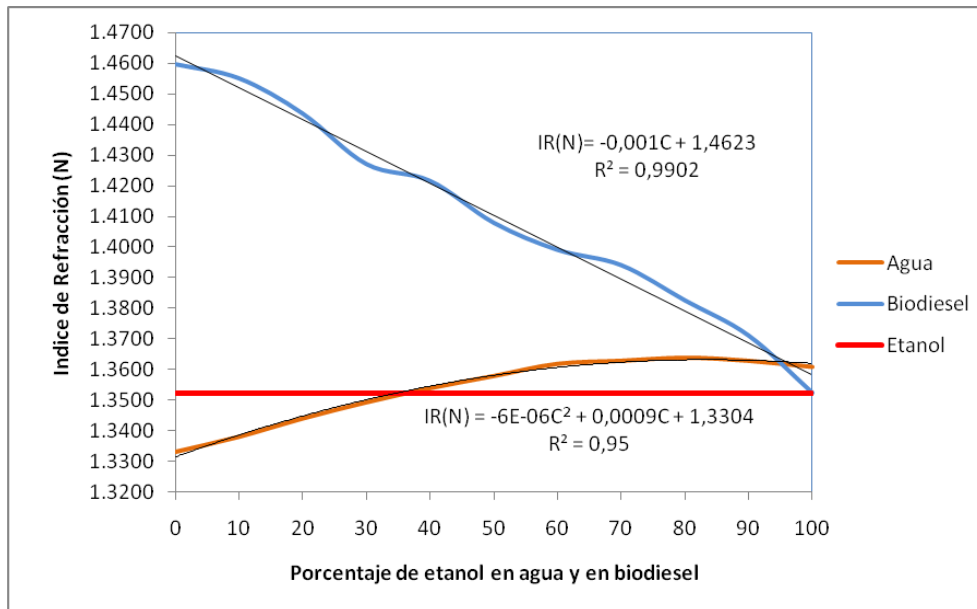
## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Concluida la parte experimental de la investigación, en la figura dieciséis para las soluciones de etanol-agua a la temperatura analizada, se observa que el índice de refracción aumenta conforme se incrementa la composición porcentual en peso, ajustándose la curva a una función polinómica de segundo grado.

En la figura diecisiete, para las soluciones de etanol-biodiesel a la temperatura analizada, el índice de refracción disminuye conforme aumenta la concentración porcentual en peso, ajustándose a una función lineal, lo cual muestra una relación inversamente proporcional entre la concentración porcentual en peso y el índice de refracción. (Conclusión 1).

Para la figura treinta y uno, para el sistema etanol-biodiesel-agua, el parámetro de monitoreo mediante refractometría (índice de refracción) para las soluciones binarias etanol-agua presenta una sensibilidad notable y para las soluciones etanol-biodiesel el monitoreo presenta sensibilidad media, por lo que la sensibilidad del refractómetro disminuye. Esto indica que el índice de refracción es más sensible la variación en biodiesel que en agua en una relación 83:1.

Figura 31. **Sensibilidad del parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias etanol-agua y etanol-biodiesel**



Fuente: resultados, figuras 16 y 17.

Los sistemas ternarios trabajados anteriormente han dado distintas respuestas sobre el grado de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción) medido con el refractómetro. Se hace una comparación en la siguiente tabla, donde se observa que las soluciones que presentan mayor sensibilidad son las preparadas con agua, ya que éstas poseen mayor afinidad entre sus moléculas por su naturaleza polar, siendo la solución de glicerol-agua la que presentó mayor sensibilidad en la medición del índice de refracción, debido a su naturaleza altamente polar por sus enlaces de hidrógeno.

Tabla XIII. **Comparación del grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción) para los sistemas ternarios de trabajos de graduación estudiados anteriormente**

$\Delta IR$	Acetona / agua	IPA / agua	Limoneno / etanol	Cardamomo / benceno	Glicerol / agua	Metanol / agua	IPA / agua	Etanol / agua
Acetona / hexano	++ +							
IPA / hexano		+ +						
Limoneno / hexano			-- -					
Cardamomo / benceno				-- ++				
Glicerol / biodiesel					+++ ---			
Metanol / biodiesel						++ +		
IPA / biodiesel							+ ++	
Etanol / biodiesel								+ ++

+++	Sensibilidad alta	---	Sin sensibilidad
++	Sensibilidad media	--	Sensibilidad muy baja
+	Sensibilidad notable	-	Sensibilidad baja

Fuente: referencia bibliográfica No. 1.

En base a los objetivos 3 y 4, se elaboraron las curvas de correlación para la densidad en función de la composición porcentual en peso para cada



serie de soluciones de etanol-agua y etanol-biodiesel (figuras 18 y 19, sección de resultados) a la temperatura analizada.

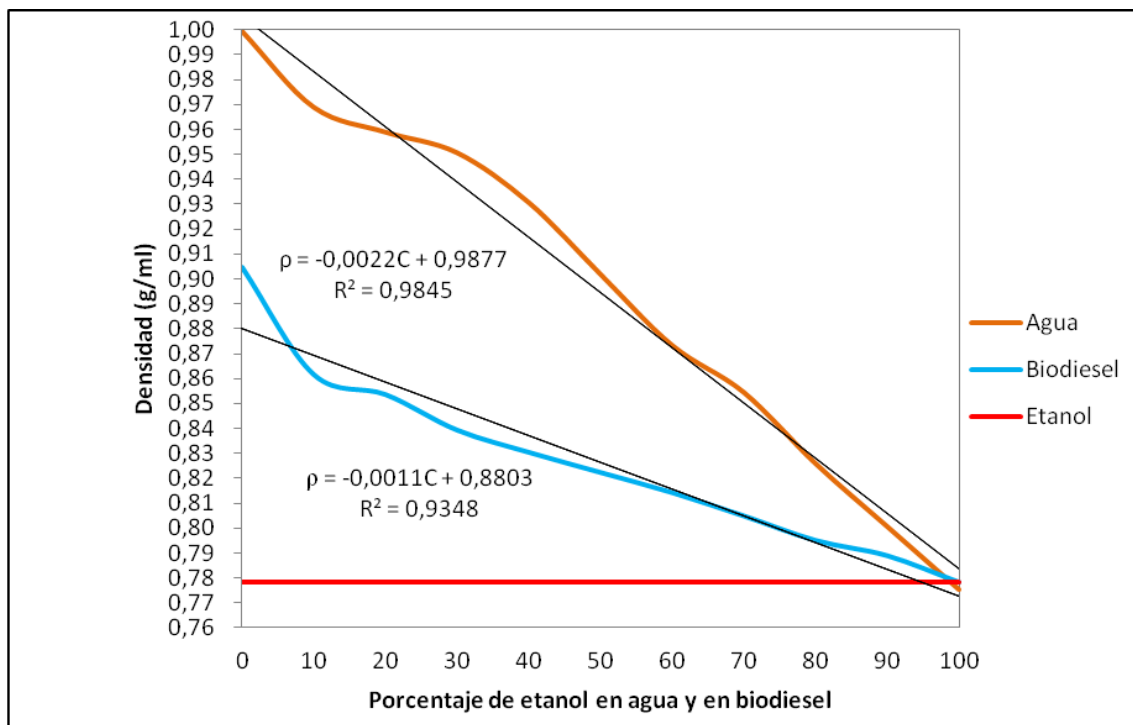
Se determinó el valor de las densidades de las soluciones de etanol-agua y etanol-biodiesel, con los datos de los pesos de las soluciones respectivas, por medio del método de picnometría, las cuales sirvieron para la obtención de las concentraciones reales de porcentaje en peso de las soluciones antes mencionadas.

Para la figura treinta y dos, para el sistema etanol-biodiesel-agua, el parámetro de monitoreo de la densidad para las soluciones binarias etanol-agua y para las soluciones etanol-biodiesel, se observa que la variación de la densidad disminuye, indicando así que la densidad es mas variable en agua que en biodiesel en una relación 1:2.

Se puede observar que en las figuras dieciocho y diecinueve, para las soluciones binarias etanol-agua y etanol-biodiesel respectivamente, la densidad disminuye al incrementarse la composición porcentual en peso de etanol en dichas soluciones, ajustándose la ambas figuras en una función polinómica de segundo grado, mostrándose en cada caso una relación inversamente proporcional entre la concentración y la densidad. (Conclusión 2).

A fin de cumplir con los objetivos 5 y 6, la distribución de los datos experimentales de equilibrio líquido-líquido obtenidos para el sistema etanol-biodiesel-agua, se determinó a partir de soluciones binarias de etanol-agua tituladas con biodiesel y soluciones binarias de etanol-biodiesel tituladas con agua, hasta la formación de dos fases mediante el uso del programa TriDraw 4.5 (figuras 20 y 21 de la sección de resultados, respectivamente).

Figura 32. **Parámetro de monitoreo de la densidad para las soluciones binarias etanol-agua y etanol-biodiesel**



Fuente: resultados, figuras 18 y 19.

A partir de los datos obtenidos experimentalmente del volumen adicionado en la titulación de las distintas soluciones, se determinó la composición porcentual de las mezclas ternarias, realizando con estos datos la representación de la curva binodal del sistema a la temperatura analizada en base a las correlaciones de índice de refracción con respecto al porcentaje de etanol.

En las figuras veinte y veintiuno, se observa la alta afinidad molecular del etanol en agua así como también en el biodiesel, ya que abarca la solubilidad casi en toda proporción.

La figura veintidos muestra la curva de equilibrio de inmiscibilidad del sistema ternario etanol-biodiesel-agua, la cual se realizó uniendo las figuras veinte y veintiuno, observando que el sistema etanol-biodiesel-agua a la temperatura analizada pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo I (objetivo 7) según la clasificación de Treybal, por lo que se acepta la hipótesis nula, en donde hay formación de un par de líquidos parcialmente miscibles, esto debido a la afinidad del etanol con ambos solventes: agua y biodiesel. (Conclusiones 3 y 4).

A partir de la curva de equilibrio de inmiscibilidad del sistema ternario etanol-biodiesel-agua tipo I, se procedió a determinar el punto de pliegue a la temperatura analizada, lo cual se llevó a cabo al seleccionar puntos al azar de mezclas ternarias (etanol-biodiesel-agua) dentro de la curva binodal, los cuales posteriormente se analizaron por medio de refractometría; obteniendo los porcentajes de etanol en la fase de biodiesel así como también en la fase de agua por medio de las correlaciones obtenidas de las figuras dieciséis y diecisiete.

Con los porcentajes de etanol determinados en cada fase, se colocaron los porcentajes de etanol en fase de agua y los datos de porcentaje de etanol en fase de biodiesel, en el sistema etanol-biodiesel-agua (figura 23, sección de resultados). Obteniendo de esta manera las líneas de unión de equilibrio de dicho sistema, debido a la diferencia de solubilidad del etanol en las dos capas, las líneas de enlace que conectan a las soluciones conjugadas no son paralelas a la base de biodiesel-agua, lo cual se puede observar en dicha figura, indicando así que el etanol es más soluble en agua que en biodiesel, llevando esta tendencia a un determinado punto en donde ambas capas están presentes aproximadamente en la misma proporción.

Siendo este punto, el punto de pliegue, permitiendo leer la composición de la mezcla ternaria en ese punto de solubilidad límite (figura 23, sección de resultados).

El punto de pliegue experimental obtenido para el sistema ternario etanol-biodiesel-agua a la temperatura de  $23\pm 1$  grados centígrados fue de 80 por ciento de etanol, 3 por ciento de biodiesel y 17 por ciento de agua (conclusión 5).

Se determinó el coeficiente de distribución para cada punto escogido al azar, los cuales se obtuvieron al dividir el porcentaje de etanol en la fase de biodiesel entre el porcentaje de etanol en la fase acuosa, indicando estos valores que se requiere más disolvente, en este caso agua para llevar a cabo la extracción de etanol en el biodiesel. (Tabla VIII, sección de resultados).

En la figura veinticuatro, se observan las líneas de amarre para las distintas relaciones de biodiesel: agua correspondientes a la especificación de la norma EN 14214 mencionada anteriormente; en ésta curva de equilibrio de inmiscibilidad se demuestra que es factible utilizar las relaciones 20:1, 10:1, 5:1, 2.5:1, 1.25:1 y 1:1 de biodiesel: agua para el lavado de biodiesel y evaluar si el agua es un buen disolvente extractor de etanol en el biodiesel.

En las figuras veinticinco, veintiseis, veintisiete y veintiocho, se observa que el agua no es un excelente extractor de etanol en el biodiesel, ya que al realizar cuatro ciclos de lavado (tabla XIX, sección de resultados) se concluyó que no es suficiente el proceso para la eliminación del etanol (relación 10:1, 5:1, 2.5:1 y 1.25:1) para que se cumpla la especificación establecida según la norma EN 14214, realizando el lavado de biodiesel con agitación constante de 400 revoluciones por minuto durante un período de tiempo de 25 minutos,

obteniendo un porcentaje mínimo de alcohol de 3.1590 por ciento de etanol en biodiesel para las relaciones 2.5:1 y 1.25:1, luego de 3 y 4 ciclos de lavado, respectivamente. (Conclusión 6).

En las gráficas veintinueve y treinta, se muestran curvas de porcentaje de etanol residual en función de número de ciclos de lavado, para las relaciones biodiesel: agua de 2.5:1 y 1.25:1, puesto que con estas se alcanzó el menor porcentaje de etanol. En base a las ecuaciones polinómicas obtenidas para ambas curvas, se encontró el número de ciclos de lavado necesario para cumplir con el porcentaje de 0,2 de etanol especificado en la norma (tabla X, sección de resultados); siendo de 6 y 9, para las relaciones de 2.5:1 y 1.25:1, específicamente. Por lo que se tiene que la relación ideal para lavado de biodiesel con etanol es la de 2.5:1 biodiesel: agua con 6 ciclos de lavado con agitación (Conclusión 7)

Se realizó una evaluación estadística por medio de un análisis estadístico a través del método de ANOVA o análisis de varianza de un tratamiento con varios grupos, para determinar si existe o no variabilidad significativa entre cada una de las propiedades de las muestras analizadas necesarias para la construcción del domo de solubilidad, para el sistema etanol-biodiesel-agua. Se realizaron análisis para las soluciones de etanol-agua tituladas con biodiesel y otro para etanol-biodiesel tituladas con agua.

Para el primer análisis, en el índice de refracción se obtuvo un valor de F calculada de 11366,26 y para el volumen de biodiesel adicionado el F calculada es de 111,79. Para el segundo análisis, se obtuvo un valor de F calculada para el índice de refracción de 8159,15 y para el volumen de agua adicionada un valor de 47,31.

El valor teórico de F para estos análisis es de 2,84. Debido a que F calculada para ambos análisis es mayor que la F teórica, se dice que existe diferencia significativa cuando se varía la concentración en peso de etanol en agua y etanol en biodiesel. (Conclusión 8).

Se realizó un análisis sobre el impacto ambiental que pudo ser generado durante la presente investigación (apéndice 6, tabla L), en el cual los aspectos ambientales tomados en consideración fueron: aire, agua, suelo, biodiversidad, lo visual y social. Durante el desarrollo de ésta investigación se determinó que los aspectos ambientales que influyeron de forma significativa fueron el aire, agua y suelo.

Con respecto al aire, para mitigar el impacto ambiental de los gases que se generaron durante el experimento, se utilizó la campana de extracción de gases; el impacto ambiental provocado por el suministro de agua fue, mínimo ya que se utilizó de manera racional, exclusivamente para cubrir las necesidades de la investigación y además (para los aspectos ambientales agua y suelo) se hizo el manejo adecuado de desechos líquidos para que el impacto no fuera significativo.



## CONCLUSIONES

1. Para las soluciones binarias de etanol en agua, las correlaciones no lineales para la densidad y el índice de refracción en función de la concentración porcentual en peso, representan funciones polinómicas de segundo orden y relación inversamente proporcional y directamente proporcional respectivamente a temperatura ambiente.
2. Para las soluciones binarias de etanol en biodiesel, las correlaciones para la densidad y el índice de refracción en función de la concentración porcentual en peso, ambas representan relación inversamente proporcional y función de segundo orden y lineal respectivamente a temperatura ambiente.
3. El sistema ternario etanol-biodiesel-agua pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo I, según la clasificación de Treybal, siendo aceptada la hipótesis nula.
4. Según las gráficas del sistema ternario etanol-biodiesel-agua, se demuestra que la afinidad del soluto (etanol) es similar en ambos solventes (biodiesel y agua).
5. El punto de pliegue obtenido experimentalmente para el sistema ternario etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente es de 80 por ciento de etanol, 3 por ciento de biodiesel y 17 por ciento de agua.



6. No es posible refinar el contenido de etanol en el biodiesel, puesto que no se determinó una línea de amarre en el sistema que cumpla con la especificación del 0.20 por ciento de alcohol máximo según la norma en 14214, para las relaciones de biodiesel: agua analizadas a cuatro ciclos de lavado durante 25 minutos de agitación constante a 400 revoluciones por minuto.
7. En base a la correlación obtenida a partir de porcentaje de etanol en biodiesel en función de número de ciclos de lavado, se estimó que el número de ciclos de lavado requeridos para refinar etanol de biodiesel es de 6, mediante lavado con agitación con agua a una relación 2.5:1 de biodiesel: agua.
8. Con base al análisis de varianza, ANOVA, existe diferencia significativa cuando se varía la concentración porcentual en peso del etanol en agua y etanol en biodiesel en función del índice de refracción y las soluciones binarias de etanol en agua tituladas con biodiesel y las soluciones binarias de etanol en biodiesel tituladas con agua.

## RECOMENDACIONES

1. Caracterizar el sistema etanol-biodiesel-agua, evaluando la distribución de solubilidad del etanol en agua y biodiesel, utilizando biodiesel elaborado a base de etanol -FAEE- .
2. Realizar un estudio del sistema cuaternario (glicerol/alcohol)-biodiesel-agua con metanol, puesto que es el alcohol más eficiente para el lavado de biodiesel; estableciendo el método para el refinado completo del biodiesel.
3. Caracterizar el sistema ternario metanol-biodiesel-agua (más eficiente), utilizando como técnica de análisis la picnometría en lugar de refractometría, y comparar ambos métodos.
4. Aplicar y evaluar la efectividad de los métodos de lavado de biodiesel conocidos actualmente, determinando cual es el más eficiente.
5. Aplicar el método de lavado de biodiesel con agitación empleando una columna de extracción líquido-líquido, a distintas relaciones de caudal biodiesel: agua.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Acción Directa de Whitman [en línea]. *Biodiesel: producción y aplicaciones*. [en línea]. [citado 20 de marzo de 2010]. Disponible en web: < [http://www. Whitmandirectaction.Org/downloads/documents/biodieselguiede \(español\).pdf](http://www.Whitmandirectaction.Org/downloads/documents/biodieselguiede (español).pdf)>
2. AGUILAR OVANDO, Krista Ivonne; GARCÍA GUERRA, César Alfonso. *Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de cardamomo (Elletaria cardamomun) - (alcohol isopropílico/agua) 50%-benceno en equilibrio a dos temperaturas diferentes y 640 mm Hg*. Trabajo de graduación de Ing. Química., Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006. 94 p.
3. AMADO RODAS, Marisol; GARCÍA GUERRA, César Alfonso. *Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de terpenos del fruto de naranja (limoneno) – etanol - hexano en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 86 p.
4. AMÉZQUITA MALDONADO, Marcos David; GARCÍA PRADO, Romel Alaric. *Potencial que tiene Guatemala para producir biodiesel*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 92 p.

5. Comisión Económica de Naciones Unidas para América Latina y el Caribe – *Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras*. [en línea]. [citado 20 de marzo de 2010]. Disponible en web: :<<http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791 -pdf>>
6. CORDERO LÓPEZ, Jorge Alejandro; VILLACINDA MALDONADO, Julio. *Evaluación de las propiedades físico-químicas del biodiesel obtenido a partir de aceite de palma y etanol, como combustible alternativo del diesel 2D*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003. 98 p.
7. DÍAZ BORRÁS, Andrés José; PÉREZ, Mario Alfonso. *Utilización del biodiesel como combustible alternativo para motores de combustión interna en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 87 p.
8. HERNÁNDEZ CASTELLANOS, María Gabriela; GARCÍA GUERRA, César Alfonso. *Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario Glicerol-Biodiesel-Agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mmHg*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009. 123 p.
9. LAIDLER, Keith; MEISER, John. *Fisicoquímica*. 2ª ed. México: Continental, 1998. 1031 p.

10. LÓPEZ VELÁSQUEZ, Olinda Margarita; GARCÍA GUERRA, César Alfonso. *Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario etanol-hexano-agua a dos temperaturas diferentes*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003. 145 p.
11. PAJARITO ANGEL, Marco Vinicio; GARCÍA GUERRA, César Alfonso. *Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario isopropanol-hexano-agua en equilibrio líquido de inmiscibilidad, a tres temperaturas y a 640 mm de Hg*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003. 102 p.
12. PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*, Tomo III. México: McGraw-Hill, 1993.
13. *Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel* [en línea]. [citado 20 de marzo de 2010]. Disponible en web: <  
<http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>>
14. TREYBAL, Robert E. *Liquid extraction*. 2ª ed. México: McGraw-Hill, 1963. 1542 p.
15. -----.*Operaciones de transferencia de masa*. 2ª ed. México: McGraw-Hill, 2000. 1390 p
16. Universidad Autónoma de Madrid. *Extracción líquido-líquido*. [en línea]

[citado 20 de marzo de 2010] .[http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionI/ExtaccLiqLiq2006.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionI/ExtaccLiqLiq2006.pdf).

## **APÉNDICES**





## DATOS ORIGINALES

Tabla XIV. **Pesos de las soluciones de etanol-agua, obtenidos a temperatura ambiente**

<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	<b>Pesos de las soluciones (g)</b>		
	<b>Corrida 1</b>	<b>Corrida 2</b>	<b>Corrida 3</b>
10	54,704	54,684	55,206
20	54,610	54,927	54,310
30	54,442	54,220	54,563
40	54,219	53,953	53,554
50	53,208	53,153	53,206
60	52,350	52,765	52,312
70	52,303	52,075	51,633
80	51,047	51,620	51,202
90	50,266	51,027	50,680
100	50,266	49,764	50,046

Fuente: elaboración propia

Tabla XV. **Pesos de las soluciones de etanol-biodiesel, obtenidos a temperatura ambiente**

<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	<b>Pesos de las soluciones (g)</b>		
	<b>Corrida 1</b>	<b>Corrida 2</b>	<b>Corrida 3</b>
10	37,116	37,118	37,116
20	37,026	37,039	37,038
30	36,895	36,883	36,883
40	36,788	36,802	36,796
50	36,714	36,710	36,712
60	36,630	36,628	36,628
70	36,534	36,531	36,532
80	36,424	36,434	36,435
90	36,367	36,368	36,369
100	36,258	36,260	36,257

Fuente: elaboración propia

Tabla XVI. **Valores de los índices de refracción, obtenidos para las soluciones de etanol-agua a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Índices de refracción (N)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	1,3330	1,3330	1,3330
10	1,3380	1,3380	1,3380
20	1,3440	1,3440	1,3440
30	1,3490	1,3500	1,3490
40	1,3540	1,3540	1,3540
50	1,3580	1,3580	1,3580
60	1,3620	1,3620	1,3620
70	1,3630	1,3630	1,3630
80	1,3640	1,3640	1,3640
90	1,3630	1,3630	1,3630
100	1,3610	1,3610	1,3610

Fuente: elaboración propia

Tabla XVII. **Valores de los índices de refracción, obtenidos para las soluciones de etanol-biodiesel a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Índices de refracción (N)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	1,4596	1,4596	1,4596
10	1,4550	1,4550	1,4550
20	1,4435	1,4435	1,4435
30	1,4270	1,4270	1,4270
40	1,4215	1,4215	1,4215
50	1,4075	1,4075	1,4085
60	1,3990	1,3990	1,3990
70	1,3940	1,3940	1,3940
80	1,3825	1,3825	1,3825
90	1,3710	1,3710	1,3710
100	1.3500	1.3535	1.3535

Fuente: elaboración propia

Tabla XVIII. **Datos de los volúmenes de biodiesel adicionados para titular alícuotas de 3 mililitros de las soluciones de etanol-agua a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (mL)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	0,040	0,030	0,040
10	0,040	0,050	0,050
20	0,060	0,060	0,050
30	0,070	0,060	0,060
40	0,080	0,080	0,070
50	0,090	0,080	0,090
60	0,100	0,090	0,100
70	0,110	0,110	0,110
80	0,120	0,130	0,120
90	0,150	0,150	0,140

Fuente: elaboración propia

Tabla XIX. **Datos de los volúmenes de agua adicionados para titular alícuotas de 3 mililitros de las soluciones de etanol-biodiesel a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de agua (mL)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	0,070	0,080	0,090
10	0,070	0,070	0,070
20	0,050	0,070	0,050
30	0,040	0,040	0,040
40	0,040	0,040	0,040
60	0,030	0,030	0,030
70	0,030	0,030	0,030
80	0,020	0,020	0,010
90	0,010	0,020	0,010

Fuente: elaboración propia

Tabla XX. **Índices de refracción obtenidos para cada par de soluciones conjugadas (fase biodiesel y fase agua), obtenidas para cada mezcla ternaria producida a temperatura ambiente**

Muestra	Agua (%)	Biodiesel (%)	Etanol (%)	Fase	Índices de refracción		
					Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
1	10	25	65	Biodiesel	1,458	1,458	1,458
				Agua	1,341	1,341	1,341
2	10	40	50	Biodiesel	1,456	1,456	1,456
				Agua	1,340	1,340	1,339
3	10	80	10	Biodiesel	1,458	1,458	1,458
				Agua	1,345	1,345	1,345
4	20	20	60	Biodiesel	1,459	1,459	1,459
				Agua	1,346	1,348	1,346
5	20	60	20	Biodiesel	1,455	1,455	1,455
				Agua	1,346	1,346	1,346
6	30	30	40	Biodiesel	1,454	1,455	1,454
				Agua	1,357	1,357	1,357
7	60	30	10	Biodiesel	1,459	1,458	1,458
				Agua	1,361	1,361	1,361
8	70	25	5	Biodiesel	1,458	1,458	1,458
				Agua	1,370	1,370	1,371

Fuente: elaboración propia

Tabla XXI. **Índices de refracción obtenidos para las distintas relaciones biodiesel: agua para una muestra de 50 mililitros de biodiesel con 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto y durante un tiempo de 25 minutos a temperatura ambiente**

Relación biodiesel:agua	Volumen de agua (mL)	Índice de refracción fase biodiesel			Índice de refracción fase agua		
		1	2	3	1	2	3
20:01	2,5	1,4440	1,4440	1,4440	1,3635	1,3650	1,3635
10:01	3,33	1,4550	1,4550	1,4550	1,3590	1,3595	1,3595
05:01	5	1,4566	1,4566	1,4566	1,3555	1,3560	1,3560
2.5:1	10	1,4566	1,4566	1,4566	1,3480	1,3480	1,3480
1.25:1	20	1,4575	1,4575	1,4575	1,3435	1,3435	1,3435
01:01	50	1,4575	1,4580	1,4580	1,3405	1,3410	1,3410

Fuente: elaboración propia

Tabla XXII. Índices de refracción obtenidos para los distintos ciclos de lavado de biodiesel de las relaciones biodiesel: agua para una muestra de 50 mililitros de biodiesel con 10 por ciento de etanol, con agitación constante a 400 revoluciones por minuto y durante un tiempo de 25 minutos a temperatura ambiente

Relación biodiesel:agua	Ciclos	Índice de refracción fase biodiesel			Índice de refracción fase agua		
		Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
10:1	1	1,4550	1,4550	1,4550	1,3590	1,3595	1,3595
	2	1,4460	1,4460	1,4460	1,3525	1,3525	1,3525
	3	1,4480	1,4475	1,4480	1,3475	1,3475	1,3480
5:1	1	1,4566	1,4566	1,4566	1,3555	1,3560	1,3560
	2	1,4495	1,4495	1,4490	1,3460	1,3460	1,3455
	3	1,4495	1,4495	1,4495	1,3405	1,3405	1,3410
2,5:1	1	1,4490	1,4490	1,4490	1,3480	1,3480	1,3480
	2	1,4495	1,4495	1,4495	1,3430	1,3430	1,3430
	3	1,4495	1,4495	1,4495	1,3370	1,3370	1,3370
1,25:1	1	1,4470	1,4470	1,4470	1,3365	1,3365	1,3365
	2	1,4470	1,4470	1,4475	1,3360	1,3360	1,3360
	3	1,4570	1,4570	1,4570	1,3355	1,3355	1,3355

Fuente: elaboración propia





## MUESTRA DE CÁLCULO

- Cálculo de la media aritmética

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

Donde

$\bar{X}$  : media aritmética

$X_i$  : dato de la  $i$ -ésima observación

$N$  : número de observación

Cálculo de la media aritmética de los pesos de las soluciones binarias de etanol-agua al 10 por ciento (peso de solución + peso del picnómetro) a temperatura ambiente

$$\bar{X} = \frac{54,704\text{g} + 54,684\text{g} + 55,206\text{g}}{3} = 54,865\text{g}$$

- Cálculo de la media aritmética de los índices de refracción medidos para soluciones binarias de etanol-agua al 10 por ciento a temperatura ambiente

$$\bar{X} = \frac{1,3380 + 1,3380 + 1,3380}{3} = 1,3380$$

- Cálculo de la media aritmética de los volúmenes de biodiesel adicionados a la solución binaria de etanol-agua al 10 por ciento a temperatura ambiente

$$\bar{X} = \frac{0,040\text{ml} + 0,050\text{ml} + 0,050\text{ml}}{3} = 0,0467\text{ml}$$

Los resultados para las demás corridas de la media aritmética de los pesos de las soluciones binarias, índice de refracción y volúmenes de adición de los solventes se calcularon de igual forma y se presentan en la sección de datos calculados.

- Cálculo de las densidades de las soluciones

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

Donde:

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

$P_1$ : peso del picnómetro (g)

$P_2$ : peso de la solución, más el peso inicial del picnómetro (g)

$V_1$ : volumen del picnómetro (25 mL)

- Cálculo de la densidad de la solución binaria etanol-agua al 10 por ciento a temperatura ambiente

$$\rho = \frac{(54,865\text{g} - 30,639\text{g})}{25\text{ml}} = 0,9690\text{g/ml}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las soluciones binarias etanol-agua y etanol-biodiesel a temperatura ambiente, se presentan en la sección de datos calculados.

- Cálculo de las concentraciones reales de porcentaje en peso de las soluciones

$$C = \left( \frac{\rho_{\text{ETA}} V_{\text{sol}} X}{\rho_{\text{sol}} V_{\text{sol}}} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

$\rho_{\text{eta}}$ : densidad del etanol a la temperatura analizada (g/mL)

$V_{\text{sol}}$ : volumen de la solución preparada (50 mL)

$\rho_{\text{sol}}$ : densidad de la solución (g/mL)

x: fracción volumen del etanol en la solución (% en peso nominal)

- Cálculo de la concentración real de la solución binaria etanol-agua al 10 por ciento a temperatura ambiente

$$C = \left( \frac{0,7755\text{g/ml} * 50\text{ml} * 0,10}{0,9690\text{g/ml} * 50\text{ml}} \right) * 100 = 8,003\%$$

Los resultados para las siguientes corridas de las soluciones binarias etanol-agua y etanol-biodiesel a temperatura ambiente, se presentan en la sección de datos calculados.

- Determinación de las curvas de correlación de los parámetros índice de refracción vrs. concentración

Se determinaron ploteando los índices de refracción contra las concentraciones de etanol en los solventes utilizados por medio de una hoja de cálculo de Excel, con su respectiva ecuación matemática y coeficiente de correlación.

- La ecuación de correlación del índice de refracción contra concentración (porcentaje en peso) con su coeficiente de correlación, para las soluciones de etanol-biodiesel a temperatura ambiente

$$N = 0.001C + 1.4623$$

$$R^2 = 0.9902$$

- La ecuación de correlación del índice de refracción contra concentración (porcentaje en peso) con su coeficiente de correlación, para las soluciones de etanol-agua a temperatura ambiente

$$N = -5E - 06C^2 + 0.0008C + 1.3315$$

$$R^2 = 0.9932$$

Donde:

N: índice de refracción

C: concentración (% en peso)

Los resultados de las siguientes corridas de las ecuaciones de correlación y sus respectivos coeficientes de correlación para las soluciones binarias etanol-biodiesel y etanol-agua, se presentan en la sección de datos calculados.

- Cálculo de la composición porcentual de las mezclas ternarias para graficar la curva binodal.

$$M_t = V_2\rho_2 + V_1\rho_{sol} \quad (4)$$

$$\% \text{ Soluto} = \frac{xV_1\rho_{ETA}}{M_t} \quad (5)$$

$$\% \text{ Solvente adicionado} = \frac{V_2\rho_2}{M_t} \quad (6)$$

$$\% \text{ Solvente 1} = \frac{(V_1\rho_{sol} - xV_1\rho_{ETA})}{M_t} \quad (7)$$

Donde:

$M_t$ : masa total de la mezcla ternaria (g)

$V_2$ : volumen del solvente de adición (biodiesel o agua) (mL)

$\rho_2$ : densidad del solvente de adición (g/mL)

$V_1$ : volumen de alícuota de la solución a titular (mL)

$\rho_{sol}$ : densidad de la solución a titular (g/mL)

$x$ : fracción volumen de la solución (% en peso nominal)

$\rho_{eta}$ : densidad del soluto (etanol) (g/mL)

- Cálculo de la composición porcentual en peso de la mezcla ternaria formada, para la solución etanol-biodiesel al 10 por ciento, titulada con agua, a temperatura ambiente

$$M_t = (0,21\text{ml} * 0,9082\text{g/ml}) + (3\text{ml} * 0,9690\text{g/ml}) = 3,0978\text{g}$$

$$\% \text{ ETANOL} = \frac{0,10 * 3\text{ml} * 0,9690\text{g/ml}}{3,0978\text{g}} * 100 = 7,51\%$$

$$\% \text{ BIODIESEL} = \frac{0,21\text{ml} * 0,9082\text{g/ml}}{3,0978\text{g}} * 100 = 6,16\%$$

$$\% \text{ AGUA} = \frac{(3\text{ml} * 0,9082\text{g/ml}) - (0,10 * 3\text{ml} * 0,9690\text{g/ml})}{3,0978\text{g}} * 100 = 86,33\%$$

- Cálculo de la composición porcentual en peso de la mezcla ternaria formada, para la solución etanol-agua al 10 por ciento, titulada con biodiesel, a temperatura ambiente

$$M_t = (0,0700\text{ml} * 0,9995\text{g/ml}) + (3\text{ml} * 0,8615\text{g/ml}) = 2,6543\text{g}$$

$$\% \text{ ETANOL} = \frac{0,1 * 3\text{ml} * 0,7781\text{g/ml}}{2,6543\text{g}} * 100 = 8,79\%$$

$$\% \text{ AGUA} = \frac{0,0700\text{ml} * 0,9995\text{g/ml}}{2,6543\text{g}} * 100 = 2,64\%$$

$$\% \text{ BIODIESEL} = \frac{(3\text{ml} * 0,8615\text{g/ml}) - (0,1 * 3\text{ml} * 0,7781\text{g/ml})}{2,6543\text{g}} * 100 = 88,57\%$$

Los resultados de las siguientes corridas de las composiciones porcentuales en peso de las mezclas ternarias formadas con cada solución se presentan en la sección de datos calculados.

- Obtención de la curva binodal

Se graficaron las composiciones porcentuales en peso, para las mezclas ternarias por medio del software Tridraw 4.5, con el cual se obtuvo la distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad en equilibrio representado en un diagrama triangular.

- Cálculo de la composición porcentual en peso de las capas conjugadas formadas a partir de mezclas ternarias, luego de agitar y reposar dichas mezclas.
  - a. Fase biodiesel: al sustituir el índice de refracción leído para dicha fase, se sustituye el valor en la ecuación de correlación para soluciones binarias etanol-biodiesel, a la temperatura analizada, así se obtiene la composición porcentual en peso.
  - b. Fase agua: al sustituir el índice de refracción leído para esta fase, se sustituye el valor en la ecuación de correlación para soluciones binarias etanol-agua, a la temperatura analizada, así se obtiene la composición porcentual en peso.
- Cálculo de la composición de la fase de biodiesel formada para la mezcla ternaria (10 por ciento agua, 25 por ciento biodiesel, 65 por ciento etanol) a temperatura ambiente

$$C = 1462 - 1000(1,444 - 0)$$

Realizando la operación, se obtiene:

$$C = 18,00 \%$$

- Cálculo de la composición de la fase de agua formada para la mezcla ternaria (10 por ciento agua, 25 por ciento biodiesel, 65 por ciento etanol) a temperatura ambiente

$$1.3640 = -5E - 06C^2 + 0.0008C + 1.3315$$



Despejando C de la ecuación anterior, se obtiene:

$$C = 48,70\%$$

Los resultados de las siguientes muestras de las composiciones porcentuales en peso de las mezclas ternarias se presentan en la sección de datos calculados.

- Obtención de las líneas de unión

Se graficaron los datos de las composiciones porcentuales en peso, obtenidas según el inciso anterior para cada fase en el diagrama triangular (inciso 6) y posteriormente, se unieron dichos puntos (para cada par de capas conjugadas) mediante líneas de unión.

- Obtención del punto de pliegue

Mediante el método gráfico, se procede a la obtención de la curva de distribución, graficando los datos de porcentaje de etanol en fase biodiesel y los porcentajes de etanol en fase agua, de los puntos obtenidos al azar en el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, para obtener las líneas de unión de equilibrio, las cuales indican el punto de pliegue en el diagrama debido a su disminución a medida que las soluciones de los dos líquidos se hacen casi iguales, por lo que la línea de enlace se acorta y por último se reduce hasta un punto. El punto de pliegue será el punto que queda libre de línea de unión en el diagrama triangular (porcentaje de etanol en extracto = porcentaje de etanol en refinado). Esto también se puede observar en el diagrama líquido vapor del sistema etanol-agua.

- Cálculo del coeficiente de distribución

$$k = \frac{y}{x} \quad (8)$$

Donde:

k: coeficiente de distribución

y: concentración al equilibrio de etanol en fase orgánica

x: concentración al equilibrio de etanol en fase acuosa

- Cálculo del coeficiente de distribución para los datos obtenidos de la mezcla (10 por ciento agua, 25 por ciento biodiesel, 65 por ciento etanol) a temperatura ambiente

$$k = \frac{4,0000 \%}{79,7079 \%} = 0,0502$$

Los resultados de las siguientes corridas de las soluciones ternarias, se presentan en la sección de datos calculados.



## DATOS CALCULADOS

Tabla XXIII. **Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de etanol-agua a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Peso del picnómetro (g)		Índice de refracción (N)		Volumen de biodiesel adicionado (mL)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
0	55,6267	0,0363	1,3330	0,0000	---	---
10	54,8647	0,4827	1,3380	0,0000	0,0367	0,0094
20	54,6157	0,4403	1,3440	0,0000	0,0467	0,0094
30	54,4083	0,2663	1,3493	0,0009	0,0567	0,0094
40	53,9087	0,5016	1,3540	0,0000	0,0633	0,0094
50	53,1890	0,0509	1,3580	0,0000	0,0767	0,0094
60	52,4757	0,4092	1,3620	0,0000	0,0867	0,0094
70	52,0037	0,5242	1,3630	0,0000	0,0967	0,0094
80	51,2897	0,4672	1,3640	0,0000	0,1100	0,0000
90	50,6577	0,5539	1,3630	0,0000	0,1233	0,0094
100	50,0253	0,3696	1,3610	0,0000	---	---

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXIV. **Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de Titulación promedio, para las soluciones de etanol-biodiesel a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Peso del picnómetro (g)		Índice de refracción (N)		Volumen de agua adicionado (mL)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
0	37,5603	0,0033	1,4596	0,0000	---	---
10	37,1167	0,0019	1,4550	0,0000	0,0700	0,0033
20	37,0343	0,0118	1,4435	0,0000	0,0567	0,0019
30	36,8870	0,0113	1,4270	0,0000	0,0400	0,0118
40	36,7953	0,0104	1,4215	0,0000	0,0400	0,0113
50	36,7120	0,0028	1,4078	0,0009	0,0400	0,0104
60	36,6287	0,0019	1,3990	0,0000	0,0300	0,0028
70	36,5323	0,0024	1,3940	0,0000	0,0300	0,0019
80	36,4310	0,0099	1,3825	0,0000	0,0167	0,0024
90	36,3680	0,0014	1,3710	0,0000	0,0133	0,0099
100	36,2583	0,0024	1,3523	0,0033	---	---

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXV. **Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de etanol-agua a temperatura ambiente**

<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>
0	0,9995
10	0,9690
20	0,9591
30	0,9508
40	0,9308
50	0,9020
60	0,8735
70	0,8546
80	0,8260
90	0,8007
100	0,7755

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXVI. **Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de etanol-biodiesel a temperatura ambiente**

<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>
0	0,9045
10	0,8615
20	0,8535
30	0,8392
40	0,8303
50	0,8222
60	0,8141
70	0,8047
80	0,7949
90	0,7888
100	0,7781

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXVII. **Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de etanol-agua a temperatura ambiente**

<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	<b>Concentración real (%)</b>
10	8,0029
20	16,1720
30	24,4696
40	33,3266
50	42,9878
60	53,2705
70	63,5219
80	75,1065
90	87,1624

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXVIII. **Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de etanol-biodiesel a temperatura ambiente**

<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	<b>Concentración real (%)</b>
10	9,0324
20	18,2340
30	27,8172
40	37,4871
50	47,3199
60	57,3481
70	67,6835
80	78,3098
90	88,7815

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXIX. **Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de etanol-agua a temperatura ambiente, necesarios para graficar la curva binodal**

<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	<b>Volumen de biodiesel (mL)</b>	<b>Masa total (g)</b>	<b>% Etanol</b>	<b>% Biodiesel</b>	<b>% Agua</b>
0	0,0900	3,0803	0,0000	2,6536	97,3464
10	0,2100	3,0978	7,5102	6,1567	86,3331
20	0,2300	3,0861	15,0774	6,7686	78,1540
30	0,4000	3,2156	21,7051	11,2974	66,9974
40	0,4500	3,2011	29,0717	12,7674	58,1609
50	0,5500	3,2055	36,2891	15,5829	48,1281
60	0,5700	3,1381	44,4827	16,4966	39,0207
70	0,6000	3,1087	52,3872	17,5290	30,0838
80	0,6400	3,0593	60,8369	18,9992	20,1639
90	0,6500	2,9926	69,9683	19,7265	10,3052

Fuente: apéndice 1 y 2.



Tabla XXX. **Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de etanol-biodiesel a temperatura ambiente, necesarios para graficar la curva binodal**

<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	<b>Volumen de agua (mL)</b>	<b>Masa total (g)</b>	<b>% Etanol</b>	<b>% Biodiesel</b>	<b>% Agua</b>
0	0,0800	2,7935	0,0000	97,1376	2,8624
10	0,0700	2,6543	8,7943	88,5697	2,6359
20	0,0567	2,6170	17,8394	79,9963	2,1642
30	0,0400	2,5575	27,3823	71,0544	1,5633
40	0,0400	2,5308	36,8949	61,5254	1,5798
50	0,0400	2,5065	46,5651	51,8398	1,5951
60	0,0300	2,4722	56,6525	42,1346	1,2129
70	0,0300	2,4442	66,8532	31,9200	1,2268
80	0,0167	2,4013	77,7665	21,5397	0,6937
90	0,0133	2,3797	88,2843	11,1556	0,5600

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXXI. **Índices de refracción promedio de las fases biodiesel y fase agua, para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a temperatura ambiente**

Muestra	Agua	Biodiesel	Etanol	Fase	Media	Desviación
	(%)	(%)	(%)			
1	70	25	5	Biodiesel	1,4580	0,0000
				Agua	1,3405	0,0001
2	30	30	40	Biodiesel	1,4558	0,0005
				Agua	1,3393	0,0005
3	20	60	20	Biodiesel	1,4575	0,0000
				Agua	1,3447	0,0005
4	60	30	10	Biodiesel	1,4590	0,0000
				Agua	1,3465	0,0014
5	10	40	50	Biodiesel	1,4550	0,0000
				Agua	1,3455	0,0000
6	10	80	10	Biodiesel	1,4542	0,0005
				Agua	1,3570	0,0000
7	10	25	65	Biodiesel	1,4582	0,0005
				Agua	1,3605	0,0000
8	20	20	60	Biodiesel	1,4580	0,0000
				Agua	1,3702	0,0005

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXXII. **Datos de las concentraciones de los pares de equilibrio (soluciones conjugadas) para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada mezcla ternaria, a temperatura ambiente**

Muestra	Agua (%)	Biodiesel (%)	Etanol (%)	Concentracion de etanol (%)	
				Fase biodiesel	Fase agua
1	70	25	5	7,8333	81,1994
2	30	30	40	7,0000	79,7079
3	20	60	20	6,1667	74,3416
4	60	30	10	4,5000	73,2121
5	10	40	50	4,0000	71,8332
6	10	80	10	4,0000	55,3173
7	10	25	65	3,8333	48,5799
8	20	20	60	3,0000	20,6559

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXXIII. **Datos del coeficiente de distribución para las mezclas ternarias etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente**

<b>Muestra</b>	<b>Agua (%)</b>	<b>Biodiesel (%)</b>	<b>Etanol (%)</b>	<b>K</b>
1	70	25	5	0,1936
2	30	30	40	0,1416
3	20	60	20	0,0956
4	60	30	10	0,0789
5	10	40	50	0,0759
6	10	80	10	0,0605
7	10	25	65	0,0502
8	20	20	60	0,0418

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXXIV. **Datos de las concentraciones para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada relación biodiesel: agua, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol con agitación constante a 400 revoluciones por minuto y durante un tiempo de 25 minutos a temperatura ambiente**

Relacion biodiesel:agua	Fase agua	Fase biodiesel
	%Etanol	%etanol
20:01	48,6997	18,0000
10:01	38,5180	14,8300
05:01	32,0552	12,5000
2.5:1	19,7290	7,0000
1.25:1	13,5481	5,4000
01:01	10,1122	4,1667

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXXV. **Datos de las concentraciones de etanol en agua para determinar la cantidad de ciclos de lavado, para una muestra de 50 mililitros de biodiesel al 10 por ciento de etanol con agitación constante a 400 revoluciones por minuto y durante un tiempo de 25 minutos a temperatura ambiente**

<b>Relación Biodiesel:Agua</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Etanol en agua (% v/v)</b>	<b>Etanol residual (% v/v)</b>
10:1	1	38,5180	16,0000
	2	26,5142	14,1700
	3	19,2525	7,0000
	4	18,9976	6,6987
5:1	1	32,0552	12,6700
	2	16,6874	12,5000
	3	9,9024	5,4000
	4	8,9652	5,4000
2,5:1	1	19,7300	9,5000
	2	15,0000	8,9000
	3	11,0000	3,1789
	4	8,9416	3,1590
1,25:1	1	13,5481	6,6732
	2	8,9856	4,1240
	3	7,6754	3,1590
	4	7,5321	3,1590

Fuente: apéndice 1 y 2.

Tabla XXXVI. **Número de ciclos de lavado estimados para el sistema ternario etanol-biodiesel-agua, según la especificación de 0.20 por ciento en peso máximo de etanol en biodiesel, según la norma EN 14214, en función de las ecuaciones de regresión obtenidas.**

<b>Relación biodiesel:agua</b>	<b>Etanol en biodiesel (%)</b>	<b>No. de ciclos</b>
2,5:1	0,2	6
1,25:1	0,2	9

Fuente: apéndice 1 y 2.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

El análisis estadístico de la investigación se realizó aplicando el método ANOVA o análisis de varianza, con el cual se determinó si existe o no diferencia significativa entre cada una de las propiedades de las muestras analizadas. Los cálculos se realizaron como lo establece el siguiente procedimiento:

- 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 (partículas) de las mediciones y su media  $X'$  correspondiente, dividida entre  $n$  menos uno, así:

$$V_d = \frac{\sum_i^n ((X_i - X')^2)}{n - 1} \quad (9)$$

Donde:

$\sum$  : sumatoria

$V_d$ : variación dentro de las muestras

$X_i$ : valor de la propiedad media

$X'$ : valor de la media de propiedades

$n$ : número de mediciones

a. Se calcula el valor de la media de la muestras ( $X_m$ ).

b. Se calcula el cuadrado de medias dentro de las muestras ( $CDM_d$ ), con:



$$CDM_d = \frac{\sum_i^h ((V_{di}))}{n} \quad gl = h * (n - 1) \quad (10)$$

Donde:

Vdt: 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 la muestras  $X_m$ , así:

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

Donde:

$V_e$ : variación entre las muestras

$X_i'$ : media de las propiedades de n mediciones

h : número de muestras

$X_m$ : media de las muestras de h mediciones

a. Se calcula el cuadrado de las medias entre las muestras ( $CDM_e$ ), así:

$$CDM_e = V_e * (h - 1) \quad \text{con} \quad gl = (h - 1) \quad (12)$$

b. Se divide el  $CDM_e$  entre el  $CDM_d$ , el cociente forma el valor calculado de la función F de cola, así:

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

c. Se compara el valor de F con el valor de  $F_c$  o valor crítico de F para una prueba de dos colas (Referencia 6), utilizando la distribución F-Fisher ( $\alpha/2$ ) teniendo en cuenta los grados de libertad correspondientes y utilizando una significancia de 5 por ciento ( $\alpha = 0,05$ ).

d. Conclusiones

Si  $F \leq F_c$ : no existe variabilidad significativa.

Si  $F > F_c$ : si existe variabilidad significativa.

e. En la siguiente tabla se resume el método:

Tabla XXXVII. **Resumen del método ANOVA**

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

Fuente: referencia 6.

Tabla XXXVIII. **Análisis de la variación del índice de refracción en soluciones de etanol en agua de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras ( $V_d$ ) y entre las muestras ( $V_e$ ) a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Índice de refracción promedio (N)	Desviación	$V_d$	$V_e$
10	1,3380	0,0000000	0,000000	0,000140
20	1,3440	0,0000000	0,000000	
30	1,3493	0,0009428	0,000000	
40	1,3540	0,0000000	0,000000	
50	1,3580	0,0000000	0,000000	
60	1,3620	0,0000000	0,000000	
70	1,3630	0,0000000	0,000000	
80	1,3640	0,0000000	0,000000	
90	1,3630	0,0000000	7,40E-32	
100	1,3610	0,0000000	0,000000	
<b>Promedio</b>	1,3536	$\sum V_d$	3,33E-07	

Fuente: apéndices 3 y 4.

Tabla XXXIX. **Análisis de la variación del índice de refracción en soluciones de etanol en biodiesel de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras ( $V_d$ ) y entre las muestras ( $V_e$ ) a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Índice de refracción promedio (N)	Desviación	$V_d$	$V_e$
10	1,4550	0,0000	0,000000	0,00133
20	1,4435	0,0000	0,000000	
30	1,4270	0,0000	7,40E-32	
40	1,4215	0,0000	0,000000	
50	1,4078	0,0009	0,000000	
60	1,3990	0,0000	0,000000	
70	1,3940	0,0000	0,000000	
80	1,3825	0,0000	0,000000	
90	1,3710	0,0000	0,000000	
100	1,3523	0,0033	4,08E-06	
<b>Promedio</b>	1,4103	$\sum V_d$	4,42E-06	

Fuente: apéndices 3 y 4.

Tabla XL. **Análisis de la variación del volumen de biodiesel adicionado en soluciones de etanol en agua de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras ( $V_d$ ) y entre las muestras ( $V_e$ ) a temperatura ambiente**

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel promedio (mL)	Desviación	$V_d$	$V_e$
0	0,0367	0,0094	0,00003	0,00124
10	0,0467	0,0094	0,00003	
20	0,0567	0,0094	0,00003	
30	0,0633	0,0094	0,00003	
40	0,0767	0,0094	0,00003	
50	0,0867	0,0094	0,00003	
60	0,0967	0,0094	0,00003	
70	0,1100	0,0000	0,00000	
80	0,1233	0,0094	0,00003	
90	0,1467	0,0094	0,00003	
<b>Promedio</b>	0,0843	$\sum V_d$	0,00003	

Fuente: apéndices 3 y 4.

Tabla XLI. **Análisis de la variación del volumen de agua adicionado en soluciones de etanol en biodiesel de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras ( $V_d$ ) y entre las muestras ( $V_e$ ) a temperatura ambiente**

<b>Concentración Nominal (% en peso)</b>	<b>Volumen de agua promedio (mL)</b>	<b>Desviación</b>	<b><math>V_d</math></b>	<b><math>V_e</math></b>
10	0,0700	0,0000	0,00000	0,00047
20	0,0567	0,0189	0,00013	
30	0,0400	0,0000	0,00000	
40	0,0400	0,0000	0,00000	
50	0,0400	0,0000	0,00000	
60	0,0300	0,0000	0,00000	
70	0,0300	0,0000	0,00000	
80	0,0167	0,0094	0,00000	
90	0,0133	0,0094	0,00003	
100	0,0417	0,0000	0,00003	
<b>Promedio</b>	0,0700	$\sum V_d$	0,00027	

Fuente: apéndices 3 y 4.

Tabla XLII. **Análisis de varianza del índice de refracción en función de soluciones de etanol en agua de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente**

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F <sub>c</sub>
<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	0,000140	9	0,000140	11366,26	2,8400
<b>Repeticiones</b>	1,111E-07	20	3,33E-07		

Fuente: apéndices 3 y 4.

Tabla XLIII. **Análisis de varianza del índice de refracción en función de soluciones de etanol en biodiesel de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente**

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F <sub>c</sub>
<b>Concentración Nominal (% en peso)</b>	0,012012	9	0,00133	8159,148	2,8400
<b>Repeticiones</b>	1,472E-06	20	4,42E-06		

Fuente: apéndices 3 y 4.

Tabla XLIV. **Análisis de varianza del volumen adicionado de biodiesel a soluciones de etanol en agua de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente**

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F <sub>c</sub>
<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	0,001263	9	0,000140	11366,26	2,8400
<b>Repeticiones</b>	0,00010	20	0,00030		

Fuente: apéndices 3 y 4.

Tabla XLV. **Análisis de varianza del volumen adicionado de agua a soluciones de etanol en biodiesel de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema etanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente**

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F <sub>c</sub>
<b>Concentración nominal (% en peso)</b>	0,00421	9	0,00047	47,3125	2,8400
<b>Repeticiones</b>	0,00009	20	0,00027		

Fuente: apéndices 3 y 4.





## ANÁLISIS DE COSTOS PARA EL TRABAJO DE GRADUACIÓN DEL SISTEMA TERNARIO ETANOL-BIODIESEL-AGUA

Tabla XLVI. Costo de reactivos

REACTIVOS	UNIDAD	FUENTE	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Biodiesel	1 galón	Toledo	24,00	2	48,00
Etanol anhidro	1 litro	Química Técnica	135,00	2	270,00
Agua destilada	1 galón	Emb. Mariposa	12,70	2	25,40
<b>TOTAL</b>					<b>343,40</b>

Fuente: elaboración propia

Tabla XLVII. Costo de equipo

<b>EQUIPO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FUENTE</b>	<b>COSTO INICIAL (Q)</b>	<b>DEPRECIACIÓN (Q)</b>	<b>COSTO/ 2 MESES (Q)</b>
Balanza analítica	marca OHAUS, modelo AR1530	KRON	18,393,00	3,678,60	613,10
Plancha de calentamiento con agitación	SYBRON/Thermolyne, SP18425	KRON	3,280,00	656,00	109,33
Refractómetro	marca ABBE, modelo 32200	INSBAL	40,000	8,000,00	1,333,33
Campana de extracción	LABOTEC	INSBAL	36,952,00	7,390,40	1,231,73
<b>TOTAL</b>					<b>3,287,49</b>

Fuente: elaboración propia

Tabla XLVIII . Costo de cristalería

CRISTALERÍA	DESCRIPCIÓN	FUENTE	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Earlenmeyers	250 ml de borosilicato	DILAB	42,56	4	170,24
Pipetas serológicas	1ml	DILAB	16,80	1	16,80
Pipetas serológicas	5 ml	DILAB	16,80	1	16,80
Pipetas serológicas	10 ml	DILAB	18,20	1	18,20
Bureta	25 ml	PROINCA	323,75	2	323,75
Bureta	10 ml de boro clase B	DILAB	411,04	2	822,08
Beakers	50 ml de borosilicato	DILAB	41,44	2	82,88
Beakers	250 ml de borosilicato	DILAB	41,44	2	82,88
Beakers	1000 ml de borosilicato	DILAB	69,72	2	139,44
Ampolla de decantación	250 ml	DILAB	600,21	2	1,200,42
Ampolla de decantación	1000 ml	DILAB	1,440,50	1	1,440,50
Probeta	10 ml	DILAB	37,35	1	37,35
Probeta	25 ml	DILAB	38,64	1	38,64
Probeta	50 ml	DILAB	41,44	1	41,44
Probeta	100 ml	DILAB	51,52	1	51,52
Tubos de ensayo	10 ml	DILAB	1,96	10	19,60
Picnómetro	10 ml	DILAB	602,84	1	602,84
Termómetro	Rango de 0 - 150 °C	DILAB	102,48	1	102,48
<b>TOTAL</b>					<b>5,300,58</b>

Fuente: elaboración propia

Tabla XLIX. **Costo de accesorios**

<b>ACCESORIOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FUENTE</b>	<b>COSTO UNITARIO (Q)</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO TOTAL (Q)</b>
Pizetas de polietileno	125 ml	PROINCA	23,72	1	23,72
Soportes universales	metálicos	DILAB	175,11	1	175,11
Anillos metálicos	de hierro de 7 cm	DILAB	217,56	1	217,56
Agitador magnético	1 mm de diámetro	PROINCA	12,00	2	24,00
<b>TOTAL</b>					<b>440,39</b>

Fuente: elaboración propia

Tabla L. **Costo de energía eléctrica**

<b>ENERGÍA ELÉCTRICA</b>	<b>POTENCIA (WATTS)</b>	<b>CANTIDAD HORAS</b>	<b>kW-h TOTALES</b>	<b>COSTO kW-h (Q)</b>	<b>COSTO TOTAL (Q)</b>
Balanza analítica	6	80	0,48	1,67	0,80
Plancha de calentamiento con agitación	900	80	72	1,67	120,24
Refractómetro	6	40	0,24	1,67	0,40
Campana de extracción	900	10	9	1,67	15,03
<b>TOTAL</b>					<b>136,47</b>

Fuente: elaboración propia

Tabla LI. Costo de materiales auxiliares

OTROS	FUENTE	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Papel parafilm	PROINCA	245,00	1	245,00
Fotocopias	USAC	0,15	200	30,00
CDs	Paiz	2,50	2	5,00
Papel mayordomo	Paiz	12,50	6	75,00
Maskin tape	Paiz	6,75	1	6,75
Guantes de látex	DILAB	48,72	1	48,72
Lapiceros	Paiz	1,00	6	6,00
Tijeras	Paiz	15,70	1	15,70
<b>TOTAL</b>				<b>187,17</b>

Fuente: elaboración propia

Tabla LII. Costos totales de la investigación

RESUMEN	COSTO (Q)
1. Reactivos	343,40
2. Equipo	3,287,49
3. Cristalería	5,300,58
4. Accesorios	440,39
5. Energía eléctrica	136,47
6. Otros	187,17
<b>TOTAL</b>	<b>9,695,5</b>

Fuente: elaboración propia



## IMPACTOS AMBIENTALES QUE PUEDEN SER GENERADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN

Tabla LIII. Impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación

No.	Aspecto ambiental	Impacto ambiental	Tipos de impacto ambiental (de acuerdo con la descripción del cuadro anterior)	Actividades de la investigación donde aplica el impacto ambiental	Manejo ambiental: indica que se hará para evitar el impacto ambiental
1	AIRE	<b>Gases</b>	Gases	Secado de biodiesel	Para mitigar el impacto en aire de los gases a generar se utiliza campana de extracción de gases dentro del laboratorio.
		<b>Ruido</b>	No aplica	No aplica	No aplica, pues no se genera ningún ruido durante la experimentación.
		<b>Vibraciones</b>	No aplica	No aplica	No aplica, pues no se genera ningún tipo de



2	AGUA				vibración.
		<b>Olores</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. No perceptible</li> <li>2. Muy débilmente perceptible</li> <li>3. Débilmente perceptible</li> <li>4. Distinguible</li> <li>5. Fuerte</li> <li>6. Muy fuerte</li> <li>7. Extremadamente fuerte</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavado de biodiesel (4)</li> <li>• Secado de biodiesel (5)</li> <li>• Preparación de soluciones (4)</li> <li>• Medición de índice de refracción y densidad (4)</li> <li>• Titulación de las soluciones (4)</li> </ul>	Realizar los análisis en la medida de lo posible dentro de la campana de extracción.
		<b>Abastecimiento de agua</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Realización de la parte experimental de la investigación</li> <li>2. Lavado de cristalería</li> <li>3. Limpieza</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavado de biodiesel (1, 3)</li> <li>• Secado de biodiesel (1, 3)</li> <li>• Preparación de soluciones (1, 2, 3)</li> <li>• Medición de índices de refracción y densidad (1, 2)</li> <li>• Titulación de soluciones (1, 2)</li> </ul>	El agua se utilizará racionalmente exclusivamente para cubrir las necesidades de la investigación y no afectará a seres humanos ni al ambiente.
	<b>Aguas residuales ordinarias (aguas residuales generadas)</b>	No aplica, porque las aguas residuales están conectadas al drenaje principal.	No aplica pues no se genera ningún Impacto ambiental.	No aplica pues no se genera ningún impacto ambiental.	

		por las actividades domésticas)			
		<b>Aguas residuales especiales (aguas generadas por servicios públicos municipales, actividades de servicios, industriales, agrícolas, pecuarias y hospitalarias)</b>	Si aplica, ya que se generarán aguas residuales provocadas por el manejo de desechos de laboratorio.	Durante todo el proceso de la parte experimental de la investigación.	Se realizará el manejo de desechos adecuado para que el impacto ambiental sea minimizado y por lo tanto no sea significativo.
		<b>Mezcla de las aguas residuales anteriores</b>	No aplica, ya que no se generarán mezclas de las aguas antes mencionadas.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		<b>Agua de lluvia</b>	No aplica	No aplica, pues no se generará ningún Impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún Impacto ambiental.
3	SUELO	<b>Desechos sólidos (basura común)</b>	1. Papel mayordomo 2. Papel parafilm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durante la realización de la parte experimental de la investigación (1, 2)</li> <li>• Secado de la cristalería y limpieza del laboratorio (1)</li> </ul>	Manejo de desechos sólidos dentro del laboratorio.
		<b>Desechos peligrosos</b>	1. Corrosivos	Durante todo el proceso	Manejo de desechos

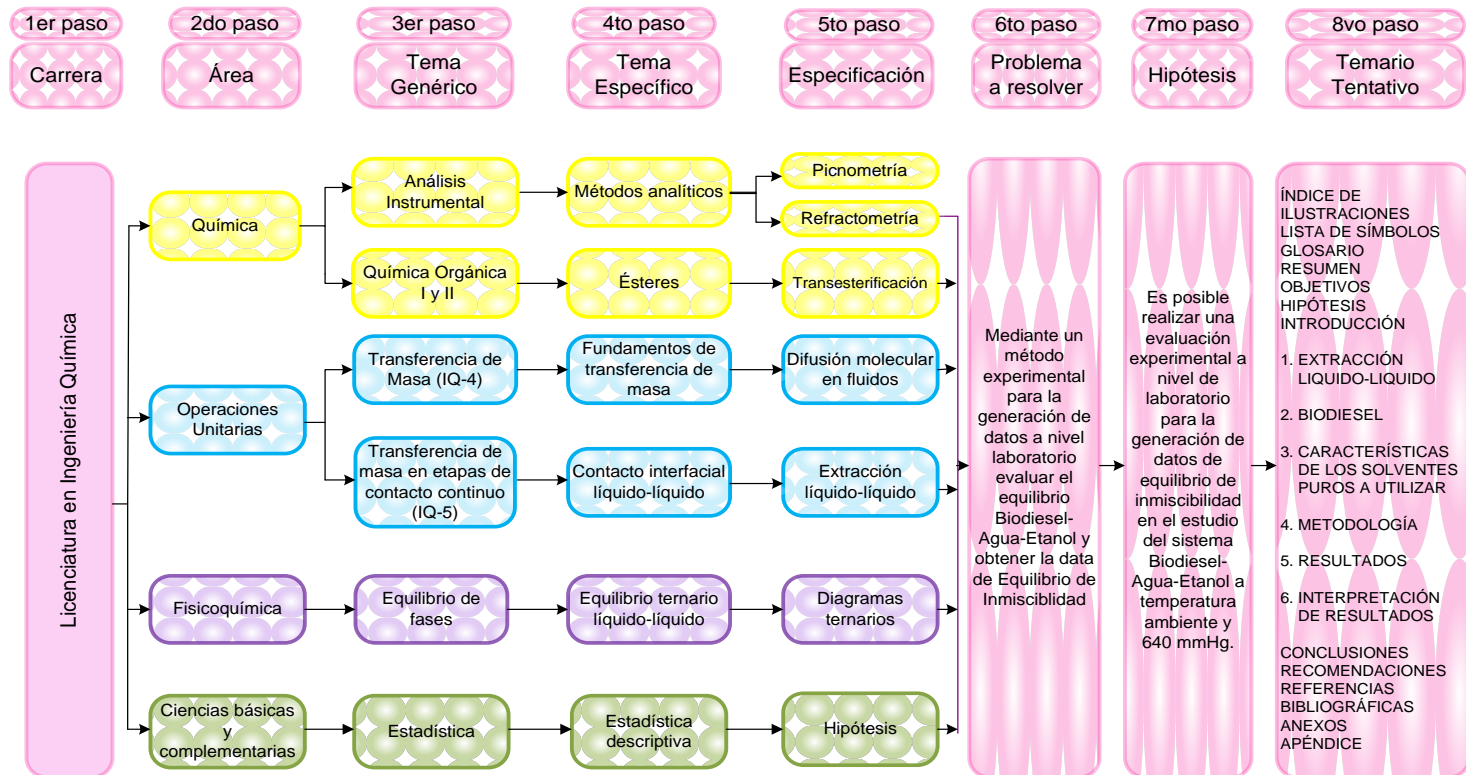
		<b>(líquidos)</b>	2. Reactivos 3. Explosivos 4. Tóxicos 5. Inflamables 6. Bioinfecciosos	de la realización de la parte experimental de la investigación, por la utilización de biodiesel (2, 3, 4 y 5).	líquidos dentro del laboratorio.
		<b>Modificación del relieve o topografía del área</b>	No aplica, ya que no se alterará la topografía del terreno.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
4	BIODIVERSIDAD	<b>Flora (árboles y plantas)</b>	No aplica, ya que no se alterará la flora.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		<b>Fauna (animales)</b>	No aplica, ya que no se expondrá la vida de animales que habitan los alrededores del área.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		<b>Ecosistema</b>	No aplica, ya que no se destruirá el hábitat de ninguna especie.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
5	VISUAL	<b>Modificación del paisaje</b>	No aplica, porque no se modificará ni la topografía, ni el paisaje, ya que no se verán cambios significativos en el área de trabajo.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.

6	SOCIAL	Cambios o modificaciones sociales	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cultural</li> <li>2. Político</li> <li>3. Económico</li> </ol>	<p>Al terminar la investigación se espera obtener un aporte industrial para el proceso de lavado de biodiesel de manera eficiente y minimizando costos.</p>	<p>Se realizarán todas las actividades de la investigación procurando causar el mínimo impacto ambiental.</p>
---	--------	-----------------------------------	--	---	---



## REQUERIMIENTOS ACADÉMICOS

Figura 33. Requerimiento académico para la elaboración de tesis de extracción líquido-líquido en la carrera de ingeniería química

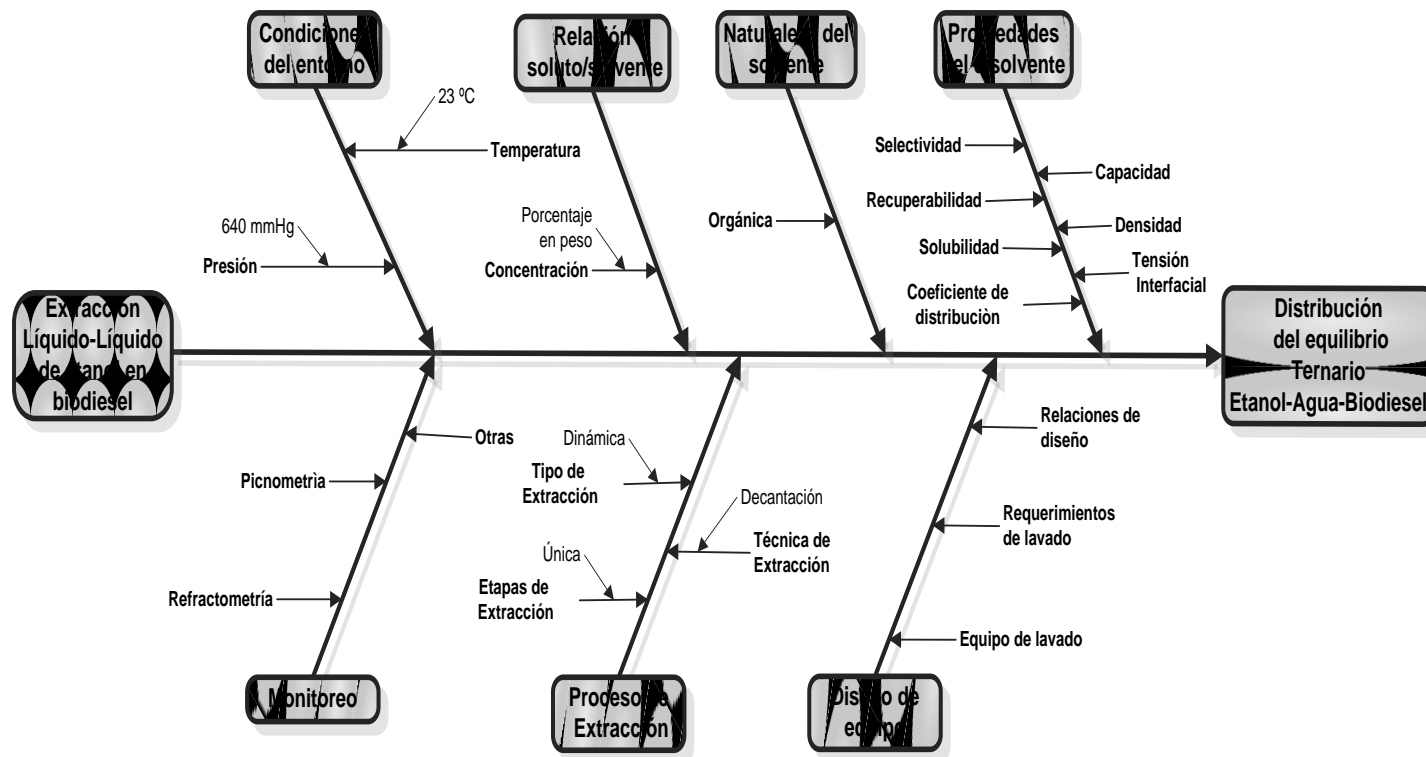


Fuente: elaboración propia



## DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO (ISHIKAWA)

Figura 34. Diagrama de causa y efecto del sistema etanol-biodiesel-agua



Fuente: elaboración propia