



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

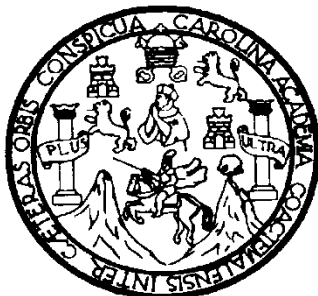
**“ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS A NIVEL DE
LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ISOPROPANOL-BIODIESEL-AGUA EN
EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg”**

Wendy Lissette Serrano Mejía

Asesorado por el Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

Guatemala, mayo de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO
DEL SISTEMA TERNARIO ISOPROPANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-
LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WENDY LISSETTE SERRANO MEJÍA

ASESORADO POR EL ING. QCO. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO 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. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada
EXAMINADOR	Inga. Hilda Palma
EXAMINADOR	Ing. Jaime Carranza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

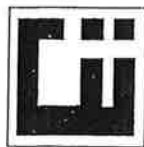
HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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 EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO
DEL SISTEMA TERNARIO ISOPROPANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-
LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 3 de marzo de 2010.

Wendy Lissette Serrano Mejía



Guatemala, 17 de febrero de 2011

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

Ing. Williams Álvarez

Atentamente me dirijo a usted, para notificarle que ha sido concluido satisfactoriamente el Informe Final del Trabajo de Graduación de la señorita Wendy Lissette Serrano Mejía, estudiante de la carrera de Ingeniería Química, quien se identifica con carné número 2005-17704, titulado: **"ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ISOPROPANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mmHg"**.

Me permito informarle que después de haber realizado la revisión del respectivo informe y haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Sin otro particular, quedo a su entera disposición, respetuosamente,


Ing. César Alfonso García Guerra
Colegiado No. 145

ASESOR
Jefe de Sección de Química Industrial





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

Guatemala, 17 de marzo de 2011
Ref.EIQ.TG.74.2011

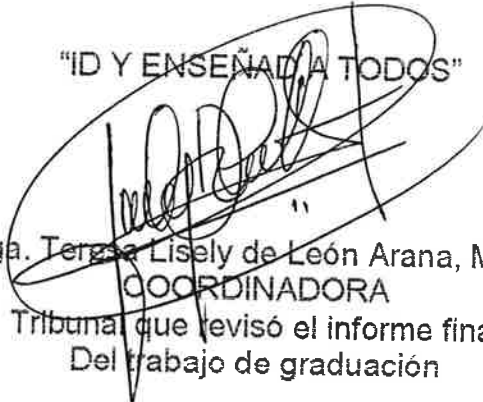
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-382010-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, **Wendy Lissette Serrano Mejía** identificada con carné No. **2005-17704**, titulado: "**ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ISOPROPANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**", el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico **Cesar Alfonso García Guerra**.

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

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"


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



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

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, **WENDY LISSETTE SERRANO MEJÍA** titulado: **"ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ISOPROPANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO 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 Carlos Alvarez Mejia, C.Dr.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo de 2011

Car. Archivo
WCSA/ale





Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.155.2010

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 EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO ISOPROPANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**", presentado por la estudiante universitaria **Wendy Lissette Serrano Mejía**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, mayo de 2011



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su compañía en mi vida, por brindarme sabiduría, salud, bienestar físico y espiritual.
Mis padres	Sara Carlota y Edgar Giovani, por su amor, apoyo, comprensión, en el transcurso de mi carrera, por darme la educación y tomarme de la mano guiándome por el camino correcto.
Mi hermano	Luis Giovanni, por su cariño, apoyo y sobre todo por existir y dar alegría a mi vida.
Mi sobrino	Roger Aaron, por dar alegría y amor a mi vida.
Mi amiga	Minely Cano (q.e.p.d.), por cuidarme y guiarme en los momentos difíciles de mi vida.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por la formación académica recibida y contribuir de esta manera en el desarrollo de mi bella Guatemala.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Mi Padre Todopoderoso por permitirme alcanzar esta meta, por darme grandeza, método y facultad para entender y aprender.
Mis padres	Por el apoyo incondicional que me brindaron para lograr culminar mi carrera profesional y por hacerme una mujer de bien.
Mi hermano y su esposa	Por su cariño, apoyo y sus consejos.
Mis amigos	Mónica, Paola, Gerson, Esvin, Lucrecia, Lizbet, Tania, Verónica, Francisco, Alejandra, Nancy, Faby, Julio Mario, Hugo, Luis, Edwin, Julio, por su amistad y apoyo incondicional y sobre todo por haberse cruzado en mi vida, la hacen más especial aún.
Mi asesor	Ing. César Alfonso García, por el tiempo dedicado a la asesoría de esta investigación, depositar su confianza en mí para el desarrollo de la misma y por los conocimientos transmitidos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Extracción líquido-líquido	11
2.1.1. Equilibrio de fases	11
2.1.1.1. Coeficientes de distribución	12
2.1.2. Equilibrio líquido	12
2.1.3. Diagramas representativos del equilibrio ternario	12
2.1.3.1. Sistema de coordenadas triangulares	13
2.1.4. Tipos de sistemas ternarios en la extracción líquido-líquido	15
2.1.4.1. Tipo I. Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles	16
2.1.4.1.1. Ejemplos de diagramas tipo I	17
2.1.4.2. Tipo II. Formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles	19
2.1.4.3. Tipo III. Formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles	20

2.1.4.4.	Tipo IV. Formación de fases sólidas	21
2.1.5.	Propiedades deseables del disolvente.....	21
2.1.5.1.	Selectividad	21
2.1.5.2.	Recuperabilidad	21
2.1.5.3.	Coefficiente de distribución	22
2.1.5.4.	Capacidad	22
2.1.5.5.	Solubilidad del disolvente.....	22
2.1.5.6.	Densidad.....	22
2.1.5.7.	Tensión interfacial.....	23
2.1.5.8.	Toxicidad.....	23
2.2.	Biodiesel	23
2.2.1.	Materia prima.....	24
2.2.1.1.	Aceites vegetales o animales.....	24
2.2.1.2.	Alcoholes	27
2.2.2.	Transesterificación del biodiesel	30
2.2.3.	Proceso integrado de producción de biodiesel	33
2.2.3.1.	Factores del proceso de producción	35
2.2.3.1.1.	Glicerol libre	35
2.2.3.1.2.	Alcohol residual.....	36
2.2.3.2.	Factores de postproducción	37
2.2.3.2.1.	Agua y sedimento	37
2.2.3.2.2.	Estabilidad al almacenamiento .	38
2.2.4.	Calidad del biodiesel.....	39
2.3.	Alcohol isopropílico.....	41
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	43
3.1.	Variables.....	43
3.2.	Delimitación del campo de estudio	43
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	44

3.4.	Recursos materiales disponibles	44
3.4.1.	Reactivos	44
3.4.2.	Equipo	44
3.4.3.	Cristalería.....	46
3.4.4.	Material de laboratorio.....	46
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	46
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	48
3.6.1.	Método para la elaboración de la curva de solubilidad	49
3.6.2.	Procedimiento preparatorio para el lavado de biodiesel	50
3.6.3.	Procedimiento experimental para el sistema líquido-líquido isopropanol-biodiesel-agua	52
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	54
3.8.	Análisis estadístico	54
4.	RESULTADOS	55
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	71
	CONCLUSIONES	81
	RECOMENDACIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	APÉNDICES	89
	ANEXOS	143

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Biodiesel producido por Guatebiodiesel	2
2.	Planta de biodiesel Biopersa con su biodiesel producido	3
3.	Planta industrial de producción de biodiesel de la empresa Biocombustibles de Guatemala, S.A.	4
4.	Utilización de biodiesel de la Empresa Comunidad Nueva Alianza.	5
5.	Diagrama de representación del equilibrio ternario	13
6.	Coordenadas para un diagrama triangular	14
7.	Diagrama de equilibrio ternario	15
8.	Sistema de tres líquidos, A y B parcialmente miscibles	17
9.	Diagrama de fases ternario etilenglicol-furfal-agua a 25°C	17
10.	Diagrama de fases ternario alcohol-benceno-agua a 25°C	18
11.	Diagrama de fases ternario isopropanol-hexano-agua a 25°C	18
12.	Sistema de tres líquidos, A-B y B-C parcialmente miscibles	19
13.	Diagramas de sistemas ternarios con tres pares parcialmente miscibles	20
14.	Materia prima para producción de biodiesel según el laboratorio de procesos químicos y bioquímicos integrados, Universidad Complutense de Madrid	27
15.	Esquema de la materia prima y producción de biodiesel a partir de aceites usados según el laboratorio de procesos químicos y bioquímicos integrados, Universidad Complutense de Madrid	29
16.	Reacción de transesterificación general del biodiesel	31

17.	Mecanismo de reacción de la transesterificación de aceites vegetales	32
18.	Proceso Lurgi de producción continua	34
19.	Análisis del proceso integrado del biodiesel según el laboratorio de procesos químicos y bioquímicos integrados, Universidad Complutense de Madrid	37
20.	Diagrama líquido-vapor del sistema isopropanol-agua	41
21.	Balanza analítica OHAUS	44
22.	Plancha de calentamiento con agitación SYBRON	45
23.	Refractómetro Abbe	45
24.	Flujograma que presenta la metodología de un proceso de extracción líquido – líquido	47
25.	Detalle de la unidad de lavado de biodiesel	50
26.	Detalle de la unidad de separación del agua de lavado del biodiesel	51
27.	Detalle de la unidad de secado de biodiesel	51
28.	Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a temperaturas ambiente	53
29.	Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria isopropanol-agua a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	55
30.	Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria isopropanol-biodiesel a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	56
31.	Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria isopropanol-agua a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	57
32.	Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria isopropanol-biodiesel a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	58

33.	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad en fracción mol, obtenidos para el sistema isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones isopropanol-agua, mediante la adición de biodiesel a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	59
34.	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad en fracción mol, obtenidos para el sistema isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones isopropanol-biodiesel, mediante la adición de agua a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	60
35.	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad tipo I en fracción mol, obtenidos para el sistema isopropanol-biodiesel-agua a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	61
36.	Domo de solubilidad tipo I de los datos experimentales en fracción mol para el sistema isopropanol-biodiesel-agua a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	62
37.	Curva de correlación de los coeficientes de distribución (K) obtenidos en función de la relación biodiesel: agua utilizada para cada una de las seis muestras a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	64
38.	Líneas de amarre para distintas relaciones de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de isopropanol en biodiesel, según la Norma <i>EN 14214</i> , para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de Isopropanol, con agitación constante a 400 rpm durante 25 minutos a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	65
39.	Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 10:1 de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de isopropanol en biodiesel, según la Norma <i>EN 14214</i> , para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol, con agitación constante a 400 rpm durante 25 minutos a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	66

40.	Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 5:1 de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de isopropanol en biodiesel, según la Norma EN 14214, para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol, con agitación constante a 400 rpm durante 25 minutos a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	67
41.	Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 2.5:1 de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de isopropanol en biodiesel, según la Norma EN 14214, para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol, con agitación constante a 400 rpm durante 25 minutos a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	68
42.	Parámetro de monitoreo de la densidad para las soluciones binarias isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel	72
43.	Sensibilidad del parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel	74

TABLAS

I.	Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza	26
II.	Especificaciones de biodiesel del RTCA	40
III.	Propiedades físicas y químicas del isopropanol	42
IV.	Composición del punto de pliegue en el sistema isopropanol-biodiesel-agua a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	63
V.	Valores de los coeficientes de distribución (K) obtenidos a	63

	partir del coeficiente entre el porcentaje de isopropanol distribuido en la fase de biodiesel y el porcentaje de isopropanol distribuido en la fase acuosa a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	
VI.	Resultado del análisis de varianza de un factor con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de isopropanol en agua a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	69
VII.	Resultado del análisis de varianza de un factor con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de isopropanol en biodiesel a $24\pm 1^{\circ}\text{C}$	70
VIII.	Comparación del grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción) para los sistemas ternarios de trabajos de graduación estudiados anteriormente	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
AEA	Alianza en Energía y Ambiente
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
K	Coefficiente de distribución (adimensional)
C	Concentración (porcentaje en peso)
ρ	Densidad de la solución (g/ml)
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europea)
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i> (ésteres metílicos de ácidos grasos)
FFA	<i>Fat Free Acids</i> (ácidos grasos libres)
°C	Grados Celsius
N	Índice de refracción
IPA	Isopropanol (alcohol isopropílico)
kPa	Kilo Pascales (medida de presión)
LIEXVE	Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales
P	Peso (g)
%	Porcentaje
RTCA	Reglamento Técnico Centroamericano
V	Volumen (ml)

GLOSARIO

Ácidos grasos	Grupo de ácidos orgánicos, con un único grupo carboxilo (-COOH), entre los que se encuentran los ácidos saturados (hidrogenados) de cadena lineal producidos por la hidrólisis de las grasas.
Biocombustible	Cualquier combustible sólido, líquido o gaseoso producido a partir de materia orgánica.
Coefficiente de Distribución	Relación entre la proporción de soluto en el extracto y en el refinado.
Composición porcentual	Porcentaje de masa de cada elemento en el sistema.
Concentración	Cantidad de soluto por unidad de volumen o masa de disolvente o de solución.
Cromatografía de gases	Medio para la separación, caracterización y análisis cuantitativo de los aceites esenciales.
Curva binodal	Línea de equilibrio para el sistema ternario, representada en un sistema de coordenadas triangulares, que indica el límite de las composiciones de las mezclas de los tres

componentes del sistema, para las cuales el sistema es bifásico o monofásico. Esto es, una curva que divide en dos regiones al diagrama de equilibrio ternario; debajo de esta curva las mezclas ternarias existen en dos fases; encima de esta curva las mezclas ternarias están en una sola fase.

Densidad	Peso específico.
Disolvente	Líquido empleado como medio dispersante en una solución.
Éster	Compuesto formado (junto con agua) por la reacción de un ácido y un alcohol.
Esterificación	Proceso unitario que consiste en la producción de un éster por la reacción de un alcohol con un ácido.
Extracción	Operación unitaria en la que uno de los constituyentes de una sustancia sólida o líquida es transferido a un líquido, denominado disolvente.
Extracto	Producto final de la extracción, rico en soluto.
Índice de refracción	Razón entre las velocidades de la luz en el vacío y en el medio estudiado.
IPA	Alcohol isopropílico o isopropanol.

Lípido	Grupo heterogéneo de sustancias orgánicas que se encuentran en los organismos vivos. Los lípidos están formados por carbono, hidrógeno y oxígeno, aunque en proporciones distintas a como estos componentes aparecen en los azúcares. Se distinguen de otros tipos de compuestos orgánicos porque no son solubles en agua (hidrosolubles) sino en disolventes orgánicos (alcohol, éter).
Mezcla azeotrópica	La mezcla azeotrópica se caracteriza por tener una composición y presión de vapor definidas para una temperatura dada, una composición y temperatura de ebullición definidas para una presión dada. Se comporta como una especie pura, con temperatura de ebullición y composición fija. Las mezclas de este tipo no son compuestos químicos definidos, puesto que su composición cambia con la presión.
Miscibilidad	Capacidad de un líquido para mezclarse con otro líquido (o disolverse en él).
Picnometría	Método para determinar la densidad de una sustancia líquida por medio del uso de un picnómetro.
Punto de pliegue	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.
Refinado	Líquido residual del cual fue separado el soluto.

Refractómetro	Equipo con el cual se mide el índice de refracción.
Soluto	Fase dispersa (disuelta) de una solución.
Solvente	Líquido capaz de disolver otros materiales, (sólidos, líquidos o gases), para formar una solución.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se caracterizó el sistema ternario de isopropanol(IPA)-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido experimentalmente a nivel de laboratorio a temperatura ambiente ($24\pm 1^{\circ}\text{C}$).

Se elaboraron las curvas de correlación del índice de refracción y densidad en función de la composición porcentual en peso, para cada serie de soluciones de isopropanol en agua y en biodiesel, por medio de los métodos de picnometría y refractometría. Se determinó el equilibrio líquido-líquido del sistema, a partir de soluciones de Isopropanol en agua tituladas con biodiesel y soluciones de isopropanol en biodiesel tituladas con agua hasta la formación de dos fases, por medio de estos datos se graficó la curva binodal del sistema utilizando el programa *ProSim Ternary Diagram*. A través de seis líneas de unión se obtuvo la curva de distribución del sistema y, así se pudo determinar el punto de pliegue.

Como resultado de la investigación realizada, se concluyó que estadísticamente existe variabilidad significativa para el índice de refracción y volumen de disolvente adicionado en función de la concentración en peso de isopropanol en agua y en biodiesel respectivamente. Donde también se concluye que la hipótesis nula es asertiva, ya que se determinó que el sistema isopropanol-biodiesel-agua se caracteriza por ser un sistema ternario tipo I. A la vez se determinó que en el biodiesel no es posible refinar el contenido de isopropanol, puesto que la línea de amarre en el sistema para la especificación de 0.20% en peso máximo de alcohol residual en biodiesel no cumple según la Norma *EN 14214*, debido a que la afinidad del Isopropanol es similar con el agua así como con el biodiesel.

OBJETIVOS

General

Determinar la distribución de solubilidad del sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido experimentalmente.

Específicos

1. Realizar una correlación entre los datos experimentales de índice de refracción en función del contenido porcentual en peso de soluciones de isopropanol-biodiesel a temperatura ambiente.
2. Realizar una correlación entre los datos experimentales de índice de refracción en función del contenido porcentual en peso de soluciones de isopropanol-agua a temperatura ambiente.
3. Realizar correlaciones de los datos experimentales de densidad en función del contenido porcentual en peso de soluciones acuosas de isopropanol a temperatura ambiente.
4. Realizar correlaciones de los datos experimentales de densidad en función del contenido porcentual en peso de soluciones de isopropanol en biodiesel a temperatura ambiente.

5. Correlacionar los valores experimentales de las concentraciones obtenidas de las soluciones en equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de isopropanol/agua por adición de biodiesel.
6. Correlacionar los valores experimentales de las concentraciones obtenidas de las soluciones en equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de isopropanol/biodiesel por adición de agua.
7. Elaborar la curva de equilibrio ternario líquido-líquido en un diagrama en coordenadas triangulares, a partir de los datos experimentales obtenidos del sistema isopropanol-biodiesel-agua estudiado, para determinar el tipo de sistema ternario obtenido, utilizando el programa *ProSim Ternary Diagram*.
8. Determinar cuál es la relación óptima biodiesel-agua, tiempo de contacto y número de ciclos de lavado requeridos para la refinación del biodiesel con una concentración porcentual en peso de 15% de isopropanol a 400 rpm.
9. Evaluar la concentración final de isopropanol en el biodiesel.

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 isopropanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente y 640 mmHg.

HIPÓTESIS ESTADÍSTICA

Para variable respuesta distribución porcentual en equilibrio de inmiscibilidad:

Hipótesis Nula

Ho: El sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, se identifica con el sistema ternario tipo I a temperatura y presión de estudio.

Hipótesis Alternativa

Ha: El sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, no se identifica con el sistema ternario tipo I a temperatura y presión de estudio.

INTRODUCCIÓN

La extracción líquido-líquido es la operación básica más importante en la separación de mezclas homogéneas líquidas, la cual se basa en la separación de una o varias sustancias disueltas en un disolvente mediante su transferencia a otro disolvente insoluble, o parcialmente insoluble, en el primero. La transferencia de materia se consigue mediante el contacto directo entre las dos fases líquidas. Una de las fases es dispersada en la otra para aumentar la superficie interfacial y aumentar el caudal de materia transferida.

El estudio del sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua se realizó a nivel laboratorio y su importancia radica en la determinación del contenido de agua necesario para lavar efectivamente el biodiesel sin que haya un desperdicio de la misma; ya que ésta queda saturada de contaminantes que son desechados en el drenaje.

En el proceso de manufactura de biodiesel se habla de un refinamiento del mismo. El agua y el alcohol utilizados para la elaboración del biodiesel deben ser removidos y recuperados, evaluando el grado de eliminación mediante lavado con agua de alcohol isopropílico, producido durante la transesterificación para obtener biodiesel. Al realizar esta línea de investigación, está la posibilidad de llevar a cabo el proyecto integral de refinamiento de biodiesel, con la ayuda de los proyectos relacionados a la misma. Por lo que se pretende continuar con las caracterizaciones de sistemas ternarios, empleados comúnmente en las extracciones líquido-líquido, representando los datos de equilibrio del sistema ternario, en diagramas triangulares, siendo éstos la forma más tradicional de representar dicho sistema.

La determinación del equilibrio ternario isopropanol-biodiesel-agua se basó en la interpretación del contenido de soluto al equilibrio mediante técnicas de picnometría, refractometría y titulación. De esta forma se determinó las concentraciones al equilibrio del sistema ternario, para una temperatura ambiente, y hacer más eficiente el proceso de refinamiento del biodiesel para establecer la línea de amarre del sistema según la especificación del 0.20 % en peso máximo de alcohol en biodiesel según la Norma *EN 14214*.

1. ANTECEDENTES

Existen ocho empresas que producen biodiesel en Guatemala y una empresa que produce aceite de palma tratado para uso en motores: Guatebiodiesel, ubicada en Ciudad de Guatemala con capacidad para producir de 1000 galones/día de biodiesel; Octagón, ubicada en la Ciudad de Guatemala con capacidad para 1000 galones/día; la Fuerza Verde, también ubicada en la Ciudad de Guatemala, con capacidad para producir 50 galones/día de biodiesel; Biopersa, ubicada en carretera a la Antigua Guatemala, con capacidad para producir 338 galones/día de biodiesel; Biocombustibles de Guatemala, S.A., ubicada en la Ciudad de Guatemala con capacidad para 600 galones/día de biodiesel; Biodiesel Mazat Agui, ubicada en caserío Llanitos del departamento de Escuintla; la Comunidad Nueva Alianza, ubicada en municipio de El Palmar, departamento de Quetzaltenango con capacidad para 50 galones/día de biodiesel y la Helios, ubicada en Zacapa (Oriente) y con capacidad para producir 290 galones/día de aceite de palma tratado para uso en motores (no hace la transesterificación).

La empresa Guatebiodiesel (Combustibles Ecológicos S.A.) 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: bibliografía No. 23

La Empresa Octagón (o Biocombustibles de Guatemala) recibió un financiamiento de EUR 90000 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% del biodiesel producido fue originado de aceites usados y alrededor del 20% de piñón.

La Empresa Fuerza Verde 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 Empresa Biopresa 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 biodiesel (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 elabora biodiesel a partir de aceite quemado utilizado en las frituras que realizan en los restaurantes y hoteles de dicha ciudad.

Figura 2. **Planta de biodiesel Biopresa con su biodiesel producido**



Fuente: bibliografía No. 23

Biocombustibles de Guatemala, S.A. elabora 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. Con base a la producción agrícola de dichas semillas se obtiene la producción industrial que actualmente la piensan ampliar conforme el área agrícola aumente.

Figura 3. **Planta industrial de producción de biodiesel de la empresa Biocombustibles de Guatemala, S.A.**



Fuente: bibliografía No. 4.

La Empresa Biodiesel 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.

La Empresa Comunidad Nueva Alianza es una cooperativa de productores de macadamia que produce biodiesel para uso propio en motores estacionarios. Como materias primas utiliza 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: bibliografía No. 21

La Empresa Helios produce alrededor de 2000 a 3000 galones 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.

Desde el punto de vista del proceso de producción, las 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 en las empresas Fuerza Verde, la Comunidad Nueva Alianza y Octagón, 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 Octagón y de

Biocombustibles de Guatemala, S.A., las demás empresas aún no hacen la recuperación del metanol, por motivos de escala de producción actual.

Existen varias investigaciones de tesis de graduación de Ingeniería Química referentes a la producción de biodiesel a nivel laboratorio.

Durante el año 2007 se realizó la investigación de tesis del Ing. David Antonio Mota Aguilar, asesorado por el Ing. Julio Francisco Villacinda Maldonado y cuyo título es “Evaluación del método Base – Base con etanol para la obtención de biodiesel a partir de aceite oxidado de piñón (*Jatropha curcas l.*) a nivel laboratorio”.

Durante el año 2007 se realizó la investigación de tesis del Ing. Nelson Darío Barraza López, asesorado por el Ing. José Eduardo Calderón y cuyo título es “Análisis comparativo de la elaboración de biodiesel, a partir de aceite crudo de palma africana por medio de dos procesos, a nivel laboratorio y planta piloto”.

El fundamento teórico del proyecto sobre sistemas ternarios lo sustentan las investigaciones de tesis de graduación de Ingeniería Química anteriormente realizadas.

Durante el año 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 $28 \pm 7^\circ\text{C}$.

Durante el año 2002 realizó la Inga. Olinda Margarita López Velásquez, la investigación de tesis 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°C es: 22% agua, 71% etanol, 7% hexano y a 43°C es 23% agua, 68% etanol y 9% hexano.

Durante el año 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 mm Hg”. En la investigación se determinó que existe una diferencia significativa entre las isotermas de temperatura de 10°C y 50°C para el sistema de isopropanol-hexano-agua, a partir de las curvas binoidales al equilibrio de inmiscibilidad y de los puntos de pliegue obtenidos. De la cual se concluyó que el sistema es del tipo I. Con base a este trabajo, se realizará una comparación de los datos experimentales, al utilizar un éster metílico en vez de un hidrocarburo apolar.

Durante el año 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% luego del cual se incrementa al aumentar la cantidad de glicerol en el sistema.

Durante el año 2005 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Marisol Amado Rodas para el sistema Limoneno-etanol-hexano, asesorado 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 mm Hg”. De la cual se determinó que el sistema es del tipo II, con un punto de pliegue a 10°C a 62% de A. E. limoneno, 33% de etanol y 5% de hexano y un punto de pliegue a 25 °C a 54% de A. E. Limoneno, 40% etanol y 6% hexano.

Durante el año 2006 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Krista Ivonne Aguilar Ovando, asesorado 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)_{50%} - 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%.

Durante el año 2008 se realizó la investigación de tesis de la Inga. Maria Gabriela Hernández Castellanos, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título “Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-

líquido a dos temperaturas Y 640 mm Hg”. De la cual se concluyó que el sistema es del tipo II.

Durante el año 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 mm Hg”. De la cual se concluyó que el sistema es del tipo II, teniendo un refinamiento del biodiesel del 0.4543% de metanol al inicio a un 0.1818% al final, con tres ciclos de lavado en una relación de 10:1 de biodiesel y agua con 10% de metanol.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Extracción líquido-líquido

En la extracción líquido-líquido, ambas fases son químicamente muy diferentes, lo que conduce a una separación de los componentes de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas. Este tipo de extracción también es llamada extracción con líquido o extracción con disolvente. La extracción líquido-líquido es la separación de una o varias sustancias disueltas en un disolvente mediante su transferencia a otro disolvente insoluble o parcialmente soluble al primero.

En la extracción líquido-líquido se da la transferencia de materia, la cual se alcanza mediante el contacto directo entre las dos fases líquidas. Una de las fases es dispersada en la otra para aumentar la superficie interfacial y aumentar el caudal de materia transferida.

En transferencias de este tipo, la solución que se va a extraer se llama alimentación y disolvente se llama al líquido con el cual se pone en contacto la alimentación. El producto de la operación rico en disolvente se llama extracto; el líquido residual de donde se separó el soluto es el refinado.

2.1.1. 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.

2.1.1.1. Coeficientes de distribución

El coeficiente de distribución también es llamado coeficiente de reparto K en el equilibrio de fases, en donde se refiere 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 .

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

2.1.2. Equilibrio líquido

La extracción supone el uso de sistemas compuestos por tres sustancias cuando menos; aunque las fases insolubles son predominantemente muy distintas desde el punto de vista químico, en la mayoría de los casos los tres componentes aparecen en cierto grado en las dos fases.

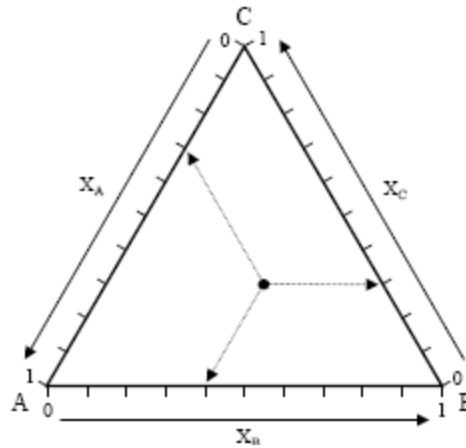
2.1.3. Diagramas representativos del equilibrio ternario

En una operación de extracción líquido-líquido suele considerarse que el refinado y el extracto se encuentran equilibrio. Los datos de equilibrio que deberán manejarse serán como mínimo los correspondientes a un sistema ternario (dos disolventes y un soluto), con dos de los componentes inmiscibles o parcialmente inmiscibles entre sí.

Los datos recabados de equilibrios líquidos se representan en diagramas triangulares (triángulos equiláteros), en donde cada uno de los vértices del triángulo representa uno de los tres componentes puros (100%), un punto sobre un lado corresponderá a una mezcla binaria y un punto en el interior del triángulo representa una mezcla ternaria, tal como se muestra en la figura 5 en

donde la concentración de cada componente en el diagrama se representa como fracción molar o másica.

Figura 5. Diagrama de representación del equilibrio ternario

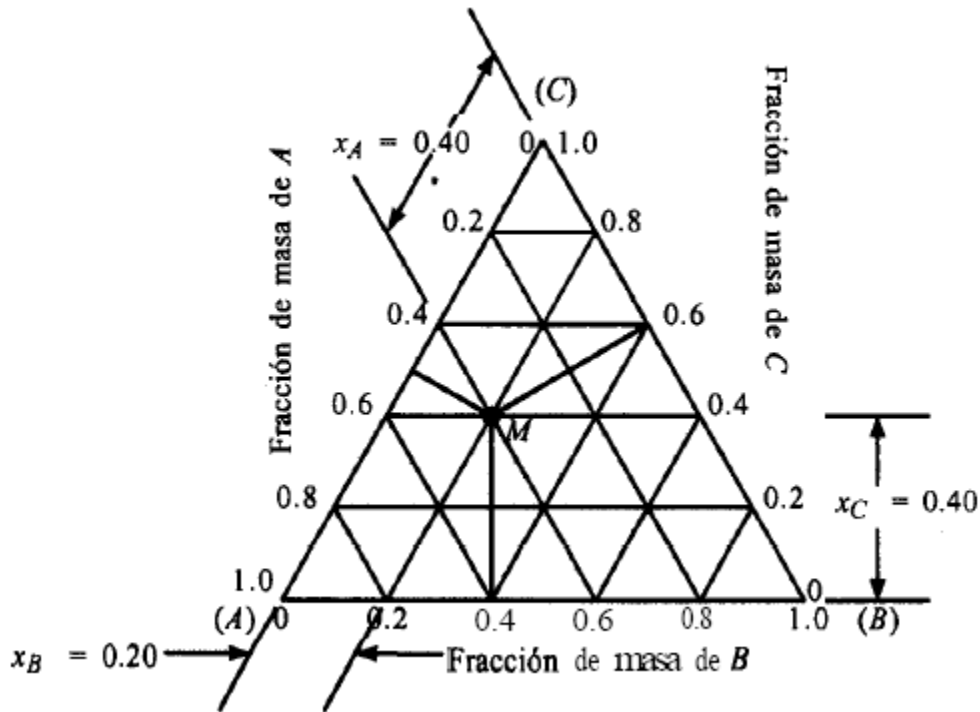


Fuente: bibliografía No. 24

2.1.3.1. Sistema de coordenadas triangulares

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. Cada uno de los tres vértices representa un componente puro A, B o C. Como se muestra en la figura 6 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.

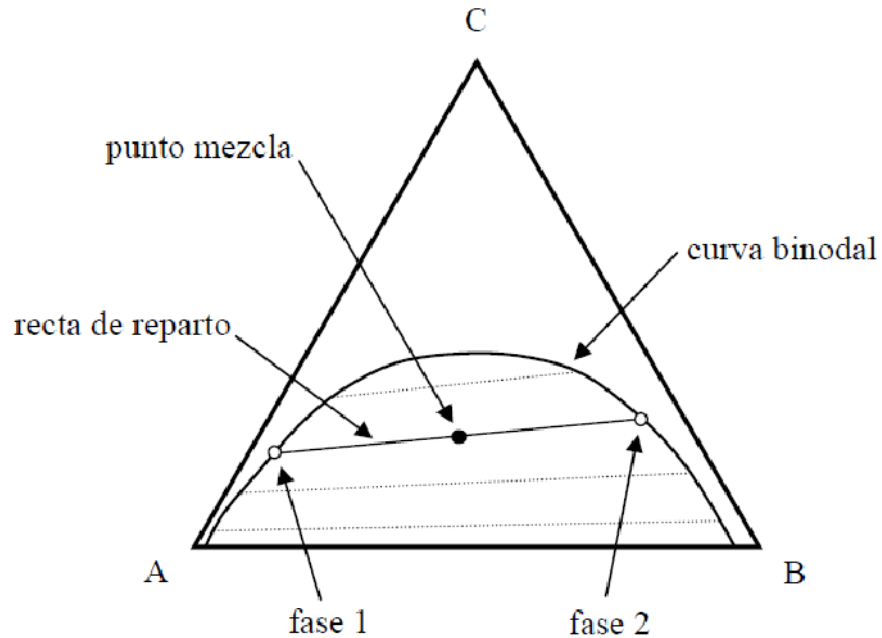
Figura 6. Coordenadas para un diagrama triangular



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

Los diagramas triangulares líquido-líquido presentan la denominada curva binodal o de solubilidad. Una mezcla representada por un punto situado por encima de la curva binodal estará constituida por una sola fase. Por el contrario, a una mezcla situada por debajo de la curva binodal le corresponden dos fases. Las dos fases en equilibrio se encuentran ligadas por una recta de reparto. La recta de reparto pasa por el punto mezcla y sus extremos sobre la curva binodal indican la concentración de las dos fases en equilibrio, observándose esto en la figura 7.

Figura 7. Diagrama de equilibrio ternario



Fuente: bibliografía No. 24

2.1.4. Tipos de sistemas ternarios en la extracción líquido-líquido

Al representar la extracción en fase líquida en un sistema ternario, y si los tres componentes se mezclan en todas proporciones con formación de soluciones homogéneas, el sistema carece de importancia para dicha extracción. Representando los sistemas ternarios en donde ocurre inmiscibilidad en:

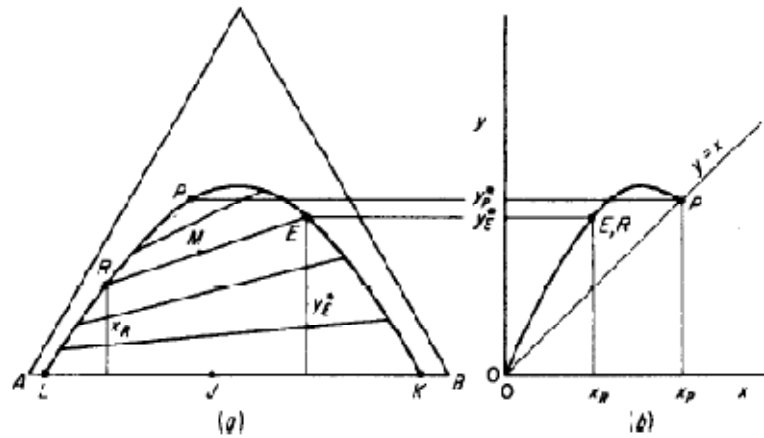
- ✓ Tipo I formación de un par de líquidos parcialmente miscibles
- ✓ Tipo II formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles
- ✓ Tipo III formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles
- ✓ Tipo IV formación de fases sólidas

2.1.4.1. Tipo I. Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles

En los sistemas de interés para la extracción líquido-líquido los dos disolventes implicados son inmiscibles o parcialmente inmiscibles entre sí. Es decir, su mezcla en las proporciones adecuadas puede dar lugar a la formación de dos fases. Además, la presencia de un soluto modifica la solubilidad de un disolvente en otro. En la figura 8 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).

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 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 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 rico en A y rico en B, generalmente no se encuentra en el valor máximo de C sobre la curva de solubilidad.

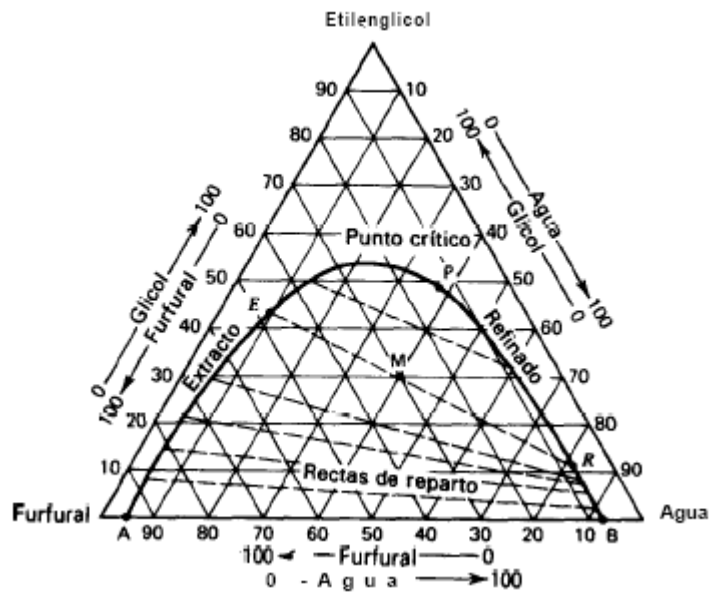
Figura 8. Sistema de tres líquidos, A y B parcialmente miscibles



Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa

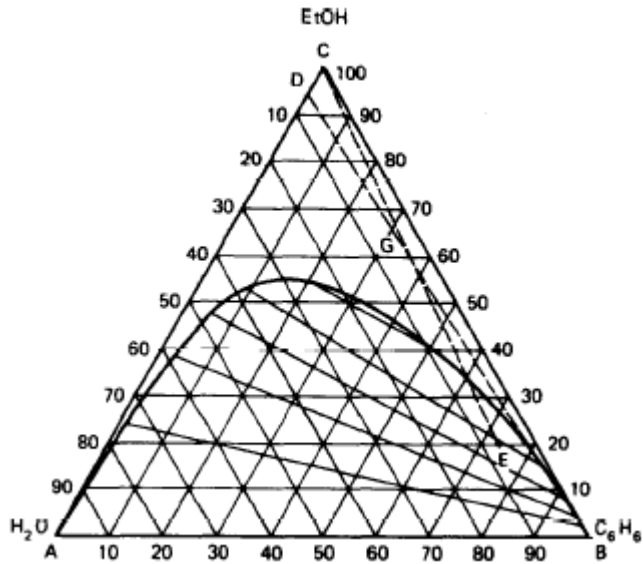
2.1.4.1.1. Ejemplos de diagramas tipo I

Figura 9. Diagrama de fases ternario Etilenglicol-Furfural-Agua a 25°C



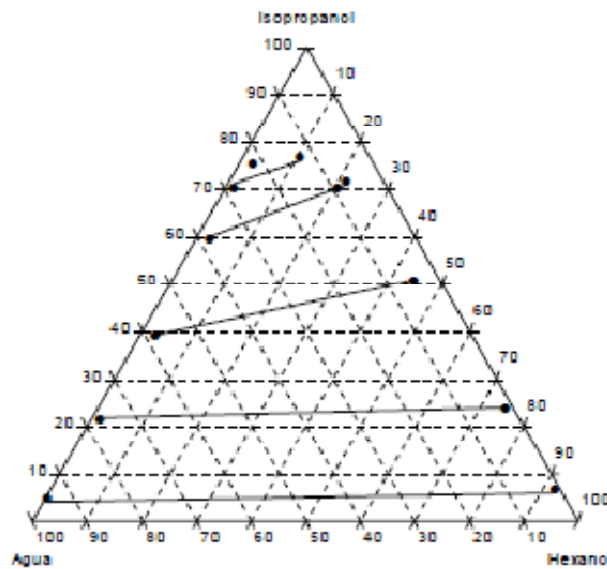
Fuente: Henley, E.J. Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química

Figura 10. Diagrama de fases ternario Alcohol-Benceno-Agua a 25°C



Fuente: Henley, E.J. Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química

Figura11. Diagrama de fases ternario Isopropanol-Hexano-Agua a 25°C

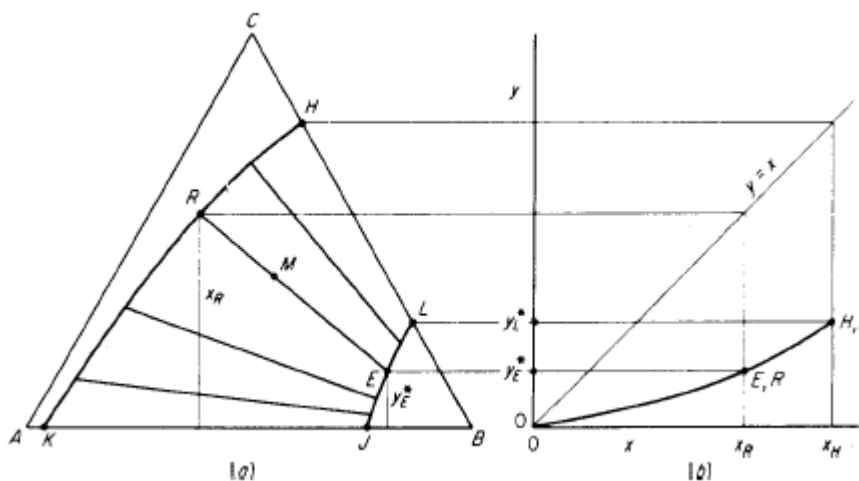


Fuente: bibliografía No. 12

2.1.4.2. Tipo II. Formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles

En este sistema ternario dos de los pares binarios resultan inmiscibles, por ejemplo: cuando el soluto no es totalmente miscible en una de las fases líquidas. Al observar la figura 12 A y C son completamente solubles, mientras que los pares A-B y B-C presentan únicamente una solubilidad limitada. 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 12. Sistema de tres líquidos, A-B y B-C parcialmente miscibles



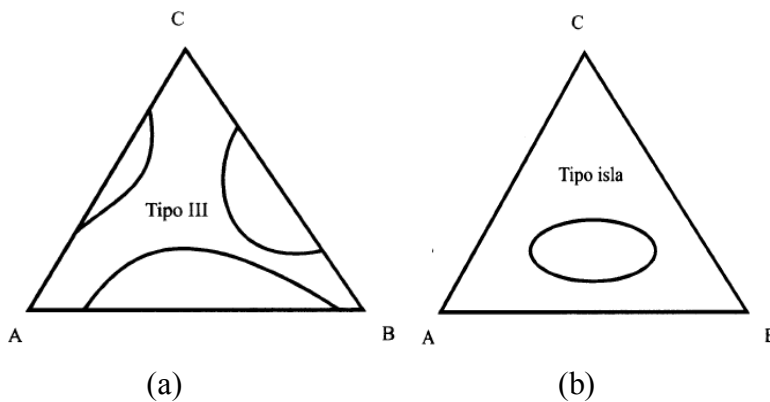
Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa

- ✓ En la investigación de trabajo de graduación de la Inga. María Gabriela Hernández Castellanos, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, se determinó que el sistema glicerol-biodiesel-agua pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo II.
- ✓ En la investigación de trabajo de graduación de la Inga. Nancy Karina Díaz Fulgan, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, se determinó que el sistema metanol-biodiesel-agua pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo II.

2.1.4.3. Tipo III. Formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles

El incremento en la temperatura puede cambiar un sistema, si se sobre pasa la temperatura crítica del sistema binario formado por el soluto y el disolvente. Cuando los tres líquidos son parcialmente solubles entre sí, se producen tres curvas binodales (figura 13a), 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 13b las curvas se intercepten, haciendo que el diagrama adopte la forma mostrada.

Figura 13. **Diagramas de sistemas ternarios con tres pares parcialmente miscibles**



Fuente: John H. Perry. Manual del ingeniero químico

2.1.4.4. Tipo IV. Formación de fases sólidas

Estos sistemas pueden ser muy complejos en cuanto al número de equilibrios existentes. Y son de muy poco interés en las extracciones líquido-líquido.

2.1.5. Propiedades deseables del disolvente

Las propiedades de un disolvente potencial se deben considerar antes de la utilización del mismo, en un proceso de extracción líquido-líquido.

2.1.5.1. Selectividad

La separación relativa o selectiva α 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 α con respecto a la unidad, de forma similar a la volatilidad relativa en destilación. Por lo general, las concentraciones diluidas de soluto proporcionan los factores más elevados de separación relativa.

2.1.5.2. 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.

2.1.5.3. 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.

2.1.5.4. 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.

2.1.5.5. 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 por lo general a unos bajos costos en la recuperación del soluto.

2.1.5.6. Densidad

La diferencia de densidad entre las dos fases líquidas en el equilibrio afecta las velocidades de flujo a contracorriente que se puedan lograr en el equipo de extracción, así como 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 y puede invertir las fases a concentraciones más elevadas.

2.1.5.7. 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 a medida que se incrementan la solubilidad y la concentración del soluto; asimismo, se reduce a cero en el punto triple.

2.1.5.8. 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 y no debe ser inflamable.

2.2. Biodiesel

El biodiesel (*FAME*) se define según *la American Standards for Testing and Materials (ASTM)*, como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como: aceites vegetales y que se emplea en los motores de ignición de compresión (motores diesel), o en calderas de calefacción, incluyendo, además de los ésteres metílicos o etílicos, otros ésteres de monoalcoholes como los ésteres isopropílicos, butílicos etc.

El término "bio" se refiere a su naturaleza renovable y "diesel" se refiere a su uso de motores de este tipo. El biodiesel posee las mismas propiedades del combustible diesel que son empleados por automóviles, camiones, etc., puede ser usado en cualquier motor diesel de forma pura o mezclado con el diesel, no es necesario efectuar ninguna modificación en los motores para poder emplear este combustible.

2.2.1. Materia prima

El biodiesel se puede producir de una gran variedad de reservas de alimento, entre los cuales se incluyen verduras más comunes en grasa (ej., soya, semilla del algodón, palma, cacahuete, girasol, coco) y gorduras del animal (Normalmente sebo y de frituras). La opción de reservas de alimento depende principalmente del área geográfica.

2.2.1.1. Aceites vegetales o animales

Uno de los mayores componentes de los aceites vegetales y las grasas animales son los llamados triglicéridos, que químicamente son ésteres de ácidos grasos con glicerol. Los triglicéridos de aceites vegetales y grasas animales típicamente contienen diferentes ácidos grasos que son la columna de un glicerol.

Los aceites vegetales y grasas son lípidos, éstos 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.

Otros aceites poseen otras composiciones, pero los aceites más empleados para producir el biodiesel están fuertemente concentrados en ácidos con 16 ó 18 átomos de carbón en sus cadenas, sean éstas saturadas o insaturadas (ácidos palmítico, esteárico, oléico, linoléico o ricinoléico).

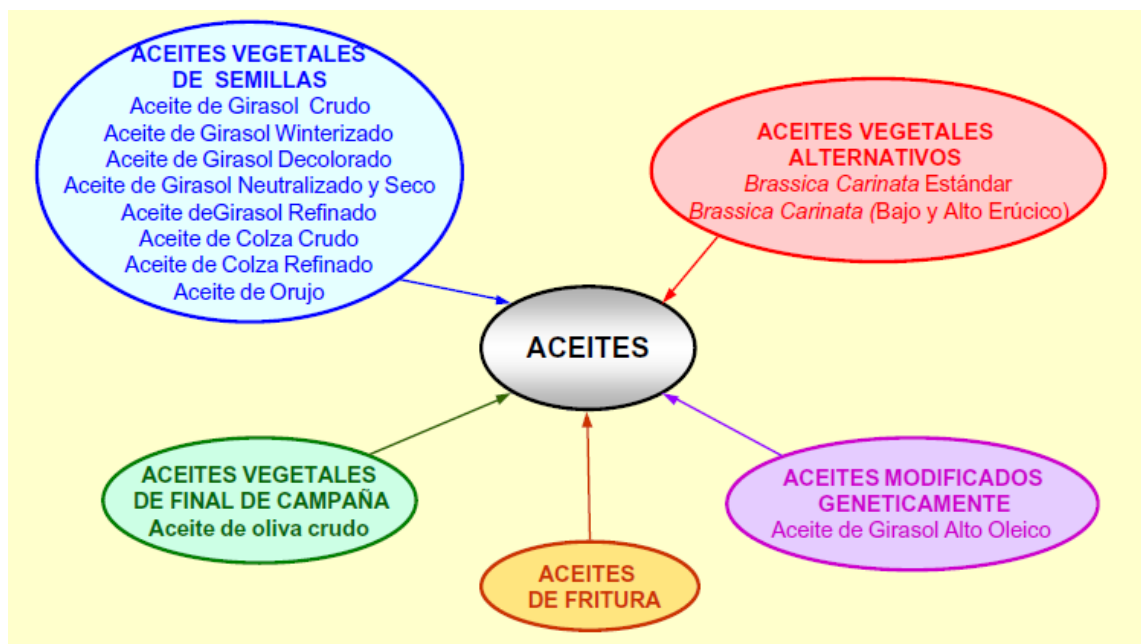
Tabla I. Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza

Nombre usual	Nombre IUPAC	Símbolo	Fórmula mínima
Butírico	Butanóico	C4:0	$C_4H_8O_2$
Caprónico	Hexanóico	C6:0	$C_6H_{12}O_2$
Caprílico	Octanóico	C8:0	$C_8H_{16}O_2$
Capricho	Decanóico	C10:0	$C_{10}H_{20}O_2$
Otusílico	Cis-4-decenóico	C10:1(n4)	$C_{10}H_{18}O_2$
Caproleico	Cis-9-decenóico	C10:1(n9)	$C_{10}H_{18}O_2$
Láurico	Dodecanóico	C12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
Lauroleico	Cis-5-dodecenóico	C12:1(n5)	$C_{12}H_{22}O_2$
Lindérico	Cis-4-dodecenóico	C12:1(n4)	$C_{12}H_{22}O_2$
Mirístico	Tetradecanóico	C14:0	$C_{14}H_{28}O_2$
Miristoleico	Cis-9-tetradecenóico	C14:1(n9)	$C_{14}H_{26}O_2$
Tsuzuico	Cis-4-tetradecenóico	C14:1(n4)	$C_{14}H_{26}O_2$
Palmítico	Hexadecanóico	C16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
Palmitoleico	Cis-9-tetradecenóico	C16:1(n9)	$C_{16}H_{30}O_2$
Esteárico	Octadecanóico	C18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
Petroselínico	Cis-6-octadecenóico	C18:1(n6)	$C_{18}H_{34}O_2$
Oléico	Cis-9-octadecenóico	C18:1(n9)	$C_{18}H_{34}O_2$
Eládico	Trans-9-octadecenóico	C18:1(tn9)	$C_{18}H_{34}O_2$
Vaccénico	Cis-11-octadecenóico	C18:1(n11)	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleico	Cis-9-cis-12-octadecadienóico	C18:2(n9,n12)	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolénico	Cis-9-cis-12-cis-15-octadecatrienóico	C18:3(n9,n12,n15)	$C_{18}H_{30}O_2$
Ricinoleico	12-hidroxi-cis-9-octadecenóico	C18:1(n9):OH(n12)	$C_{18}H_{34}O_3$
Araquídico	Icosanóico	C20:0	$C_{20}H_{40}O_2$
Gadoleico	Cis-9-icosenóico	C20:1(n9)	$C_{20}H_{38}O_2$

Fuente: bibliografía No. 19

No todos los aceites son adecuados para la 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.

Figura 14. **Materia prima para producción de biodiesel según el laboratorio de procesos químicos y bioquímicos integrados, Universidad Complutense de Madrid**



Fuente: bibliografía No. 11

2.2.1.2. Alcoholes

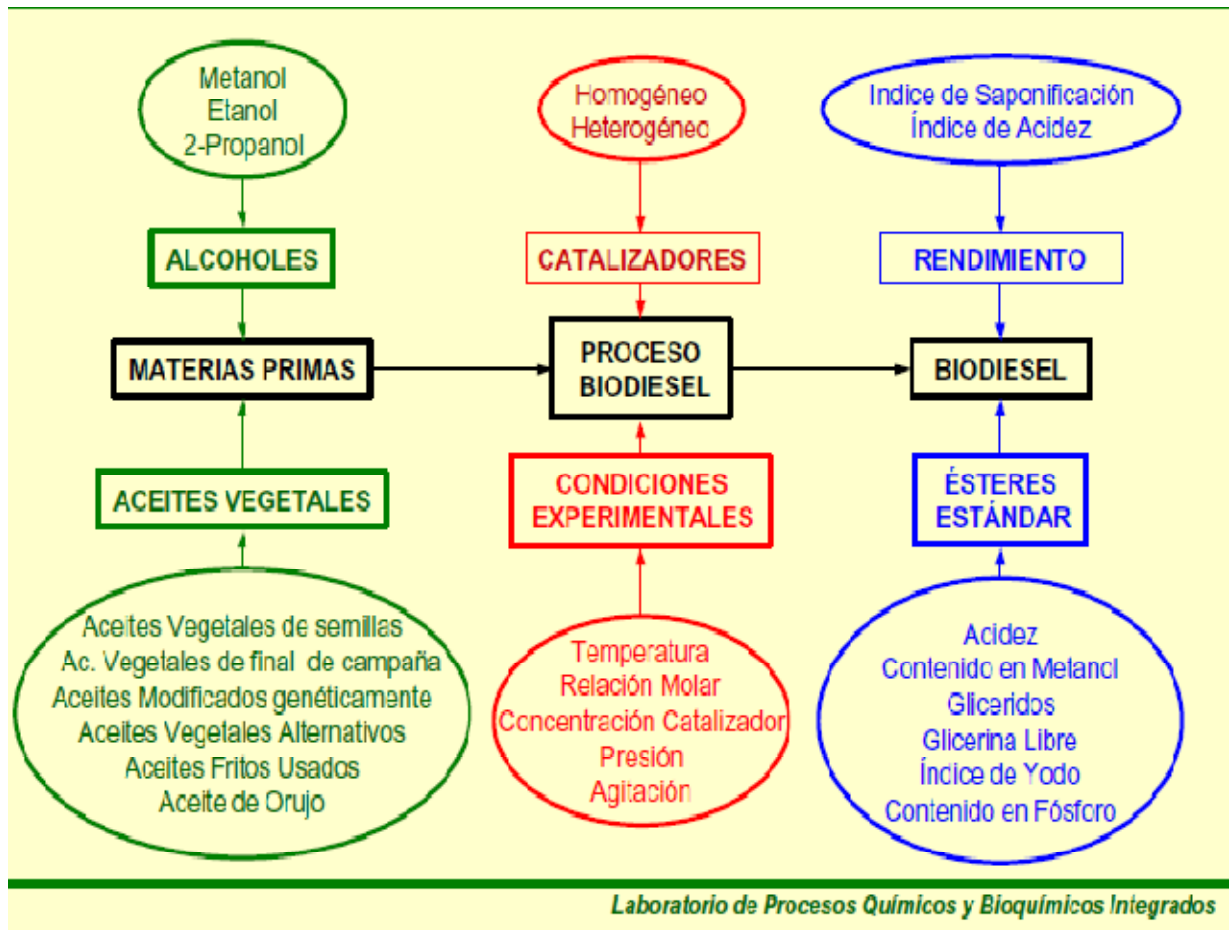
Los alcoholes que se pueden utilizar para la producción de biodiesel son los de cadena corta, entre ellos, metanol, etanol, propanol, butanol y alcohol amílico.

El metanol (CH_3OH) y el etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) son los más usados, debido fundamentalmente al bajo costo y a sus propiedades. 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% puro; el cinco por ciento restantes 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 más 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.

Aunque propanol es un alcohol de tres carbonos con la fórmula general. isopropanol, es frecuentemente utilizado como desinfectante y se considera que es mejor desinfectante que el etanol, pero rara vez se utiliza como combustible. Es un líquido incoloro como los otros alcoholes y es inflamable. Tiene un olor acre que se aprecia en las operaciones de concentración bajo como 3 ppm.

El isopropanol también se utiliza como disolvente industrial y en la gasolina como aditivo para tratar los problemas de agua o hielo en las tuberías de combustible; se produce típicamente a partir del propeno del petróleo en descomposición, pero también puede ser producido de la fermentación de azúcares; es comúnmente utilizado para la síntesis químicas como en la producción del biodiesel o un disolvente de todo el mundo.

Figura 15. Esquema de la materia prima y producción de biodiesel a partir de aceites usados según el laboratorio de procesos químicos y bioquímicos integrados, Universidad Complutense de Madrid

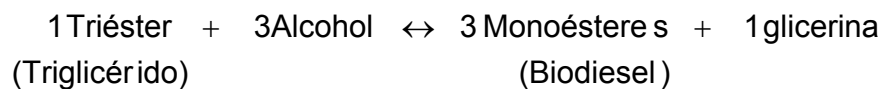


Fuente: bibliografía No. 11

2.2.2. Transesterificación del biodiesel

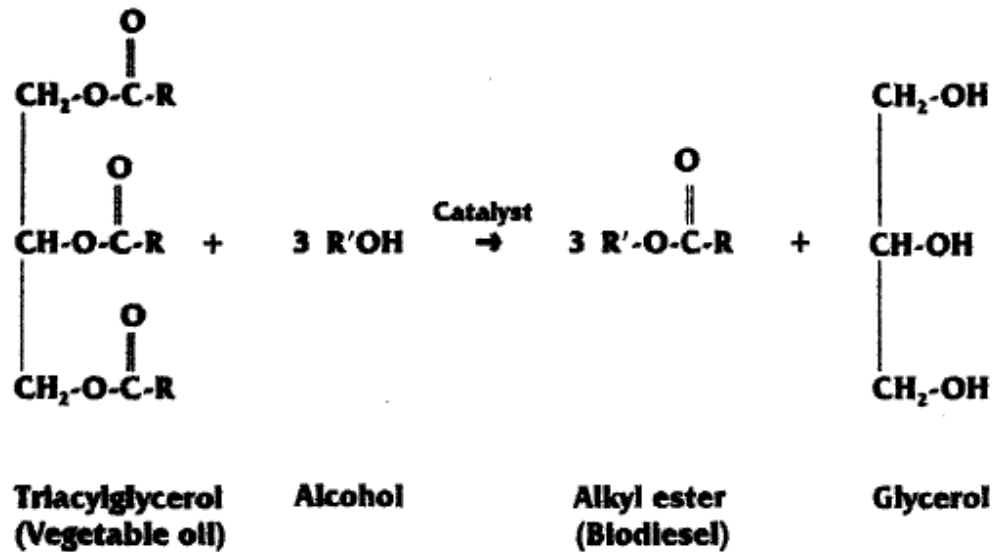
Al obtener el biodiesel los aceites vegetales y las grasas animales, están sujetas a una reacción química llamada transesterificación. En esta reacción los aceites vegetales y las grasas animales reaccionan en presencia de un catalizador que usualmente es una base, con un alcohol que la mayoría de veces es metanol, obteniendo el biodiesel y parientes de los aceites vegetales o grasas animales tales como el glicerol.

A continuación se presenta la reacción general de transesterificación.



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 $R-COO-C_2H_5$ y en el caso del isopropanol, las moléculas de biodiesel serán monoésteres isopropílicos del tipo $R-COO-C_3H_7$.

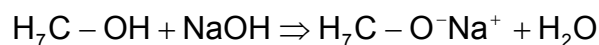
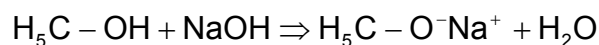
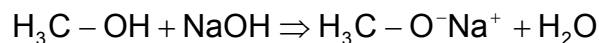
Figura 16. **Reacción de transesterificación general del biodiesel**



Fuente: referencia bibliográfica No. 4

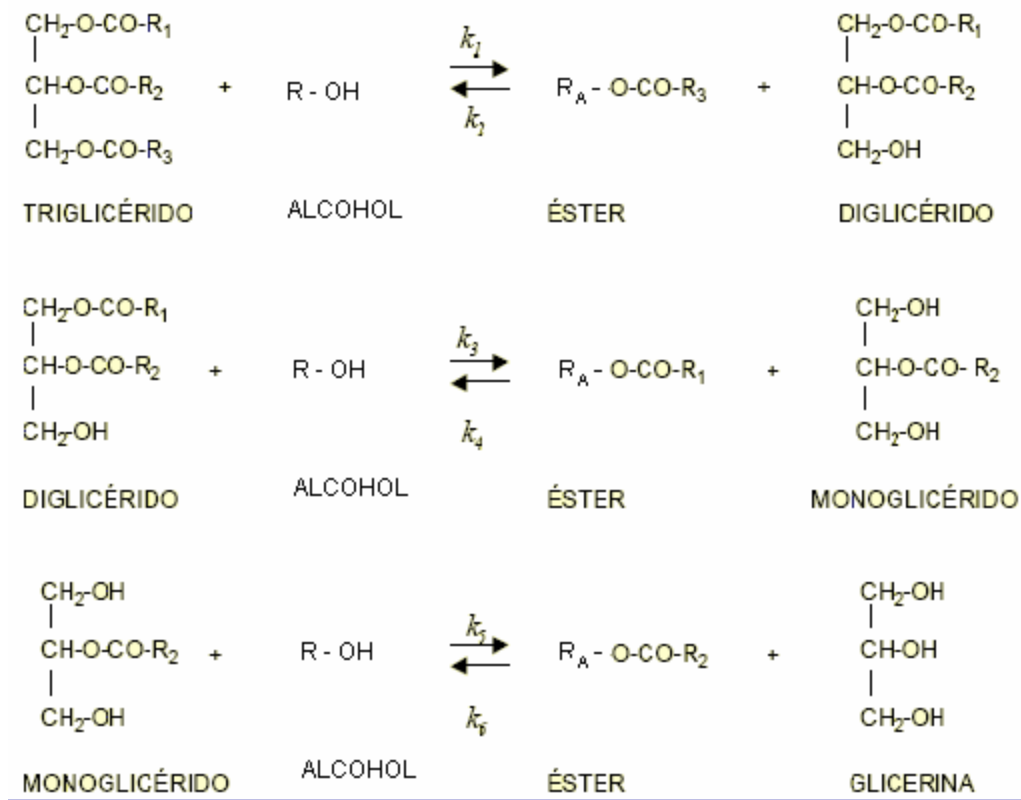
La reacción real ocurre en etapas, en primer lugar ocurre la formación de triglicérido, luego la formación de diglicérido, seguido de monoglicérido hasta llegar finalmente a la glicerina.

Al tener la participación del catalizador, en estos casos es comúnmente más utilizado un catalizador alcalino (NaOH o KOH), en donde ocurre la formación del metóxido de sodio o potasio, mezclando para esto metanol; si se mezclara etanol se formaría un etóxido de sodio o potasio o si fuera 2-propanol se formaría un 2-protóxido de sodio o potasio junto con el catalizador.



Obteniendo la siguiente reacción para la formación de la glicerina a partir de los grupos formados anteriormente:

Figura 17. **Mecanismo de reacción de la transesterificación de aceites vegetales.**



Fuente: bibliografía No. 8

La reacción de transesterificación es reversible, por lo que es necesario trabajar con exceso del alcohol a utilizar, 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% y siempre restan productos intermedios o laterales de la reacción, tales como: diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres (*FFA*). Esta es la razón por lo que es necesario hacer siempre la purificación del biodiesel antes de su

liberación para uso final. Como se trabaja con exceso del alcohol, es importante separar el alcohol del agua y reutilizarlo en el proceso.

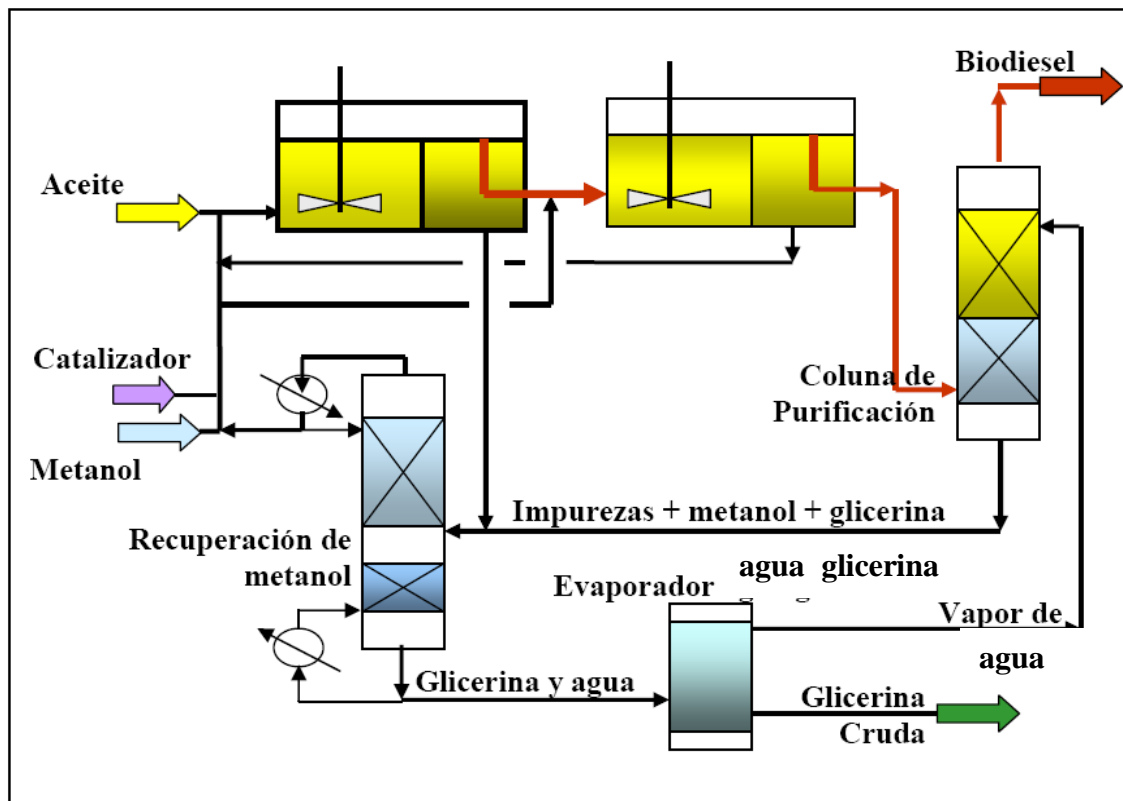
2.2.3. Proceso integrado de producción de biodiesel

En la figura 18 se muestra el proceso Lurgi de producción en flujo continuo de biodiesel. El 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.

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% y contiene las impurezas retenidas en el proceso.

Las características más interesantes del proceso Lurgi son: puede ser adoptado para muchas materias primas diferentes, opera a presión atmosférica y con temperatura alrededor de 60°C, 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%.

Figura 18. **Proceso Lurgi de producción continua**



Fuente: bibliografía No. 19

2.2.3.1. Factores del proceso de producción

Lo más importante en la producción de biodiesel es la integridad de la reacción de transesterificación. El proceso químico que se produce durante la reacción, proviene con la formación de los triglicéridos ésteres de glicerol y de alquilo que se producen con cada paso a partir de un ácido graso de éster de alquilo. Incluso después de completar la reacción de transesterificación, pequeñas cantidades de tri-, di-, y monoacilgliceroles permanecerá en el producto el biodiesel. La porción de glicerol de los acilgliceroles se refiere al glicerol del envoltente. Cuando el glicerol del envoltente se agrega al glicerol libre que queda en el producto, la suma es conocida como el glicerol total. Límites para el glicerol y el total del envoltente se incluyen Normalmente en las Normas de biodiesel. Por ejemplo: *ASTM D6751* requiere <0,24% de glicerol total biodiésel en el producto final, medida mediante una cromatografía de gases (GC) método descrito en *ASTM D6584*.

2.2.3.1.1. Glicerol libre

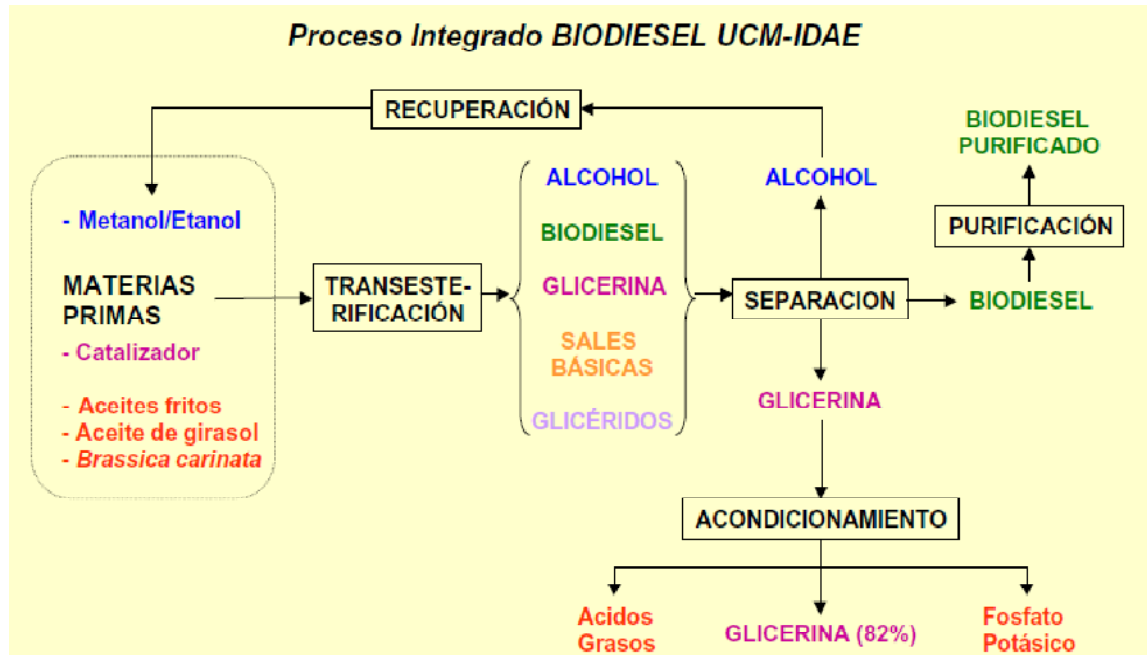
El glicerol es esencialmente insoluble en biodiesel de forma que casi todo el glicerol se elimina fácilmente por decantación o centrifugación. Glicerol libre puede permanecer ya sea como suspensión de gotitas o como la cantidad muy pequeña que se disuelve en el biodiesel. Los alcoholes pueden actuar como cosolventes para aumentar la solubilidad del glicerol en el biodiesel. La mayoría de glicerol se separa del producto de biodiesel durante el lavado con agua. El lavado con agua es generalmente muy bajo en glicerol libre, especialmente si el agua caliente se utiliza para lavar. El biodiesel destilado tiende a tener un mayor problema con el glicerol libre debido a que el glicerol es aplazado durante la destilación. El combustible con exceso de glicerol libre usualmente

tiene un problema en tanques de almacenamiento, creando una mezcla muy viscosa que puede tapar los filtros de combustible y provocar problemas de combustión en el motor.

2.2.3.1.2. Alcohol residual

Los alcoholes como el metanol, etanol e isopropanol, así como los catalizadores alcalinos son más solubles en el glicerol, la mayoría se eliminará cuando el glicerol se separa del biodiesel. Sin embargo, el biodiesel contiene típicamente 2-4% de metanol después de la separación, que pueden constituir hasta un 40% del exceso de metanol a partir de la reacción. La mayoría de los procesadores recuperará este metanol mediante un proceso de extracción al vacío. Cualquier metanol que queda después de este proceso de extracción debe ser removido por el agua mediante un proceso de lavado. Por lo tanto, el nivel de alcohol residual en el biodiesel debe ser muy baja. Un valor específico para el nivel admisible de alcohol se especifica en las Normas europeas de biodiesel (0,2% en la Norma *EN 14214*), pero no está incluido en la Norma *ASTM*; sin embargo, la especificación del punto de inflamación en los dos patrones limita el nivel de alcohol. Las pruebas demostraron que tan sólo el 1% de metanol en el biodiesel puede reducir su punto de inflamación de 170 ° C a <40 ° C. Por lo tanto, al incluir una especificación de un punto de inflamación de 130 ° C, la Norma *ASTM* limita la cantidad de alcohol a un nivel muy bajo (<0,1%).

Figura 19. **Análisis del proceso integrado del biodiesel según el laboratorio de procesos químicos y bioquímicos integrados, Universidad Complutense de Madrid**



Fuente: bibliografía No. 11

2.2.3.2. Factores de postproducción

2.2.3.2.1. Agua y sedimento

Estos dos temas son en gran parte los asuntos de cuidado para el biodiesel. El agua puede estar presente en dos formatos: como el agua disuelta o suspendida en gotitas. Aunque en general el biodiesel es insoluble en agua, en realidad ocupa considerablemente más agua que el combustible petrodiesel. El biodiesel puede contener hasta 1500 ppm de agua disuelta, mientras que el combustible diesel por lo general ocupa sólo ~ 50 ppm. Las Normas para el

combustible diesel (*ASTM D 975*) y el biodiesel (*ASTM D 6751*) limitan la cantidad de agua a 500 ppm. Para el combustible petrodiesel, este hecho permite que exista una pequeña cantidad de agua en suspensión. Sin embargo, el biodiesel debe mantenerse seco, este es un desafío porque muchos tanques de almacenamiento de diesel tienen agua en el fondo debido a la condensación. Suspendida el agua es un problema en los equipos de inyección de combustible, ya que contribuye a la corrosión de las partes en estrecha conexión en el sistema de inyección de combustible. El agua también puede contribuir al crecimiento microbiano en el combustible. Este problema puede ocurrir tanto en el biodiesel y el petrodiesel y puede dar lugar a ácidos y lodos de combustible que podrá tapar los filtros de combustible. Los sedimentos pueden consistir en partículas de suciedad o pueden ser, originarias del combustible como compuestos insolubles formados durante la oxidación de los combustibles.

2.2.3.2.2. Estabilidad al almacenamiento

Se refiere a la capacidad del combustible para resistir los cambios químicos durante el almacenamiento a largo plazo, es un problema importante con el biodiesel para que no exista la formación de humedad dentro del producto, ya que este debe mantenerse seco. El contacto con el aire, estabilidad a la oxidación y agua (estabilidad hidrolítica), son los principales factores que afectan la estabilidad de almacenamiento. La oxidación es por lo general acompañada por un aumento en el índice de acidez y la viscosidad del combustible, a menudo, estos cambios van acompañados de un oscurecimiento del color de biodiesel, a partir de color amarillo a marrón y el desarrollo a un olor de una "pintura".

2.2.4. Calidad de biodiesel

Todas las instalaciones de producción de biodiesel deben estar equipados con un laboratorio, para que la calidad del producto final de biodiesel pueda ser controlado. También es importante controlar la calidad de las materias primas, que a menudo pueden ser limitados al valor de acidez y el contenido de agua, pruebas que no son demasiadas caras. Otra estrategia utilizada por muchos productores es extraer una muestra de aceite (o alcohol) de cada entrega para producir biodiesel en el laboratorio. Esta prueba puede ser bastante rápida (1-2 h) y puede indicar si los problemas graves se pueden producir en la planta.

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.

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

Tabla II. Especificaciones de Biodiesel del RTCA

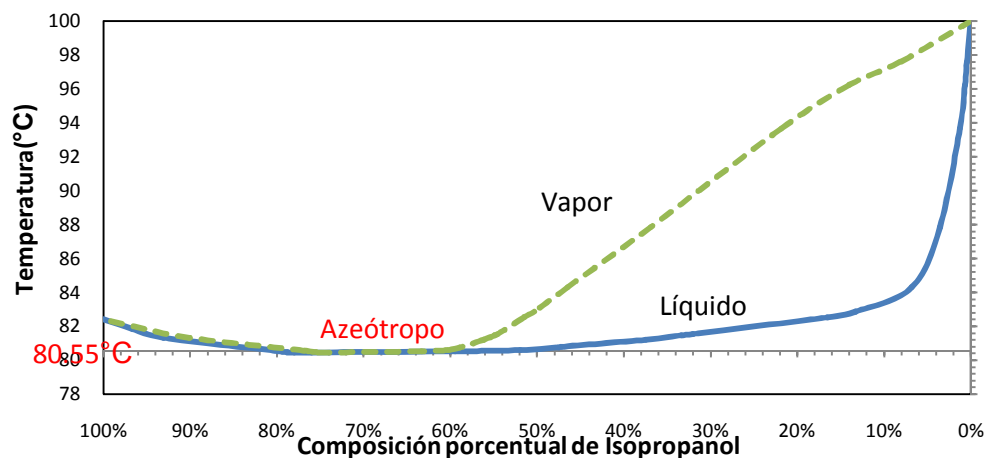
Especificaciones ASTM D 6751 para Biodiesel			
Características	Unidades	Método de análisis	Valores
Aditivos	-----	-----	Reportar
Contenido de ésteres	*(% masa)	EN 14103	96.5 mín.
Contenido de metanol, etanol o isopropanol	*(% masa)	EN 14110	0.20 máx.
Gravedad API a 15,56 °C (60 °F) o densidad a 15 °C	°API kg/m ³	ASTM D-287 ASTM D-1298	Reportar
Estabilidad a la oxidación, 110 °C	h	EN 14112	6.0 mín.
Punto de inflamación (“flash point”)	°C	ASTM D 93	130.0 mín.
Agua y sedimentos	**(% volumen)	ASTM D 2709	0.050 máx.
Viscosidad cinemática a 40 °C.	mm ² /s	ASTM D 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. Alcohol isopropílico

El alcohol isopropílico es comúnmente conocido como isopropanol o IPA; es un alcohol secundario debido a que es un isómero del propanol. Es uno de los alcoholes más importantes, ya que sirve como reactivo en la síntesis de varios compuestos orgánicos, tales como la acetona, el peróxido de hidrógeno y actualmente en la producción de biodiesel. También se utiliza como desinfectante en aplicaciones médicas, en la hidrogenación de azúcar y gelatina, en la industria alimentaria y como disolvente de limpieza en la industria de circuitos electrónicos. La mezcla de isopropanol (80%) y agua (20%) causa problemas ya que debido al agua, la reacción química de obtención de biodiesel es incompleta, se forman emulsiones, y la recuperación del alcohol es más difícil, debido a que se forma un azeótropo que se forma en las proporciones en peso anteriormente descritas. Un azeótropo negativo representa la mezcla de punto de ebullición máximo, siendo en este caso a 80.55°C según la figura 20.

Figura 20. Diagrama líquido-vapor del sistema isopropanol-agua a una presión constante de 101.3 kPa



Fuente: John H. Perry. Manual del ingeniero químico. Pág. 13-15

Tabla III. **Propiedades físicas y químicas del isopropanol**

General	
Otros nombres	2-Propanol Alcohol isopropílico Isopropanol Dimetil carbinol Alcohol propílico secundario Alcohol seudopropílico
Fórmula semidesarrollada	CH ₃ CH(OH)CH ₃
Fórmula molecular	C ₃ H ₈ O
Propiedades físicas	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Incoloro
Densidad	786,3 kg/m ³ ; 0.7863 g/cm ³
Masa molar	60.09 g/mol
Punto de fusión	185 K (-87,9 °C)
Punto de ebullición	355 K (82,4 °C)
Temperatura crítica	508 K (°C)
Viscosidad	2,86 cP a 288 K (15 °C) 2,08 cP a 298 K (25 °C) 1,77 cP a 303 K (30 °C)
Índice de refracción	1,3756 (20 °C)
Propiedades químicas	
Momento dipolar	1,66 D
Peligrosidad	
Punto de inflamabilidad	285 K (12 °C)

Fuente: elaboración propia

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Variables independientes

- Cantidad porcentual en composición del soluto isopropanol 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 isopropanol)
- 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, ubicado en el edificio T-5, en un tiempo aproximado de dos meses.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Wendy Lissette Serrano Mejía

Asesor: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Reactivos

- Biodiesel obtenido de aceites de frituras utilizado en restaurantes Pollo Campero (comprado en industrias Toledo)
- Isopropanol anhídrido (comprado en Química Técnica)
- Agua desmineralizada

3.4.2. Equipo

- Balanza analítica: Marca: OHAUS
 Modelo: Adventurer, AR1530
 Máxima capacidad: 150 g
 Mínimo valor de medición: 0.001 g
 Voltaje: 8 – 14.5 v
 Potencia: 6 w

Figura 21. **Balanza analítica OHAUS**



Fuente: elaboración propia

- Plancha de calentamiento marca: SYBRON/Thermolyne
con agitación: Modelo: Nuova II, SP18425
Voltaje: 120 v
Amperios: 7.5 A
Potencia: 80 w

Figura 22. **Plancha de calentamiento con agitación SYBRON**



Fuente: elaboración propia

- Refractómetro: Marca: Abbe
Modelo: 32200
Rango de temperatura: 0 a 70 °C
Precisión: ± 0.0002
Rango de medición: 1.3000 – 1.7000

Figura 23. **Refractómetro Abbe**



Fuente: elaboración propia

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
- Picnómetro de 10 ml
- Picnómetro de 1 ml
- Termómetro [0-100 °C]
- Ampolla de decantación de 250 y 500 ml

3.4.4. Material de laboratorio

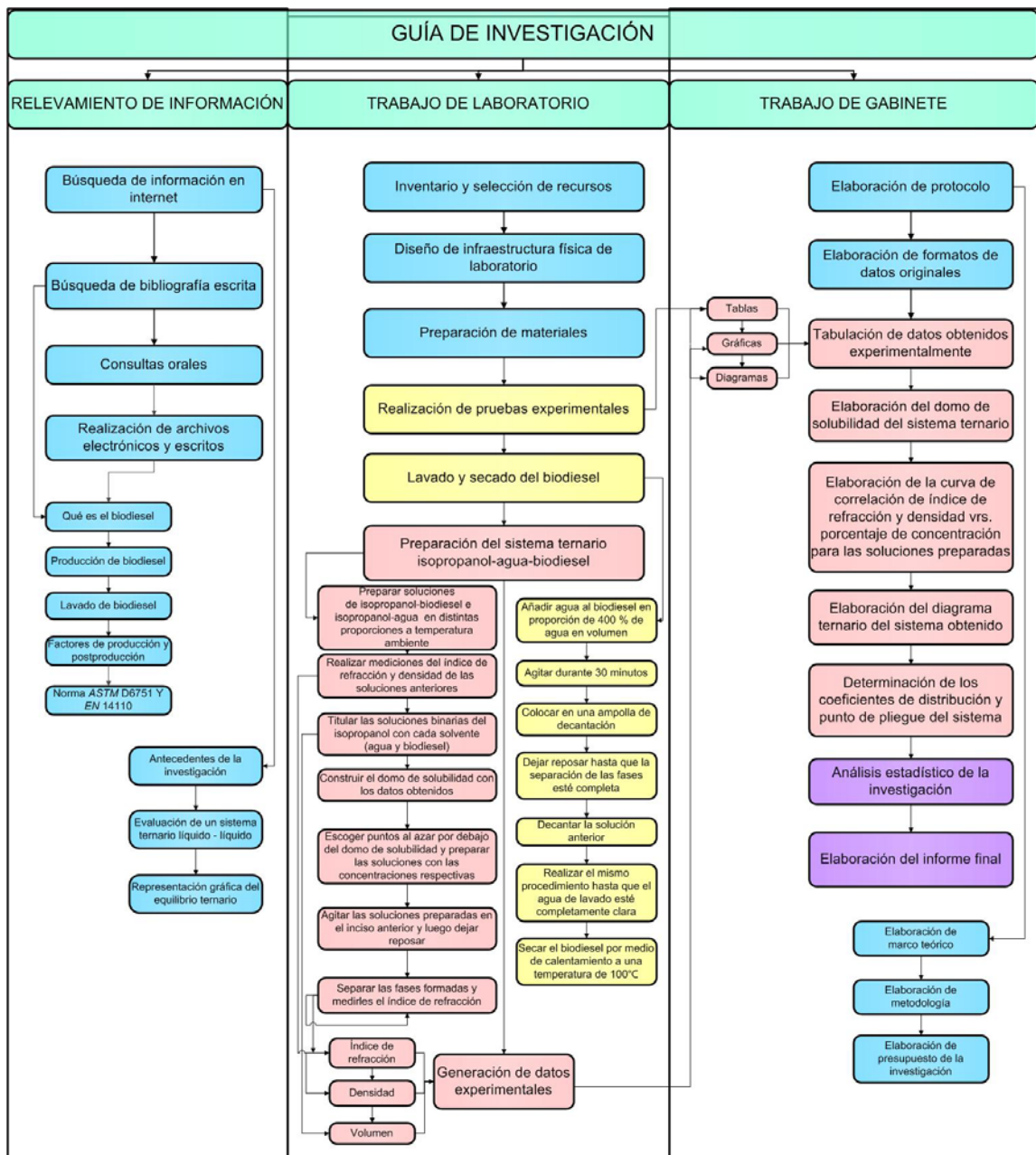
- Pizetas de polietileno de 125 ml
- Soportes universales
- Anillos metálicos para ampollas de decantación
- Agitador magnético
- Pinzas metálicas para buretas

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

El estudio se basó en una observación de los datos, en recabar experimentalmente mediante pruebas de laboratorio para identificar el tipo de sistema ternario al cual pertenece, todo esto conlleva a las técnicas de la observación, inducción, deducción y evaluación de los datos obtenidos en el laboratorio, para formar dicho sistema; lo cual define que la técnica a utilizar para dicho estudio es cualitativa, debido a que es una investigación subjetiva,

exploratoria, inductiva y descriptiva que comprende los datos mediante un análisis exhaustivo y diverso.

Figura 24. **Flujograma que presenta la metodología de un proceso de extracción líquido – líquido**



Fuente: elaboración propia

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para determinar el equilibrio líquido-líquido del sistema isopropanol-biodiesel-agua, el cual se trabajó a una temperatura ambiente, se prepararon soluciones de isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel a diferentes porcentajes en peso.

Las soluciones que se prepararon fueron sujetas a un análisis de densidad, índice de refracción y titulación con solvente puro para la distribución de soluto en los solventes al equilibrio de inmiscibilidad.

La densidad se determinó a partir de picnometría, evaluando el volumen total de mezcla del solvente mixto, con respecto a la concentración de las especies químicas que se estudiaron en el trabajo experimental, y también se estudió el índice de refracción con respecto a dichas concentraciones.

Por medio de la titulación se formó la curva de solubilidad del sistema en el diagrama ternario, para la formación de las curvas de unión, se realizó un estudio que se basó en el diseño experimental de forma factorial, consistió en la asignación de los tratamientos en estudio a las unidades experimentales, con el propósito de asegurar que un determinado tratamiento no presente sesgo. Por otro lado, la aleatorización hace válidos los procesos de inferencia y las pruebas estadísticas.

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) Se ajustó la escala del refractómetro;
- b) Se comprobó que el prisma estuviera limpio. Utilizando una pipeta para aplicar la muestra líquida al prisma. Se tuvo cuidado de no tocar el prisma con el extremo de la pipeta, esto puede rasguñar el cristal suave del prisma;
- c) Se colocó de 2 a 3 gotas de solución en el centro de la superficie del prisma;
- d) Se cerró cuidadosamente el prisma secundario;
- e) Se encendió la lámpara usando el interruptor en el lado izquierdo, ajustando la lámpara para asegurar el brillo adecuado en el prisma de medición;
- f) 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;
- g) Se giró la perilla de medición alineando la línea delimitadora con las líneas de intersección (ajuste claro y oscuro al centro);

- h) Se movió la palanca de la parte inferior izquierda, leyendo en la escala superior el índice de refracción 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. Se agregó agua al biodiesel en proporción de 400% de agua en volumen;
- b. Se agitó durante 30 minutos;
- c. Se colocó la solución anterior en una ampolla de decantación;
- d. Se dejó reposar hasta que la separación de las fases estuvo completa;
- e. Se decantó la solución del inciso anterior;
- f. Se realizó el mismo procedimiento hasta que el agua de lavado estuviera completamente clara;
- g. Se eliminó el agua del biodiesel por medio de calentamiento a temperatura de ebullición del agua durante 10 minutos agitando constantemente.

Figura 25. **Detalle de la unidad de lavado de biodiesel**



Fuente: bibliografía No. 6, pág. 143

Figura 26. **Detalle de la unidad de separación del agua de lavado del biodiesel**



Fuente: bibliografía No. 6, pág. 143

Figura 27. **Detalle de la unidad de secado de biodiesel**



Fuente: bibliografía No. 6, pág. 144

3.6.3. Procedimiento experimental para el sistema líquido-líquido isopropanol-biodiesel-agua a una temperatura ambiente

Isopropanol-agua

- a) Se prepararon soluciones de isopropanol en agua en proporciones de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 85, 95% en volumen;
- b) Se tomaron tres alícuotas de cada solución y se midió el índice de refracción;
- c) Se tomaron tres alícuotas de cada solución y se midió la densidad por medio de un picnómetro;
- d) Se tomaron tres alícuotas de 3 ml de cada solución y se agregó biodiesel lentamente, manteniendo la temperatura y agitación constante, hasta que se completaron dos fases. Se anotó el volumen requerido;
- e) Se construyó el domo de solubilidad para los datos obtenidos en los incisos anteriores;
- f) Se escogieron 6 puntos al azar por debajo del domo de solubilidad y 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 min;
- h) Se separaron las dos fases formadas en el inciso (g) de cada solución y se midió el índice de refracción.

Isopropanol-biodiesel

- a) Se prepararon soluciones de isopropanol en biodiesel en proporciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100% en volumen;
- b) Se tomaron tres alícuotas de cada solución y se midió el índice de refracción;

- c) Se tomaron tres alícuotas de cada solución y se midió la densidad por medio de un picnómetro;
- d) Se tomaron tres alícuotas de 3 ml de cada solución y se agregó agua lentamente, manteniendo la temperatura y agitación constante, hasta completar dos fases. Se anotó el volumen requerido;
- e) Se construyó el domo de solubilidad para los datos obtenidos en los incisos anteriores;
- f) Se escogieron 6 puntos al azar por debajo del domo de solubilidad y 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 min;
- h) Se separaron las dos fases formadas en el inciso (g) de cada solución y se midió el índice de refracción.

Figura 28. Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a temperaturas ambiente



Fuente: bibliografía No. 6, pág. 146

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

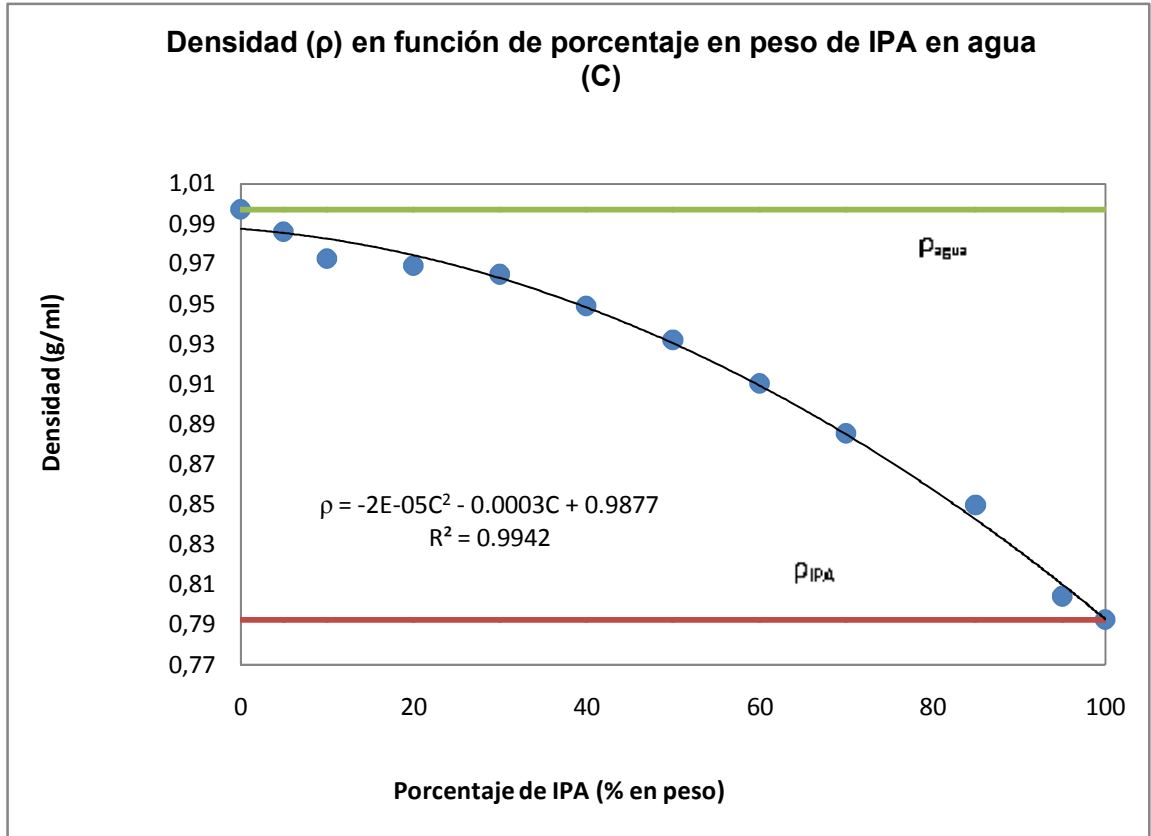
Los datos y resultados obtenidos experimentalmente de las soluciones de isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel a temperatura ambiente, se ordenaron en tablas y gráficas con base en lo especificado en el protocolo del trabajo de graduación.

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).

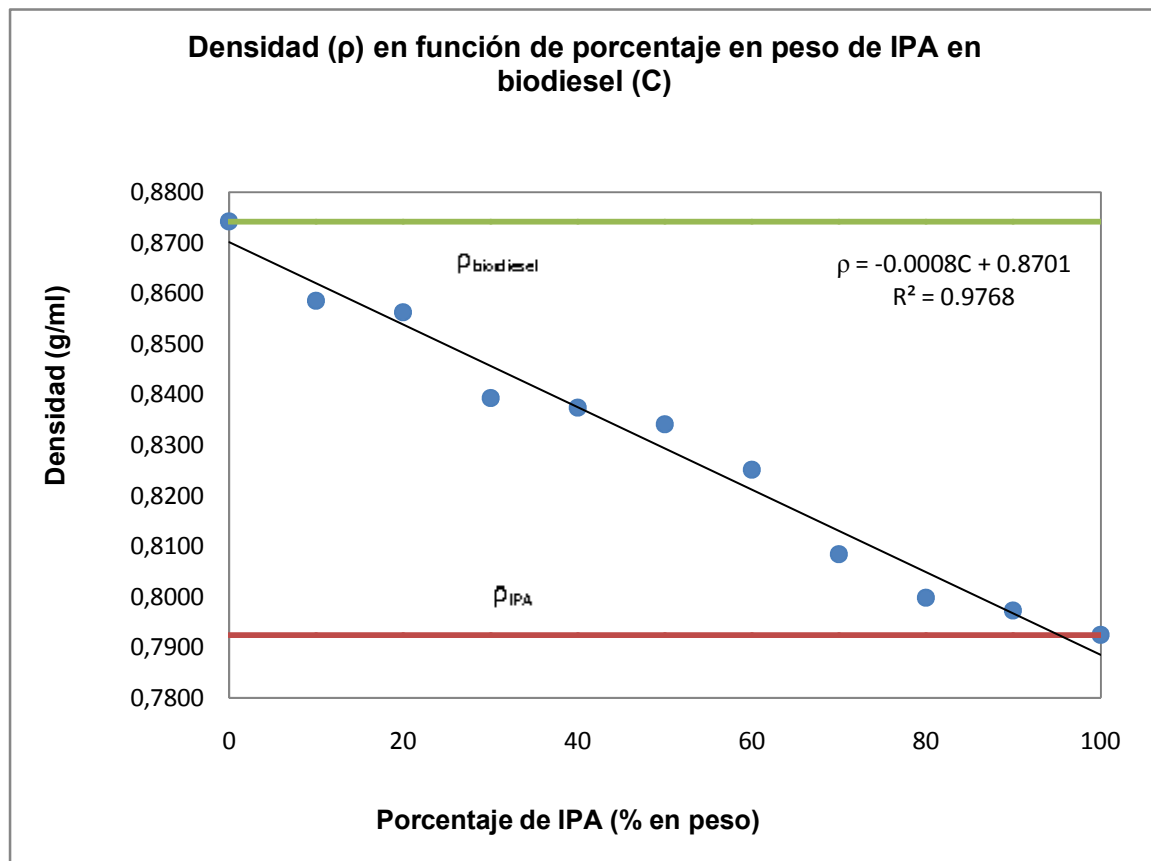
4. RESULTADOS

Figura 29. Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria isopropanol-agua a $24\pm 1^\circ\text{C}$



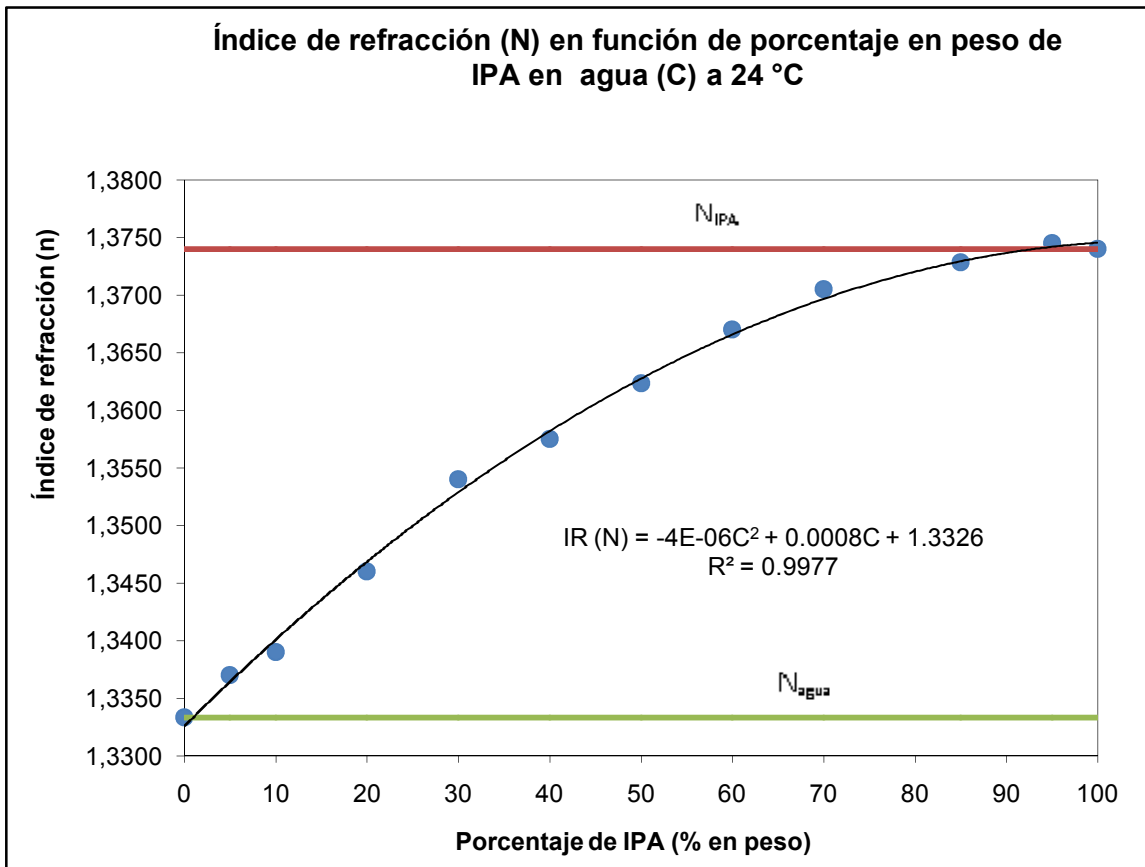
Fuente: elaboración propia

Figura 30. Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria isopropanol-biodiesel a $24\pm 1^\circ\text{C}$



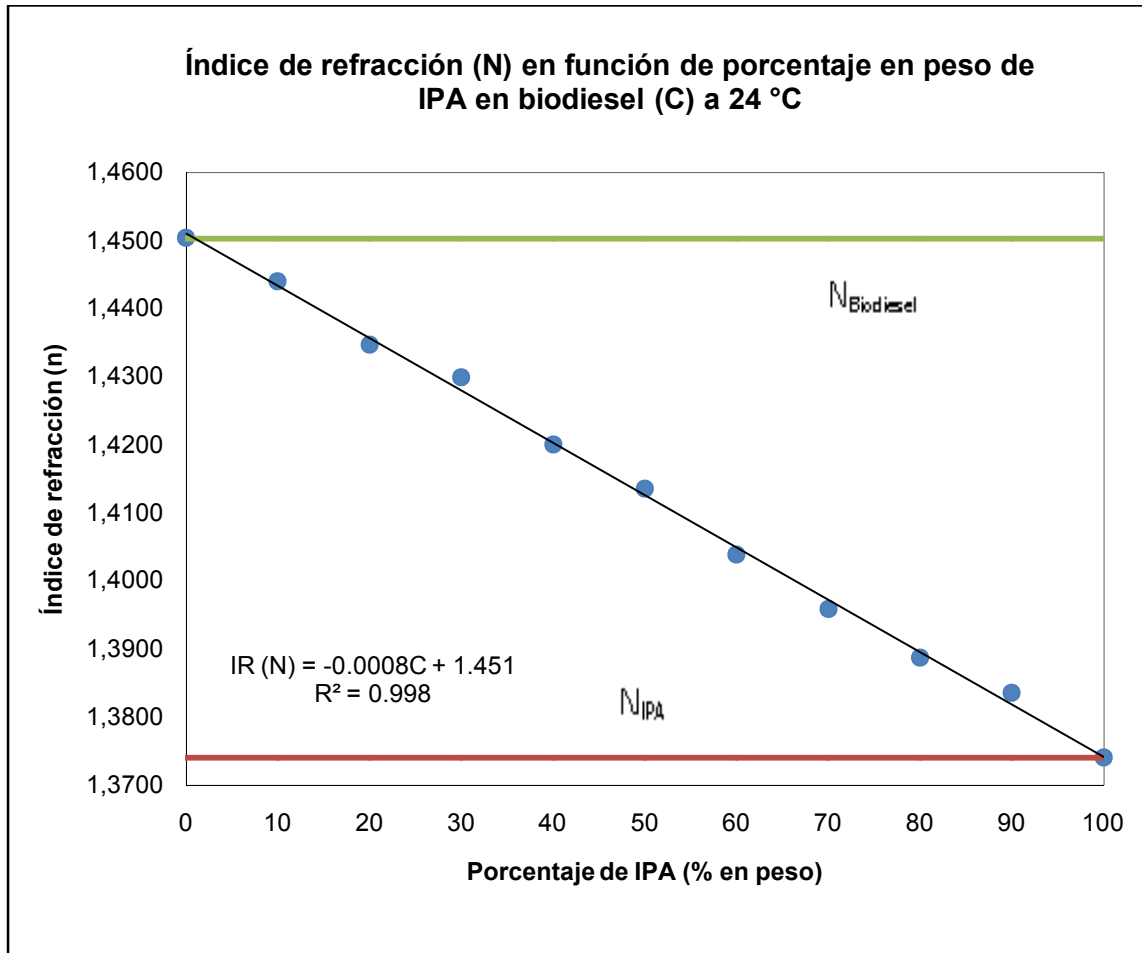
Fuente: elaboración propia

Figura 31. **Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria isopropanol-agua a $24\pm 1^\circ\text{C}$**



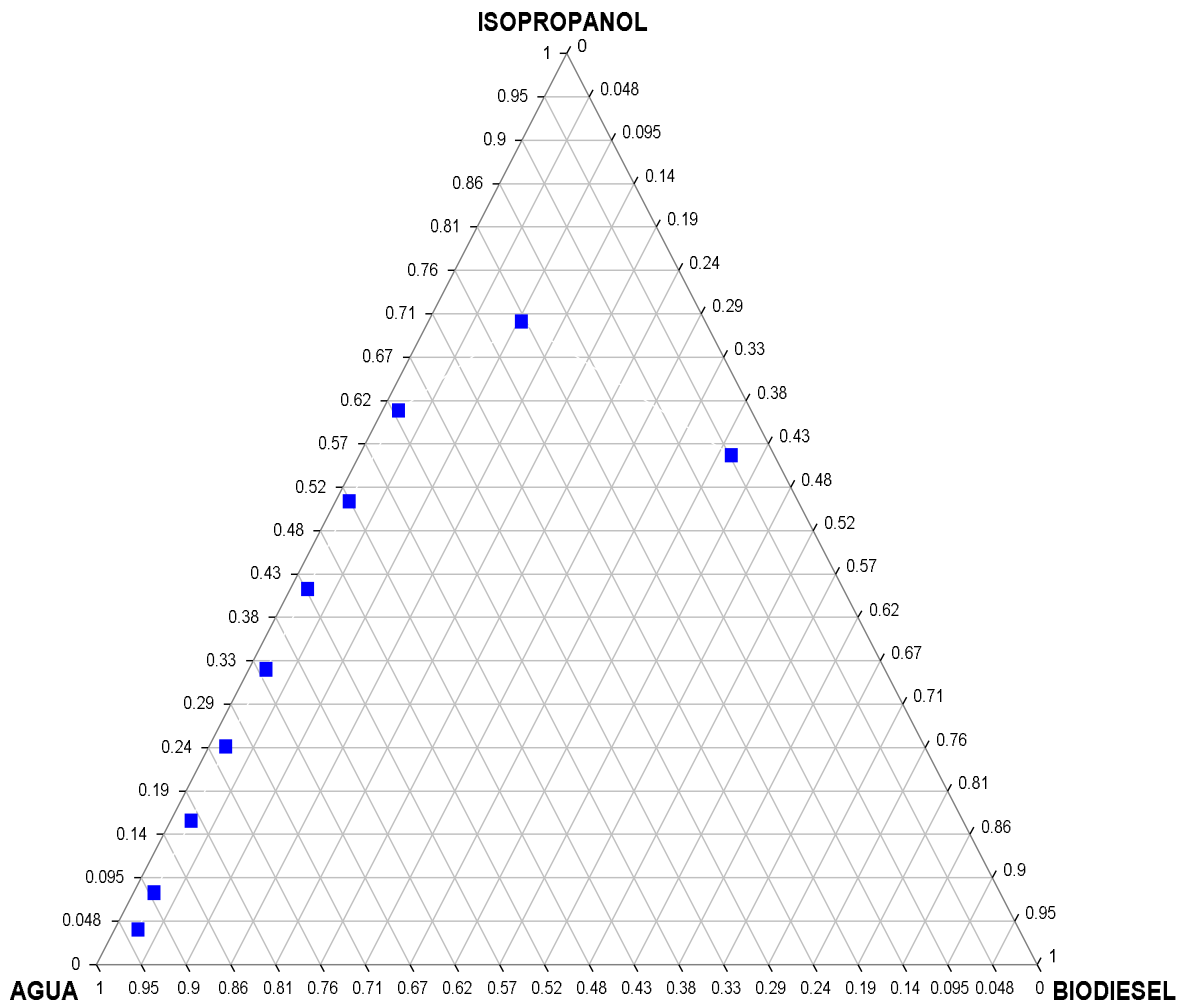
Fuente: elaboración propia

Figura 32. Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria isopropanol-biodiesel a 24±1°C



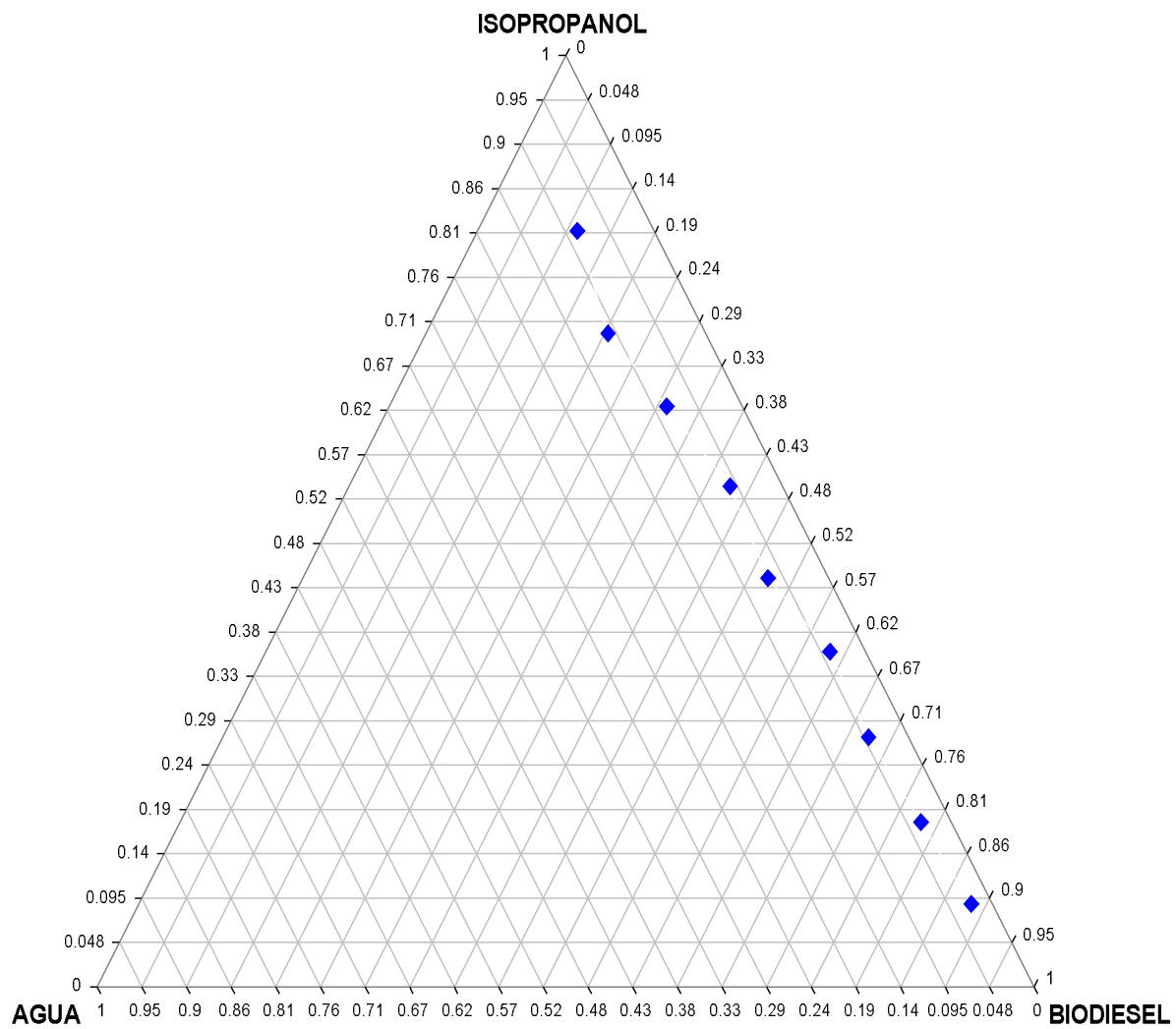
Fuente: elaboración propia

Figura 33. **Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad en fracción mol, obtenidos para el sistema isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones isopropanol-agua, mediante la adición de biodiesel a $24\pm 1^\circ\text{C}$**



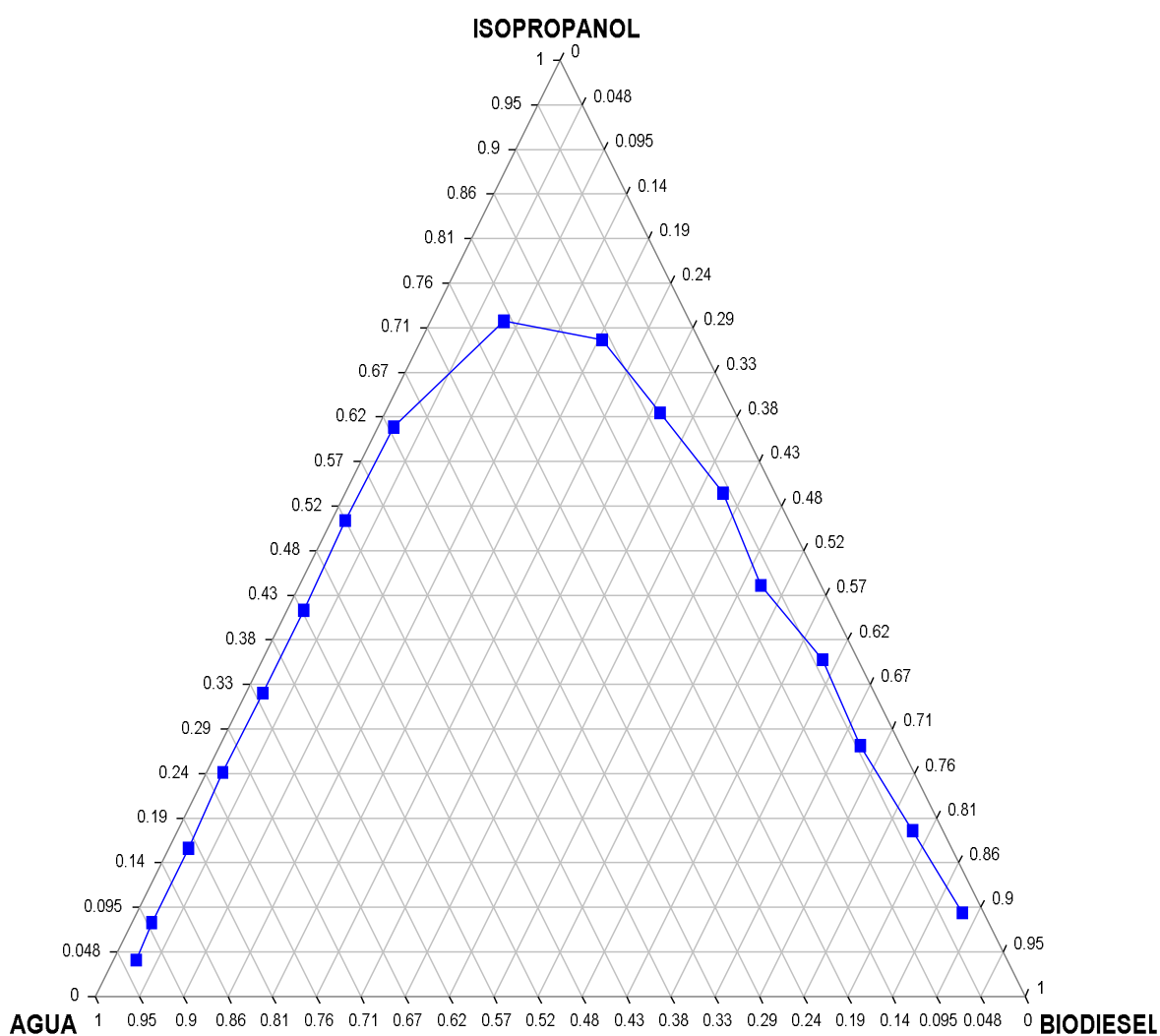
Fuente: elaboración propia

Figura 34. **Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad en fracción mol, obtenidos para el sistema isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones isopropanol-biodiesel, mediante la adición de agua a $24\pm 1^\circ\text{C}$**



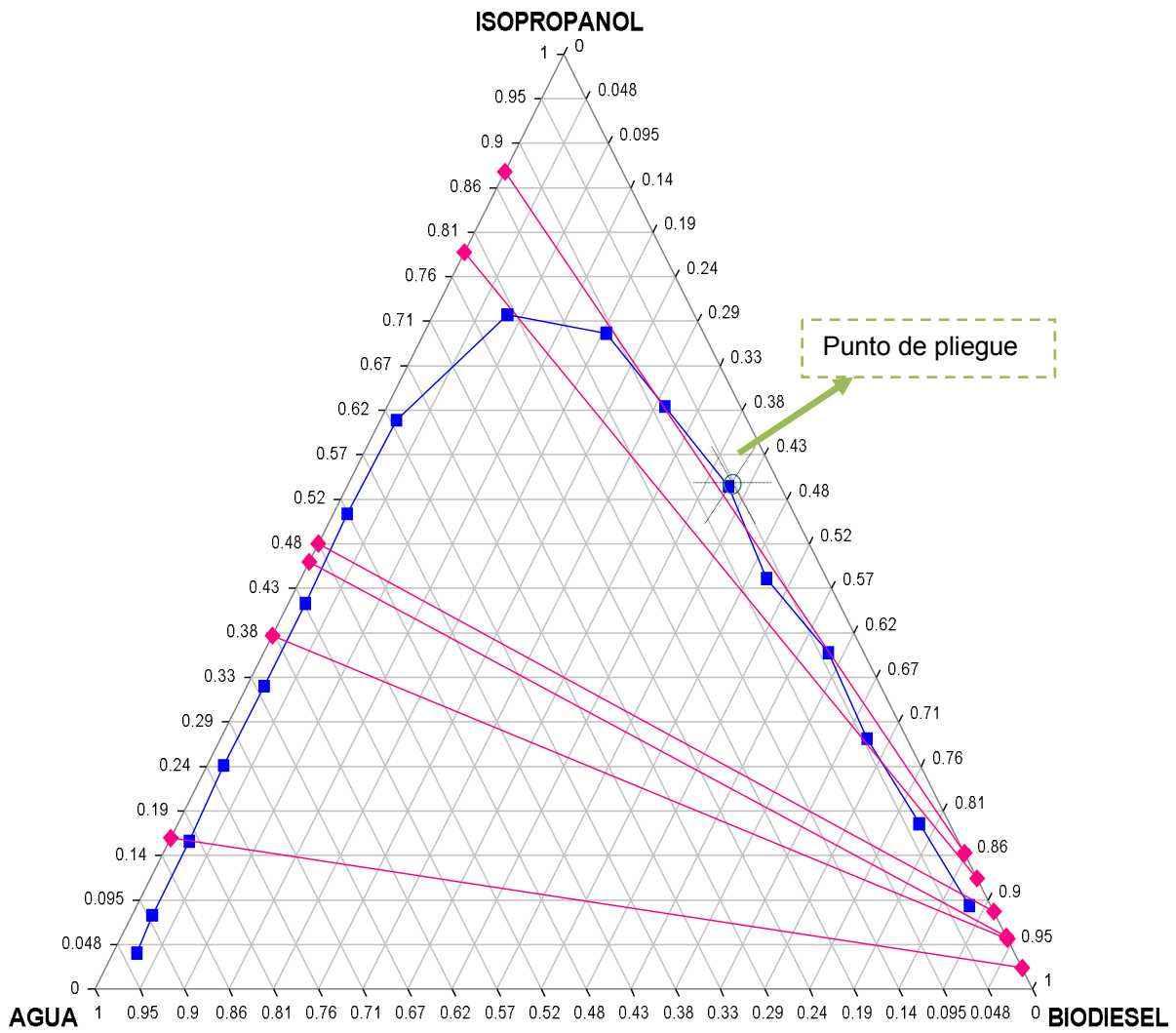
Fuente: elaboración propia

Figura 35. **Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad tipo I en fracción mol, obtenidos para el sistema isopropanol-biodiesel-agua a $24\pm 1^\circ\text{C}$**



Fuente: elaboración propia

Figura 36. Domo de solubilidad tipo I de los datos experimentales en fracción mol para el sistema isopropanol-biodiesel-agua a $24\pm 1^\circ\text{C}$



Fuente: elaboración propia

Tabla IV. **Composición del punto de pliegue en el sistema isopropanol-biodiesel-agua a $24\pm 1^\circ\text{C}$**

Reactivo	Proporción
Isopropanol	54%
Biodiesel	41%
Agua	5%

Fuente: apéndice 4

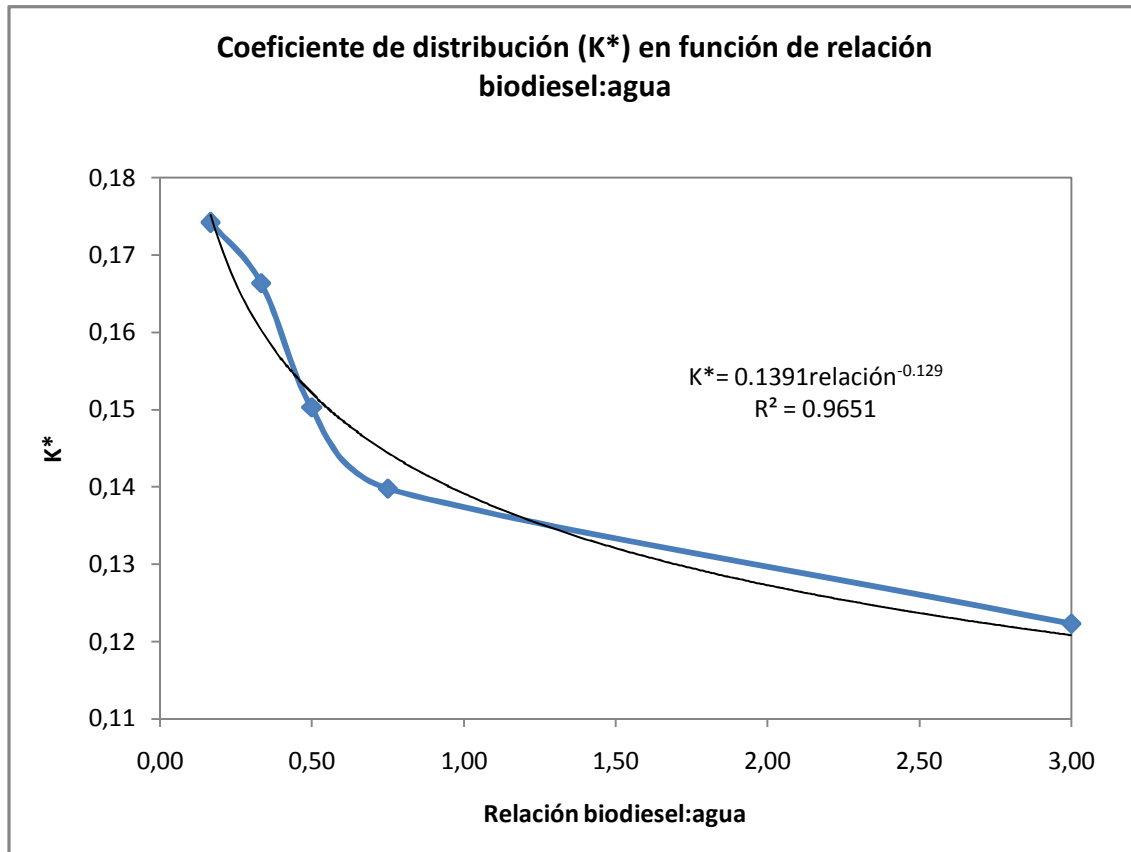
Tabla V. **Valores de los coeficientes de distribución (K) obtenidos a partir del coeficiente, entre el porcentaje de isopropanol distribuido en la fase de biodiesel y el porcentaje de isopropanol distribuido en la fase acuosa a $24\pm 1^\circ\text{C}$**

Muestra	AGUA (%)	BIODIESEL (%)	IPA (%)	K*
1	60	10	30	0.1742
2	30	10	60	0.1664
3	60	30	10	0.1503
4	40	30	30	0.1398
5	20	30	50	0.1423
6	20	60	20	0.1223

Fuente: datos calculados, apéndice 3

* $K = \frac{\% \text{ de IPA en fase biodiesel}}{\% \text{ de IPA en fase acuosa}}$

Figura 37. **Curva de correlación de los coeficientes de distribución (K) obtenidos en función de la relación biodiesel: agua utilizada para cada una de las seis muestras a 24±1°C**

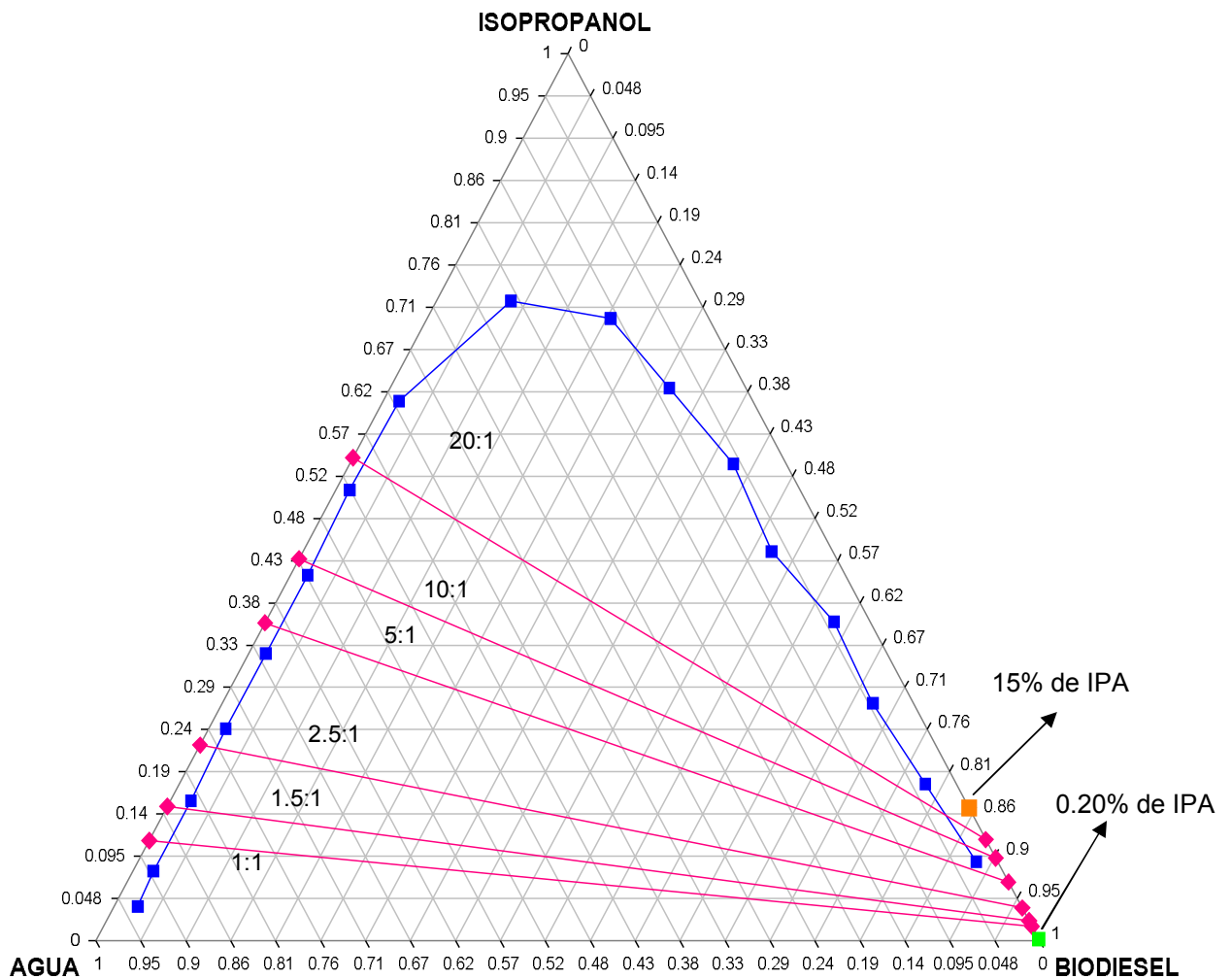


Fuente: elaboración propia

- ✓ **Coeficiente de partición correspondiente al punto de pliegue a 24±1°C.**

$$K^* = 0.1060$$

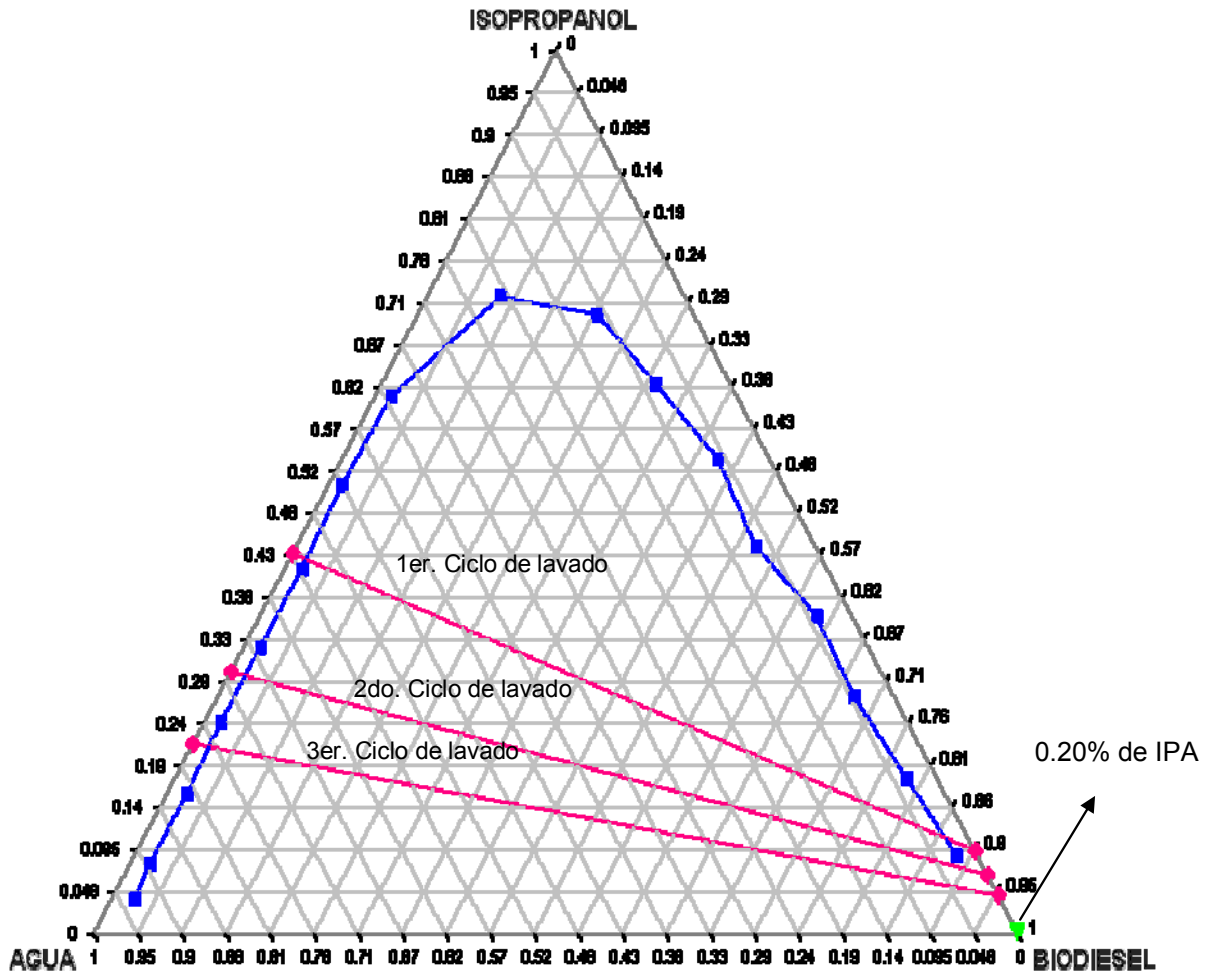
Figura 38. Líneas de amarre para distintas relaciones de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de isopropanol en biodiesel, según la Norma EN 14214 para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol, con agitación constante a 400 rpm durante 25 minutos a la temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$ (primer ciclo de lavado)



Fuente: elaboración propia

NOTA: Los datos experimentales expresados en la fig. 39 son datos dados en fracción mol.

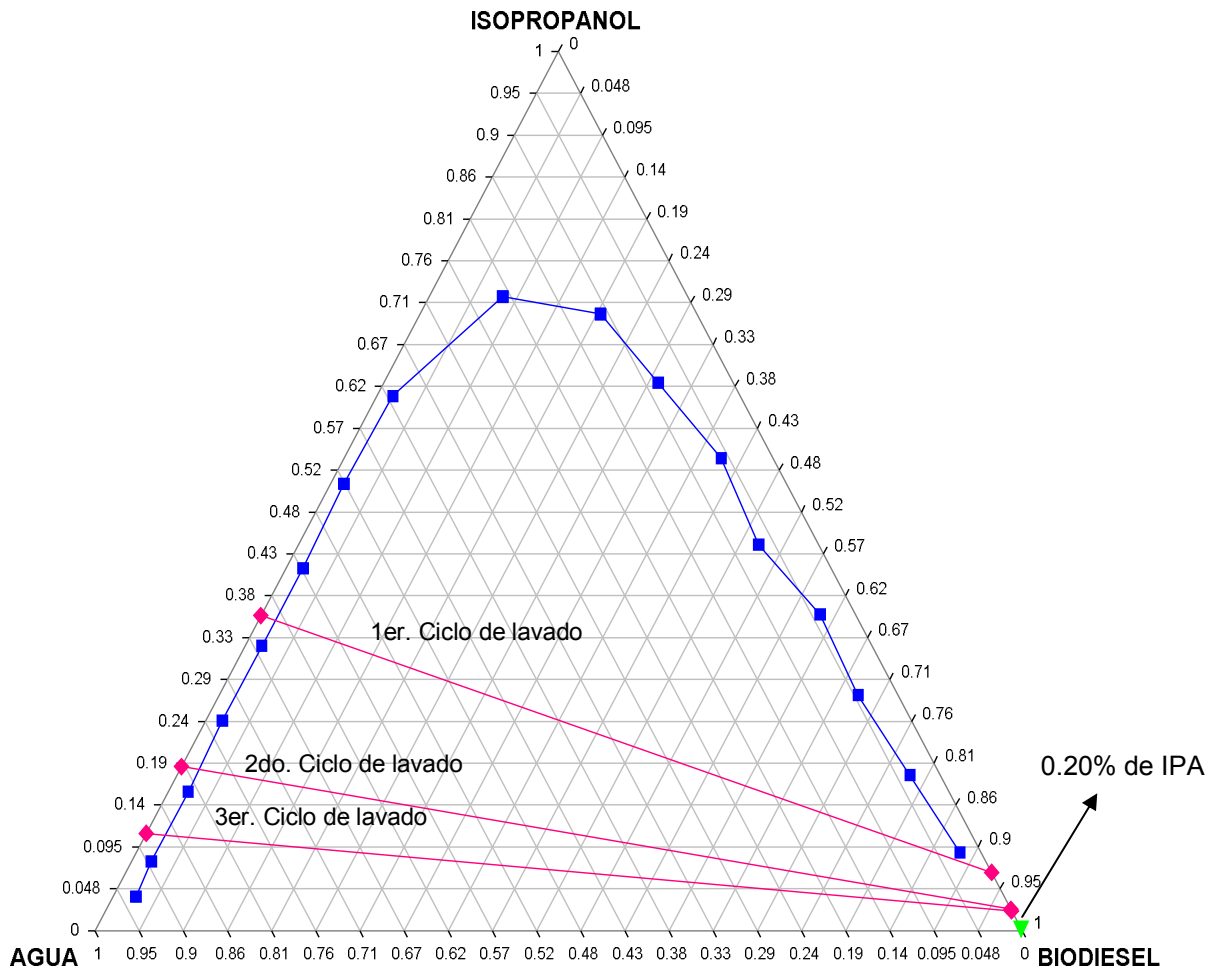
Figura 39. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 10:1 de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de isopropanol en biodiesel, según la Norma EN 14214 para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol, con agitación constante a 400 rpm durante 25 minutos a la temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$



Fuente: elaboración propia

NOTA: Los datos experimentales expresados en la figura 41 son datos dados en fracción mol.

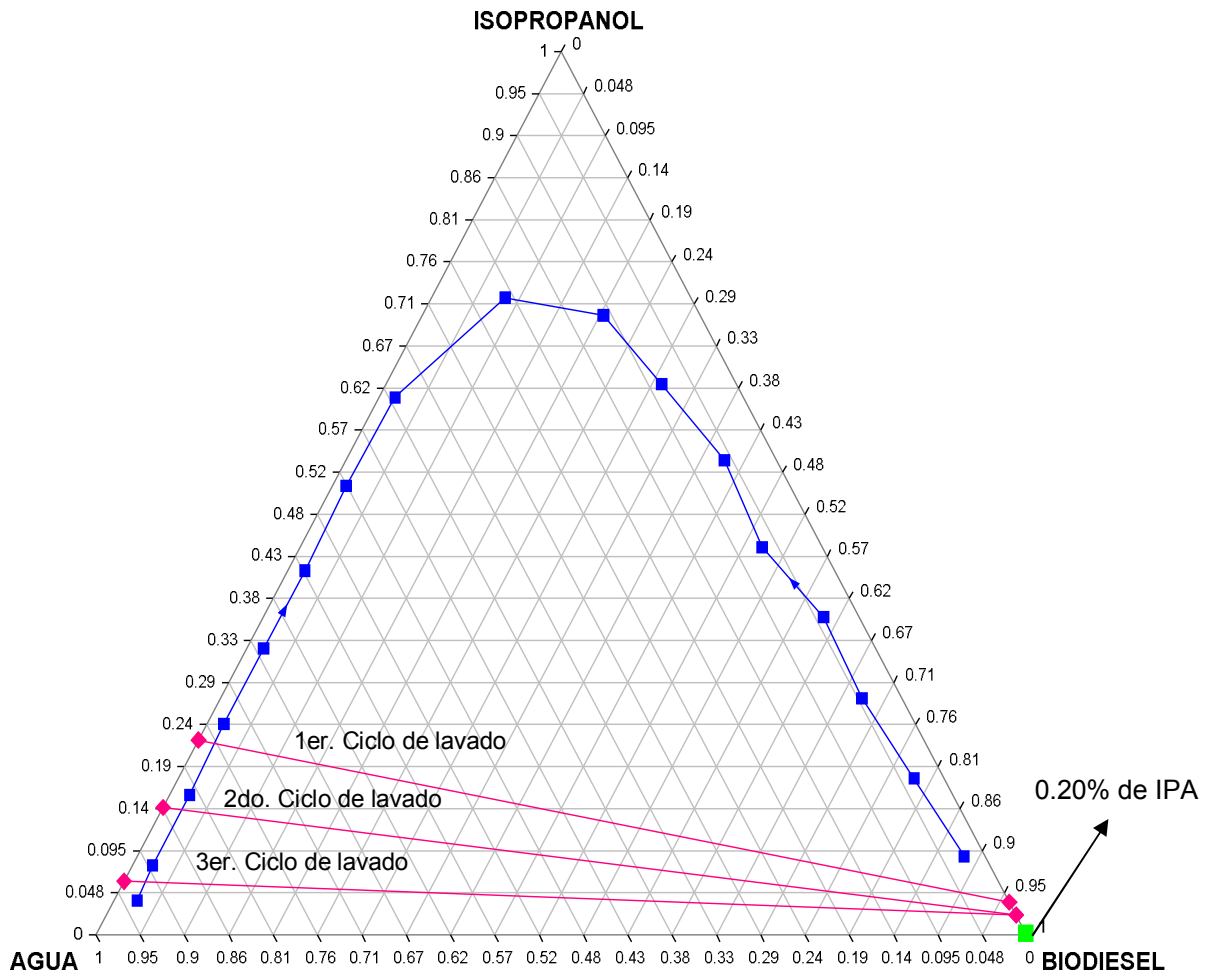
Figura 40. **Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 5:1 de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de isopropanol en biodiesel, según la Norma EN 14214 para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol, con agitación constante a 400 rpm durante 25 minutos a la temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$**



Fuente: elaboración propia

NOTA: Los datos experimentales expresados en la figura 41 son datos dados en fracción mol.

Figura 41. Líneas de amarre para los distintos ciclos de lavado en la relación 2.5:1 de mezcla biodiesel: agua en el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de isopropanol en biodiesel, según la Norma EN 14214, para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol, con agitación constante a 400 rpm durante 25 minutos a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$



Fuente: elaboración propia

NOTA: Los datos experimentales expresados en la figura 42 son datos dados en fracción mol.

- ✓ **Concentración final de isopropanol en el biodiesel utilizado, trabajando a una relación de 5:1 y 2.5:1 de mezcla biodiesel: agua al tercer ciclo de lavado con agua**

$$\% \text{Isopropanol} = 2.2550\%$$

Tabla VI. Resultado del análisis de varianza de un factor con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de isopropanol en agua a $24 \pm 1^\circ\text{C}$

Propiedades	CDM_d	CDM_e	F_{9,20}	F_{c9,20}	F>F_c	Conclusión
Índice de refracción	1.389E-07	0.002571	18513.13	2.8400	Si	Existe diferencia significativa
Volumen de biodiesel adicionado	0.06604	2.70011	40.88318	2.8400	Si	Existe diferencia significativa

Fuente: análisis estadístico ANOVA, apéndice 5

Tabla VII. **Resultado del análisis de varianza de un factor con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema isopropanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de isopropanol en biodiesel a $24\pm 1^\circ\text{C}$**

Propiedades	CDM _d	CDM _e	F _{9,20}	F _{c9,20}	F>F _c	Conclusión
Índice de refracción	1.583E-06	0.006517	4115.869	2.8400	Si	Existe diferencia significativa
Volumen de biodiesel adicionado	0.00187	0.06265	33.5619	2.8400	Si	Existe diferencia significativa

Fuente: análisis estadístico ANOVA, apéndice 5

Donde:

CDM_d: cuadrado de medias dentro de las muestras con determinado grado libertad.

CDM_e: cuadrado de medias entre las muestras con determinado grado libertad.

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

F_c: valor crítico de la función, con sus respectivos grados libertad.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de graduación se determinaron los datos para la caracterización del equilibrio ternario del sistema isopropanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente ($24\pm 1^\circ\text{C}$), estableciendo el coeficiente de partición del soluto (isopropanol), entre los disolventes biodiesel y agua. Así como también se determinó si existe diferencia significativa entre los datos experimentales correlacionados para la realización del domo de solubilidad del sistema, a la temperatura analizada.

Para la obtención de la curva binodal del sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, se procedió a realizar mezclas para cada sistema binario isopropanol-agua (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 85, 95% de isopropanol), e isopropanol-biodiesel (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100% de isopropanol), a las cuales se determinaron su densidad, índice de refracción y distribución del soluto (isopropanol), a las distintas concentraciones de los solventes.

Correlaciones de densidades

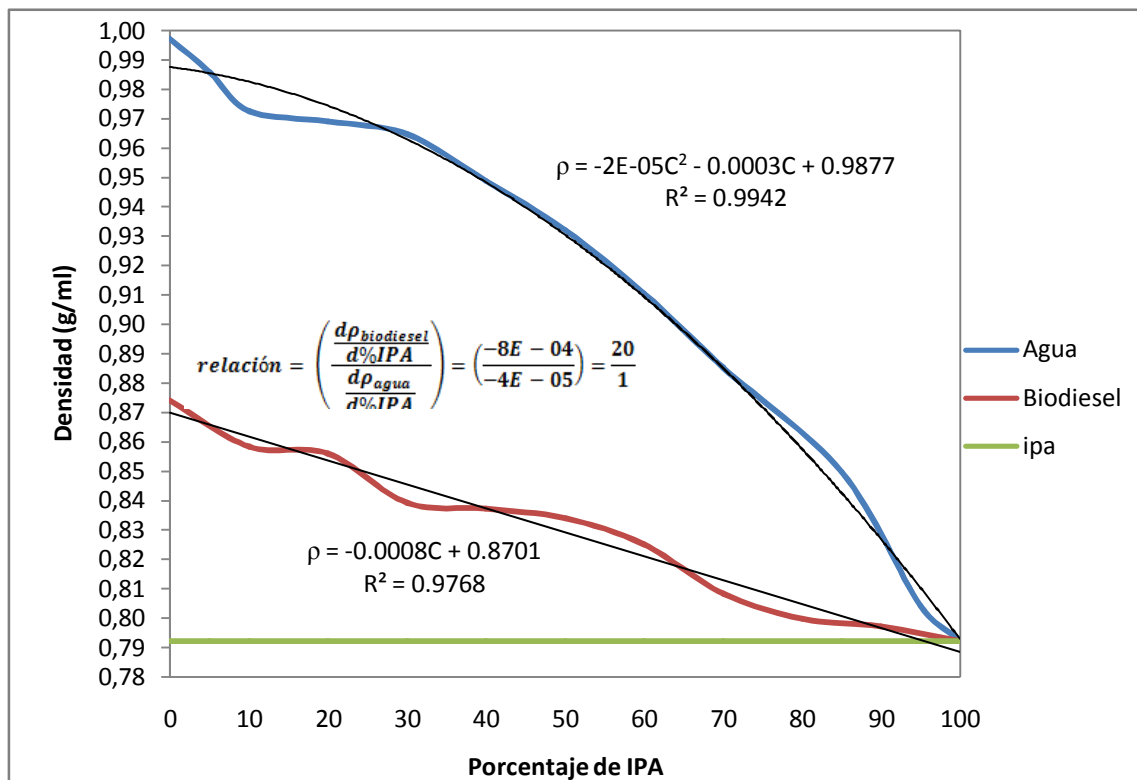
Se elaboraron las curvas de correlación para la densidad en función de la composición porcentual en peso para cada serie de soluciones de isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel (figuras 29 y 30 sección de resultados), a la temperatura analizada.

Se realizó la determinación de las densidades de las soluciones de isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel, con los datos de los pesos de las soluciones respectivas por medio del método de picnometría, las cuales

servieron para la obtención de las concentraciones reales de porcentaje en peso de las soluciones antes mencionadas.

Para la figura 42, para el sistema isopropanol-biodiesel-agua, el parámetro de monitoreo de la densidad para las soluciones binarias isopropanol-agua y para las soluciones isopropanol-biodiesel, se observa que la variación de la densidad disminuye, indicando así, que la densidad es más variable en biodiesel que en agua en una relación 20:1.

Figura 42. **Parámetro de monitoreo de la densidad para las soluciones binarias isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel**



Fuente: resultados, figuras 29 y 30

Se puede observar que en las figuras 29 y 30 para las soluciones binarias isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel respectivamente, la densidad disminuye al incrementarse la composición porcentual en peso de IPA en dichas soluciones, ajustándose la figura 29 en una función polinómica de segundo grado y la figura 30 en una función lineal, mostrándose en cada caso una relación inversamente proporcional entre la concentración y la densidad (conclusión 1).

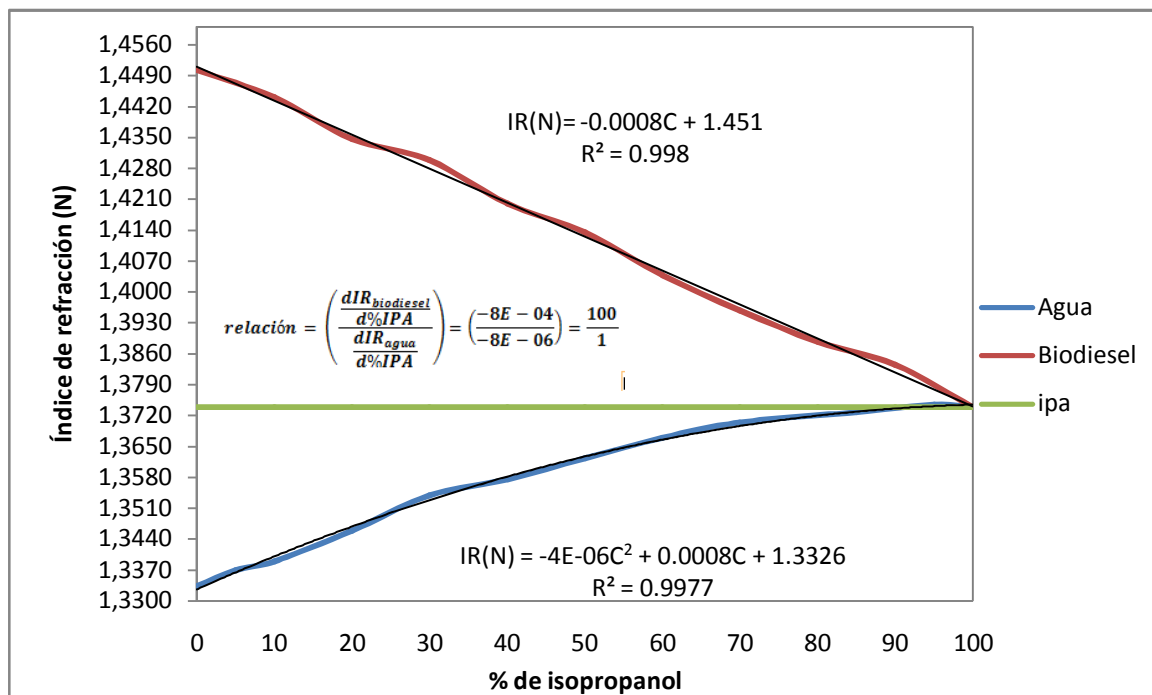
Correlaciones de índices de refracción

A partir de las concentraciones reales y los índices de refracción medidos experimentalmente por medio del método de refractometría, se elaboraron las curvas de correlación del índice de refracción en función de la composición porcentual en peso para cada serie de soluciones de isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel (figuras 31 y 32 sección de resultados) a la temperatura analizada.

Para la figura 31 las soluciones de isopropanol-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 32 para las soluciones de isopropanol-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 2).

Para la figura 43 el sistema isopropanol-biodiesel-agua, el parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción), para las soluciones binarias isopropanol-agua presenta una sensibilidad notable y para las soluciones isopropanol-biodiesel el monitoreo presenta sensibilidad media, por lo que la sensibilidad del refractómetro disminuye. Lo cual indica que el índice de refracción es más sensible la variación en biodiesel que en agua en una relación 100:1.

Figura 43. **Sensibilidad del parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel**



Fuente: resultados, figuras 31 y 32

Para los trabajos de graduación relacionados con sistemas ternarios se comparó el grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice

de refracción), medido con el refractómetro, en la siguiente tabla 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 hidrogeno.

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

ΔIR	Acetona / agua	IPA / agua	Limoneno / etanol	Cardamomo / benceno	Glicerol / / agua	Metanol / / agua	IPA / agua
Acetona / hexano	++ +						
IPA / hexano		+ +					
Limoneno / hexano			-- -				
Cardamomo / benceno				-- ++			
Glicerol / biodiesel					+++ ---		
Metanol / biodiesel						++ +	
IPA / biodiesel							+ ++

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

Fuente: elaboración propia

Construcción del sistema ternario

La distribución de los datos experimentales de equilibrio líquido-líquido obtenidos para el sistema isopropanol-biodiesel-agua, se determinó a partir de soluciones binarias de isopropanol-agua tituladas con biodiesel y soluciones binarias de isopropanol-biodiesel tituladas con agua, hasta la formación de dos fases.

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 con base a las correlaciones de índice de refracción con respecto al porcentaje de IPA.

En las figuras 33 y 34 se observa la alta afinidad molecular del isopropanol en agua así como también en el biodiesel, ya que abarca la solubilidad casi en toda proporción.

La figura 35 muestra la curva de equilibrio de inmiscibilidad del sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, la cual se realizó uniendo las figuras 33 y 34 observando que el sistema isopropanol-biodiesel-agua a la temperatura analizada pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo I, según la clasificación de Treybal, por lo que se acepta la hipótesis nula, en donde hay formación de un par de líquidos parcialmente miscibles, donde se observa que existe parecida similitud en la afinidad del isopropanol con agua a bajos contenidos y con biodiesel (conclusiones 3 y 4).

A partir de la curva de equilibrio de inmiscibilidad del sistema ternario isopropanol-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 (IPA-biodiesel-agua) dentro de la curva binodal, los cuales posteriormente se analizaron por medio de refractometría; obteniendo los porcentajes de isopropanol en la fase de biodiesel así como también en la fase de agua por medio de las correlaciones obtenidas de las figuras 31 y 32.

Con los porcentajes de isopropanol determinados en cada fase se representaron los porcentajes de isopropanol en fase de agua y los datos de porcentaje de isopropanol en fase de biodiesel, en el sistema de isopropanol-biodiesel-agua (figura 36 sección de resultados). Obteniendo de esta manera las líneas de unión de equilibrio de dicho sistema, debido a la diferencia de solubilidad del isopropanol 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 isopropanol es más soluble en agua con respecto al 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. (apéndice 4 y figura 37 sección de resultados).

El punto de pliegue experimental obtenido para el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$ fue de 54% de isopropanol, 41% de biodiesel y 5% de agua (conclusión 5).

Se observa en la figura 20 la formación de un azeótropo en el diagrama líquido-vapor del sistema isopropanol-agua empezándose a notar a partir de un 58% hasta un 80% de composición porcentual de isopropanol a una

temperatura de 80.55°C, lo cual nos fundamenta el punto de pliegue, debido a que éste se encuentra aproximadamente a dicho rango con respecto a la composición porcentual del isopropanol.

Se determinó el coeficiente de distribución para cada punto escogido al azar, los cuales se obtuvieron al dividir el porcentaje de isopropanol en la fase de biodiesel entre el porcentaje de isopropanol en la fase acuosa, indicando estos valores que se requiere más disolvente, en este caso agua para llevar a cabo la extracción de isopropanol en el biodiesel (tabla V sección de resultados). Los cuales también fueron utilizados para poder determinar el coeficiente de partición con respecto al punto de pliegue el cual da un valor de 0.1060, llevándose esto a cabo por medio del modelo matemático obtenido de la figura treinta y siete que se representa por medio de una función potencial, la cual indica que el coeficiente de distribución es inversamente proporcional a la relación de biodiesel: agua de la mezcla establecida.

En la figura 38 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 esta curva de equilibrio de inmiscibilidad se demuestra que es factible utilizar las relaciones 10:1, 5:1 y 2.5:1 de biodiesel: agua para el lavado de biodiesel, para lograr que el agua sea un excelente disolvente extractor de isopropanol en el biodiesel, para minimizar los costos del proceso.

Observando en las figuras treinta y nueve, cuarenta y cuarenta y uno, que el agua no es un buen extractor de isopropanol en el biodiesel, ya que al realizar tres ciclos de lavado (tabla XXX, datos calculados), no es suficiente para la eliminación del isopropanol (relación 10:1, 5:1 y 2.5:1) para que se cumpla la especificación establecida según la Norma *EN 14214*, realizando el lavado de

biodiesel con agitación constante de 400 rpm durante un periodo de tiempo de 25 minutos (conclusión 6).

Evaluación estadística

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 isopropanol-biodiesel-agua. Realizando dos análisis, uno para soluciones de isopropanol-agua tituladas con biodiesel y otro para isopropanol-biodiesel tituladas con agua.

Para el primer análisis en el índice de refracción se obtuvo un valor de F calculada de 18513.13 y para el volumen de biodiesel adicionado el F calculada es de 40.88. Para el segundo análisis se obtuvo un valor de F calculada para el índice de refracción de 4115.87 y para el volumen de agua adicionada un valor de 33.56.

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 isopropanol en agua e isopropanol en biodiesel (conclusión 7).

Impacto ambiental

Se realizó un análisis sobre el impacto ambiental que pudo ser generado durante la presente investigación (apéndice 7), en la cual los aspectos ambientales que se tomaron en consideración fueron el aire, agua, suelo, biodiversidad, lo visual y social. Durante el desarrollo de esta 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 isopropanol 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 la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$.
2. Para las soluciones binarias de isopropanol en biodiesel, las correlaciones para la densidad y el índice de refracción en función de la concentración porcentual en peso, representan funciones lineales y relación inversamente proporcional respectivamente a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$.
3. El sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo I, según la clasificación de Treybal. Aceptando la hipótesis nula.
4. Según las gráficas del sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua se demuestra que la afinidad del isopropanol es parecida a la del agua a bajos contenidos de concentración del isopropanol, así como con el biodiesel.
5. El punto de pliegue obtenido experimentalmente para el sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$ es de 54% de isopropanol, 41% de biodiesel y 5% de agua.

6. No es posible refinar el contenido de isopropanol en el biodiesel, puesto que no se determinó una línea de amarre en el sistema que cumpla con la especificación del 0.20% de alcohol máximo según la Norma *EN 14214*, para las relaciones de biodiesel: agua analizadas a tres ciclos de lavado durante 25 minutos de agitación constante a 400 rpm.

7. Con base al análisis de varianza ANOVA existe diferencia significativa, cuando se varía la concentración porcentual en peso del isopropanol en agua e isopropanol en biodiesel en función del índice de refracción y las soluciones binarias de isopropanol en agua tituladas con biodiesel y las soluciones binarias de isopropanol en biodiesel tituladas con agua.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de la distribución de solubilidad del isopropanol en agua y biodiesel producido a base de isopropanol, para determinar la caracterización del equilibrio de inmiscibilidad de sus respectivos sistemas ternarios.
2. Realizar un estudio de los sistemas de lavado del biodiesel del sistema ternario isopropanol-biodiesel-agua, utilizando biodiesel producido con isopropanol.
3. Realizar un estudio del sistema cuaternario (glicerol/alcohol)-biodiesel-agua con el alcohol más eficiente para el lavado de biodiesel y de esta manera disponer de la suficiente certeza para realizar el refinado completo del biodiesel.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acción Directa de Whitman [en línea]. Biodiesel: producción y aplicaciones. [20 de marzo de 2010]. Disponible en:
< [http:// www. Whitmandirectaction. Org/downloads/ documents/biodieselguiede\(espagnol\).pdf](http://www.Whitmandirectaction.Org/downloads/documents/biodieselguiede(espagnol).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 mmHg. Tesis Ingeniería Química. Guatemala: USAC, Facultad de Ingeniería, 2006.
3. Comisión Económica de Naciones Unidas para América Latina y el Caribe – CEPAL. Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras. [en línea]. [20 de marzo de 2010]. Disponible en:
<<http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>>
4. 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. Tesis Ingeniería Química. Guatemala: USAC, Facultad de Ingeniería, 2003.

5. DÍAZ BORRÁS, Andrés José; PÉREZ, Mario Alfonso. *Utilización del biodiesel como combustible alternativo para motores de combustión interna en Guatemala*. Tesis Ingeniería Mecánica Industrial. Guatemala: USAC, Facultad de Ingeniería, 2004.
6. DÍAZ FULGAN, Nancy Karina; GARCÍA GUERRA, César Alfonso. 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. Tesis Ingeniería Química. Guatemala. USAC: Facultad de Ingeniería, 2010. 169 p.
7. GEANKOPLIS, Christie J. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Tercera Edición. México: Editorial Continental, S.A., 1998. p. 785–790.
8. GIRÓN, Rudy. Biopersa [en línea]. Año 2009. [Marzo 2010]. Disponible en: <<http://www.biopersa.com/>>
9. HERNÁNDEZ CASTELLANOS, María Gabriela; GARCÍA GUERRA, César Alfonso. Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas Y 640 mm Hg. Tesis Ing. Química. Guatemala: USAC, Facultad de Ingeniería, 2008.
10. JARAMILLO GARCÍA, Jaime. Glosario del ingeniero químico [en línea]. 18 de marzo de 2008. [Marzo 2010]. Disponible en: <<http://www.elprisma.com/apuntes/curso.asp?id=13917>>

11. KIRK, Raymond E. Enciclopedia de Tecnología Química. Primera Edición. México: Editorial Hispano - Americana. Tomo VII.
12. KNOTHE, Gerhard; VAN GERPEN, John. *The biodiesel handbook*. USA: Editorial AOCS Press, 2005. Capítulo 1 y 4.
13. LAIDLER, Keith; MEISER, John. *Fisicoquímica*. Segunda Edición. México: Editorial Continental, S.A., 1998. p. 247-248.
14. MILLER, J.C. *Estadística para Química Analítica*. Segunda Edición. USA: Addison- Wesley Iberoamericana, 1993. p. 51-55.
15. MIRA, José Aracil. *Producción de biodiesel a partir de aceites usados*. Laboratorio de procesos químicos y bioquímicos integrados, Universidad Complutense de Madrid. Presentación en formato PDF. Madrid.
16. 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. Tesis Ingeniería Química. Guatemala: USAC, Facultad de Ingeniería, 2003. p. 1-6.
17. PERRY, Robert. *Manual del Ingeniero Químico*. Séptima Edición. México: Editorial McGraw-Hill, 1993. p. 13-13, 15-1 al 15-26.
18. Planta de Biodiesel Mazat Aguí. 4 de diciembre de 2008. [Marzo 2010]. Disponible en: <<http://www.deguate.com/artman/publish/noticias-guatemala/inauguran-planta-de-biodiesel-en-escuintla.shtml>>

19. 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>>
20. ROMANO, Silvia Daniela. *Combustibles Alternativos*. Primera Edición. Buenos Aires, Argentina: Editorial Ediciones Cooperativas, 2005.
21. TREYBAL, Robert E. *Liquid Extraction*. Segunda Edición. México: Editorial McGraw-Hill, 1963. p. 1-28.
22. TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. Segunda Edición. México: Editorial McGraw-Hill, 2000. p. 529-542.
23. Universidad Autónoma de Madrid. Extracción líquido-líquido. [20 de marzo de 2010].
<http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionI/QII/ExtaccLiqLiq2006.pdf>
24. ZORRILLA A. Santiago; TORRES X. Miguel. *Guía para elaborar la Tesis*. Segunda edición. México: Editorial McGraw-Hill, 2005. p. 4-87.

APÉNDICE 1. DATOS ORIGINALES

Pesos de las soluciones de isopropanol-agua obtenidos a la temperatura de 24±1°C

Concentración nominal (% en peso)	Pesos de las soluciones (g)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
5	38.094	38.137	38.094
10	37.870	38.031	38.027
20	37.930	37.905	37.987
30	37.887	37.896	37.909
40	37.733	37.745	37.745
50	37.555	37.560	37.603
60	37.294	37.488	37.294
70	37.070	37.129	37.129
85	36.719	36.754	36.795
95	36.295	36.324	36.295

Fuente: elaboración propia

Pesos de las soluciones de isopropanol-biodiesel obtenidos a la temperatura de 24±1°C

Concentración nominal (% en peso)	Pesos de las soluciones (g)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
10	36.241	36.385	36.009
20	36.305	36.131	36.131
30	35.980	36.077	36.015
40	36.171	35.949	35.897
50	36.103	35.938	35.877
60	35.838	35.82	35.998
70	35.662	35.915	35.590
80	35.605	35.705	35.605
90	35.682	35.463	35.694
100	35.588	35.434	35.675

Fuente: elaboración propia

Valores de los índices de refracción obtenidos para las soluciones de isopropanol-agua a la temperatura de 24°C

Concentración nominal (% en peso)	Índices de refracción (N)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	1.3333	1.3333	1.3333
5	1.3370	1.3370	1.3370
10	1.3390	1.3390	1.3390
20	1.3460	1.3460	1.3460
30	1.3540	1.3540	1.3540
40	1.3575	1.3575	1.3575
50	1.3620	1.3625	1.3625
60	1.3670	1.3670	1.3670
70	1.3705	1.3705	1.3705
85	1.3725	1.3730	1.3730
95	1.3750	1.3740	1.3745

Fuente: elaboración propia

Valores de los índices de refracción obtenidos para las soluciones de isopropanol-biodiesel a la temperatura de 24°C

Concentración nominal (% en peso)	Índices de refracción (N)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	1.4505	1.4505	1.4500
10	1.4440	1.4440	1.4440
20	1.4350	1.4345	1.4345
30	1.4300	1.4295	1.4300
40	1.4200	1.4200	1.4200
50	1.4135	1.4135	1.4135
60	1.4015	1.4045	1.4055
70	1.3955	1.3960	1.3960
80	1.3890	1.3885	1.3885
90	1.3835	1.3835	1.3835
100	1.3740	1.3740	1.3740

Fuente: elaboración propia

Datos de los volúmenes de biodiesel adicionados para titular alícuotas de 3 ml de las soluciones de isopropanol-agua a la temperatura de 24±1°C

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (ml)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
5	0.100	0.080	0.080
10	0.040	0.080	0.100
20	0.080	0.080	0.060
30	0.060	0.060	0.060
40	0.060	0.060	0.060
50	0.040	0.080	0.060
60	0.060	0.040	0.040
70	0.040	0.060	0.060
85	0.260	0.240	0.260
95	2.120	1.300	2.000

Fuente: elaboración propia

Datos de los volúmenes de agua adicionados para titular alícuotas de 3 ml de las soluciones de isopropanol-biodiesel a la temperatura de 24±1°C

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de agua (ml)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
10	0.040	0.060	0.080
20	0.060	0.100	0.100
30	0.100	0.100	0.140
40	0.080	0.120	0.100
50	0.200	0.200	0.120
60	0.140	0.140	0.160
70	0.220	0.240	0.180
80	0.300	0.280	0.260
90	0.220	0.200	0.220

Fuente: elaboración propia

**Índices de refracción obtenidos para cada par de soluciones conjugadas
(fase biodiesel y fase agua), obtenidas para cada mezcla ternaria
producida a la temperatura de 24°C**

Muestra	Agua (%)	Biodiesel (%)	IPA (%)	Fase	Índices de refracción		
					Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
1	60	10	30	Biodiesel	1.4395	1.4395	1.4400
				Agua	1.3710	1.3720	1.3720
2	30	10	60	Biodiesel	1.4420	1.4420	1.4415
				Agua	1.3705	1.3705	1.3705
3	60	30	10	Biodiesel	1.4455	1.4435	1.4450
				Agua	1.3610	1.3615	1.3615
4	40	30	30	Biodiesel	1.4470	1.4470	1.4465
				Agua	1.3605	1.3605	1.3605
5	20	30	50	Biodiesel	1.4475	1.4465	1.4470
				Agua	1.3560	1.3575	1.3570
6	20	60	20	Biodiesel	1.4495	1.4495	1.4495
				Agua	1.3435	1.3445	1.3445

Fuente: elaboración propia

Índices de refracción obtenidos para las distintas relaciones biodiesel: agua para una muestra de 50 ml de biodiesel con 15% de isopropanol con agitación constante a 400 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de 24±1°C

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	1.4425	1.4420	1.4420	1.3635	1.3650	1.3635
10:01	5	1.4445	1.4435	1.4435	1.3590	1.3595	1.3595
05:01	10	1.4460	1.4460	1.4460	1.3555	1.3560	1.3560
2.5:1	20	1.4485	1.4485	1.4480	1.3480	1.3480	1.3480
1.5:1	33.33	1.4495	1.4495	1.4495	1.3435	1.3435	1.3435
01:01	50	1.4500	1.4500	1.4500	1.3405	1.3410	1.3410

Fuente: elaboración propia

Índices de refracción obtenidos para los distintos ciclos de lavado de biodiesel de las relaciones biodiesel: agua para una muestra de 50 ml de biodiesel con 15% de isopropanol con agitación constante a 400 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de 24±1°C

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	1.4445	1.4435	1.4435	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	1.4460	1.4460	1.4460	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	1.4485	1.4485	1.4480	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

Fuente: elaboración propia

APÉNDICE 2. 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 isopropanol-agua al 5% (peso de solución + peso del picnómetro) a la temperatura de $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

$$\bar{X} = \frac{38.094 \text{ g} + 38.137 \text{ g} + 38.094 \text{ g}}{3} = 38.1083 \text{ g}$$

- Cálculo de la media aritmética de los índices de refracción medidos para soluciones binarias de isopropanol-agua al 5% a la temperatura de 24°C .

$$\bar{X} = \frac{1.3370 + 1.3370 + 1.3370}{3} = 1.3370$$

- Cálculo de la media aritmética de los volúmenes de biodiesel adicionados a la solución binaria de isopropanol-agua al 5% a la temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$.

$$\bar{X} = \frac{0.10 \text{ ml} + 0.08 \text{ ml} + 0.08 \text{ ml}}{3} = 0.0867 \text{ ml}$$

Los resultados para las siguientes corridas de la media aritmética de los pesos de las soluciones binarias, índice de refracción y volúmenes de adición de los solventes 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:

ρ : 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 (9.42 ml)

- Cálculo de la densidad de la solución binaria isopropanol-agua al 5% a la temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$.

$$\rho = \frac{(38.1083 \text{ g} - 28.327 \text{ g})}{9.92 \text{ ml}} = 0.9860 \text{ g / ml}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las soluciones binarias isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel a la temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$, se presentan en la sección de datos calculados.

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

$$C = \left(\frac{\rho_{IPA} V_{sol} x}{\rho_{sol} V_{sol}} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

ρ_{IPA} : densidad del Isopropanol a la temperatura analizada (g/ml)

V_{sol} : volumen de la solución preparada (50 ml)

ρ_{sol} : densidad de la solución (g/ml)

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

- Cálculo de la concentración real de la solución binaria isopropanol-agua al 5% a la temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$.

$$C = \left(\frac{0.7829 \text{ g/ml} * 50 \text{ ml} * 0.05}{0.9860 \text{ g/ml} * 50 \text{ ml}} \right) * 100 = 3.9699\%$$

Los resultados para las siguientes corridas de las soluciones binarias isopropanol-agua e isopropanol-biodiesel a la temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$, se presentan en la sección de datos calculados.

Determinación de las curvas de correlación de los parámetros índice de refracción en función de la concentración

Se determinaron al graficar los índices de refracción contra las concentraciones de isopropanol 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 isopropanol-biodiesel a la temperatura de 24°C.

$$N = -0.0008 C + 1.4513$$
$$R^2 = 0.9975$$

- La ecuación de correlación del índice de refracción contra concentración (porcentaje en peso) con su coeficiente de correlación, para las soluciones de isopropanol-agua a la temperatura de 24°C.

$$N = -4E-06 C^2 + 0.0008 C + 1.3323$$
$$R^2 = 0.9973$$

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 isopropanol-biodiesel e isopropanol-agua a las dos temperaturas analizadas, se presentan en la sección de datos calculados.

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

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

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

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

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

Donde:

M_t : masa total de la mezcla ternaria (g)

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

ρ_2 : densidad del solvente de adición (g/ml)

V_1 : volumen de alícuota de la solución a titular (ml)

ρ_{sol} : densidad de la solución a titular (g/ml)

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

ρ_{IPA} : densidad del soluto (isopropanol) (g/ml)

- Cálculo de la composición porcentual en peso de la mezcla ternaria formada, para la solución isopropanol-biodiesel al 10%, titulada con agua, a temperatura de $24\pm 1^\circ\text{C}$.

$$M_t = (0.06\text{ml} * 0.9972\text{g/ml}) + (3\text{ml} * 0.8585\text{g/ml}) = 2.6352\text{g}$$

$$\% \text{ Isopropanol} = \frac{0.10 * 3\text{ml} * 0.7829\text{g/ml}}{2.6352\text{g}} * 100 = 8.9126\%$$

$$\% \text{ Agua} = \frac{0.06 \text{ ml} * 0.9972 \text{ g / ml}}{2.6352 \text{ g}} * 100 = 2.2704\%$$

$$\% \text{ Biodiesel} = \frac{(3 \text{ ml} * 0.8585 \text{ g / ml}) - (0.10 * 3 \text{ ml} * 0.7829 \text{ g / ml})}{2.6352 \text{ g}} * 100 = 88.8170\%$$

- Cálculo de la composición porcentual en peso de la mezcla ternaria formada, para la solución isopropanol-agua al 5%, titulada con biodiesel, a temperatura de $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

$$M_t = (0.0867 \text{ ml} * 0.8741 \text{ g / ml}) + (3 \text{ ml} * 0.9860 \text{ g / ml}) = 3.0338 \text{ g}$$

$$\% \text{ Isopropanol} = \frac{0.05 * 3 \text{ ml} * 0.7829 \text{ g / ml}}{3.0338 \text{ g}} * 100 = 3.8708\%$$

$$\% \text{ Biodiesel} = \frac{(0.0867 \text{ ml} * 0.8741 \text{ g / ml})}{3.0338 \text{ g}} * 100 = 2.4971\%$$

$$\% \text{ Agua} = \frac{(3 \text{ ml} * 0.9860 \text{ g / ml}) - (0.05 * 3 \text{ ml} * 0.7829 \text{ g / ml})}{3.0338 \text{ g}} * 100 = 93.6322\%$$

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 *ProSim Ternary Diagram*, en el cual se obtuvo la distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad al 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.
 - ✓ Fase biodiesel: al sustituir el índice de refracción leído para dicha fase, se sustituye el valor en la ecuación de correlación para soluciones binarias isopropanol-biodiesel, a la temperatura analizada, así se obtiene la composición porcentual en peso.
 - ✓ Fase agua: al sustituir el índice de refracción leído para esta fase, se sustituye el valor en la ecuación de correlación para soluciones binarias isopropanol-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 1 (60% agua, 10% biodiesel, 30% IPA) a $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

$$1.4447 = -0.0008C + 1.4513$$

Despejando C de la ecuación anterior se obtiene:

$$C = 8.2967\%$$

- Cálculo de la composición de la fase de agua formada para la mezcla ternaria 1 (60% agua, 10% biodiesel, 30% IPA) a $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

$$1.3568 = -4E-06 C^2 + 0.0008 C + 1.3323$$

Despejando C de la ecuación anterior se obtiene:

$$C = 37.8175\%$$

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

Por medio del método gráfico (apéndice 4) se procede a la obtención de la curva de distribución, graficando los datos de % de isopropanol en fase biodiesel y los % de isopropanol en fase agua de los puntos obtenidos al azar en el sistema ternario isopropanol-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 (% isopropanol en extracto = % isopropanol en refinado). Esto también se puede observar en el diagrama líquido vapor del sistema isopropanol-agua en donde se observa que el azeótropo empieza de un 58% hasta un 80% aproximadamente.

Cálculo del coeficiente de distribución

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

Donde:

k : coeficiente de distribución

y : concentración al equilibrio de isopropanol en fase orgánica

x : concentración al equilibrio de isopropanol en fase acuosa

- Cálculo del coeficiente de distribución para los datos obtenidos de la mezcla 1 (60% agua, 10% biodiesel, 30% IPA) a $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

$$k = \frac{14.5467\%}{87.4169\%} = 0.1742$$

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

- Cálculo del coeficiente de partición para el punto de pliegue obtenido a $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

$$K^* = 0.1391(8.2)^{-0.129} = 0.1060$$

El resultado anterior se presenta en la sección de resultados.

APÉNDICE 3. DATOS CALCULADOS

Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio para las soluciones de isopropanol-agua a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$

Concentración nominal (% en peso)	Peso del picnómetro (g)		Índice de refracción (N)		Volumen de biodiesel adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
0	38.2025	0.0124	1.3333	0.0000	---	---
5	38.1083	0.0405	1.3370	0.0000	0.0867	0.0189
10	37.9760	0.1499	1.3390	0.0000	0.0733	0.0471
20	37.9407	0.0655	1.3460	0.0000	0.0733	0.0189
30	37.8973	0.0165	1.3540	0.0000	0.0600	0.0000
40	37.7410	0.0113	1.3575	0.0000	0.0600	0.0000
50	37.5727	0.0429	1.3623	0.0005	0.0600	0.0283
60	37.3587	0.1829	1.3670	0.0000	0.0467	0.0189
70	37.1093	0.0556	1.3705	0.0000	0.0533	0.0189
85	36.7560	0.0552	1.3728	0.0005	0.2533	0.0189
95	36.3047	0.0273	1.3745	0.0007	1.8067	0.7165

Fuente: elaboración propia

Pesos de picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio para las soluciones de isopropanol-biodiesel a la temperatura de 24±1°C

Concentración nominal (% en peso)	Peso del picnómetro (g)		Índice de refracción (N)		Volumen de agua adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
0	36.3647	0.0260	1.4503	0.0005	---	---
10	36.2117	0.28661	1.4440	0.0000	0.0600	0.0283
20	36.1890	0.16405	1.4347	0.0005	0.0867	0.0377
30	36.0240	0.07495	1.4298	0.0005	0.1133	0.0377
40	36.0057	0.23382	1.4200	0.0000	0.1000	0.0283
50	35.9727	0.18432	1.4135	0.0000	0.1733	0.0754
60	35.8853	0.15933	1.4038	0.0033	0.1467	0.0189
70	35.7223	0.27247	1.3958	0.0005	0.2133	0.0471
80	35.6383	0.09428	1.3887	0.0005	0.2800	0.0283
90	35.6130	0.21213	1.3835	0.0000	0.2133	0.0189
100	35.5657	0.18620	1.3740	0.0000	---	---

Fuente: elaboración propia

**Datos de las densidades promedio de las soluciones binaria de
isopropanol-agua a la temperatura de 24±1°C**

Concentración nominal (% en peso)	Densidad (g/ml)
0	0.9972
5	0.9860
10	0.9727
20	0.9691
30	0.9648
40	0.9490
50	0.9320
60	0.9105
70	0.8853
85	0.8497
95	0.8042

Fuente: elaboración propia

**Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de
isopropanol-biodiesel a la temperatura de 24±1°C**

Concentración nominal (% en peso)	Densidad (g/ml)
0	0.8741
10	0.8585
20	0.8561
30	0.8393
40	0.8374
50	0.8340
60	0.8251
70	0.8084
80	0.7998
90	0.7972
100	0.7924

Fuente: elaboración propia

Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de isopropanol-agua a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$

Concentración nominal (% en peso)	Concentración real (%)
5	3.9699
10	8.0487
20	16.1565
30	24.3445
40	32.9984
50	41.9990
60	51.5929
70	61.9006
85	78.3159
95	92.4814

Fuente: elaboración propia

Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de isopropanol-biodiesel a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$

Concentración Nominal (% en peso)	Concentración Real (%)
10	9.1197
20	18.2887
30	27.9850
40	37.3969
50	46.9353
60	56.9324
70	67.7916
80	78.3087
90	88.3837
100	98.8044

Fuente: elaboración propia

Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de isopropanol-agua a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$, necesarios para graficar la curva binodal

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (ml)	Masa total (g)	% IPA	% Biodiesel	% Agua
5	0.0867	3.0338	3.8708	2.4971	93.6322
10	0.0733	2.9821	7.8757	2.1495	89.9748
20	0.0733	2.9715	15.8080	2.1572	82.0348
30	0.0600	2.9467	23.9112	1.7798	74.3089
40	0.0600	2.8994	32.4015	1.8089	65.7896
50	0.0600	2.8485	41.2257	1.8412	56.9331
60	0.0467	2.7721	50.8337	1.4715	47.6948
70	0.0533	2.7026	60.8328	1.7250	37.4422
85	0.2533	2.7705	72.0563	7.9927	19.9510
95	1.8067	3.9918	55.8944	39.5614	4.5441

Fuente: elaboración propia

Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de isopropanol-biodiesel a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$, necesarios para graficar la curva binodal

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (ml)	Masa total (g)	% IPA	% Biodiesel	% Agua
10	0.0600	2.6352	8.9126	88.8170	2.2704
20	0.0867	2.6548	17.6934	79.0514	3.2552
30	0.1133	2.6308	26.7828	68.9215	4.2957
40	0.1000	2.6118	35.9691	60.2131	3.8178
50	0.1733	2.6748	43.9025	49.6358	6.4617
60	0.1467	2.6214	53.7562	40.6648	5.5790
70	0.2133	2.6379	62.3247	29.6110	8.0643
80	0.2800	2.6786	70.1461	19.4303	10.4236
90	0.2133	2.6043	81.1644	10.6674	8.1682
100	0.0000	2.3771	98.8044	1.1956	0.0000

Fuente: elaboración propia

Índices de refracción promedio de las fases biodiesel y fase agua para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a la temperatura de 24±1°C

Muestra	Agua (%)	Biodiesel (%)	IPA (%)	Fase	Media	Desviación
1	60	10	30	Biodiesel	1.4397	0.0005
				Agua	1.3717	0.0009
2	30	10	60	Biodiesel	1.4418	0.0005
				Agua	1.3705	0.0000
3	60	30	10	Biodiesel	1.4447	0.0016
				Agua	1.3613	0.0005
4	40	30	30	Biodiesel	1.4468	0.0005
				Agua	1.3605	0.0000
5	20	30	50	Biodiesel	1.4470	0.0007
				Agua	1.3568	0.0012
6	20	60	20	Biodiesel	1.4495	0.0000
				Agua	1.3442	0.0009

Fuente: elaboración propia

Datos de las concentraciones de los pares de equilibrio (soluciones conjugadas), para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada mezcla reproducida, a la temperatura de $24\pm 1^{\circ}\text{C}$

Muestra	% IPA	% Biodiesel	% Agua	Concentración de IPA (% en peso)	
				Fase biodiesel	Fase agua
1	30	10	60	14.5467	87.4169
2	60	10	30	11.8383	78.7868
3	10	30	60	8.2967	47.6391
4	30	30	40	5.5883	45.6861
5	50	30	20	5.3800	37.8175
6	20	60	20	2.2550	16.1350

Fuente: elaboración propia

**Datos del coeficiente de distribución para las mezclas ternarias
isopropanol-biodiesel-agua a la temperatura de 24±1°C**

Muestra	Agua (%)	Biodiesel (%)	IPA (%)	Relación biodiesel: agua	K*
1	60	10	30	0.1667	0.1742
2	30	10	60	0.3333	0.1664
3	60	30	10	0.5000	0.1503
4	40	30	30	0.7500	0.1398
5	20	30	50	1.5000	0.1423
6	20	60	20	3.0000	0.1223

Fuente: elaboración propia

Datos de las concentraciones para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada relación biodiesel: agua, para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol con agitación constante a 400 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de 24±1°C

Relacion biodiesel: agua	Fase agua	Fase biodiesel
	%IPA	%IPA
20.1	54.4478	11.4217
10.1	43.0644	9.3383
5.1	35.8387	6.6300
2.5.1	22.0577	3.7133
1.5.1	15.1472	2.2550
1.1	11.3058	1.6300

Fuente: elaboración propia

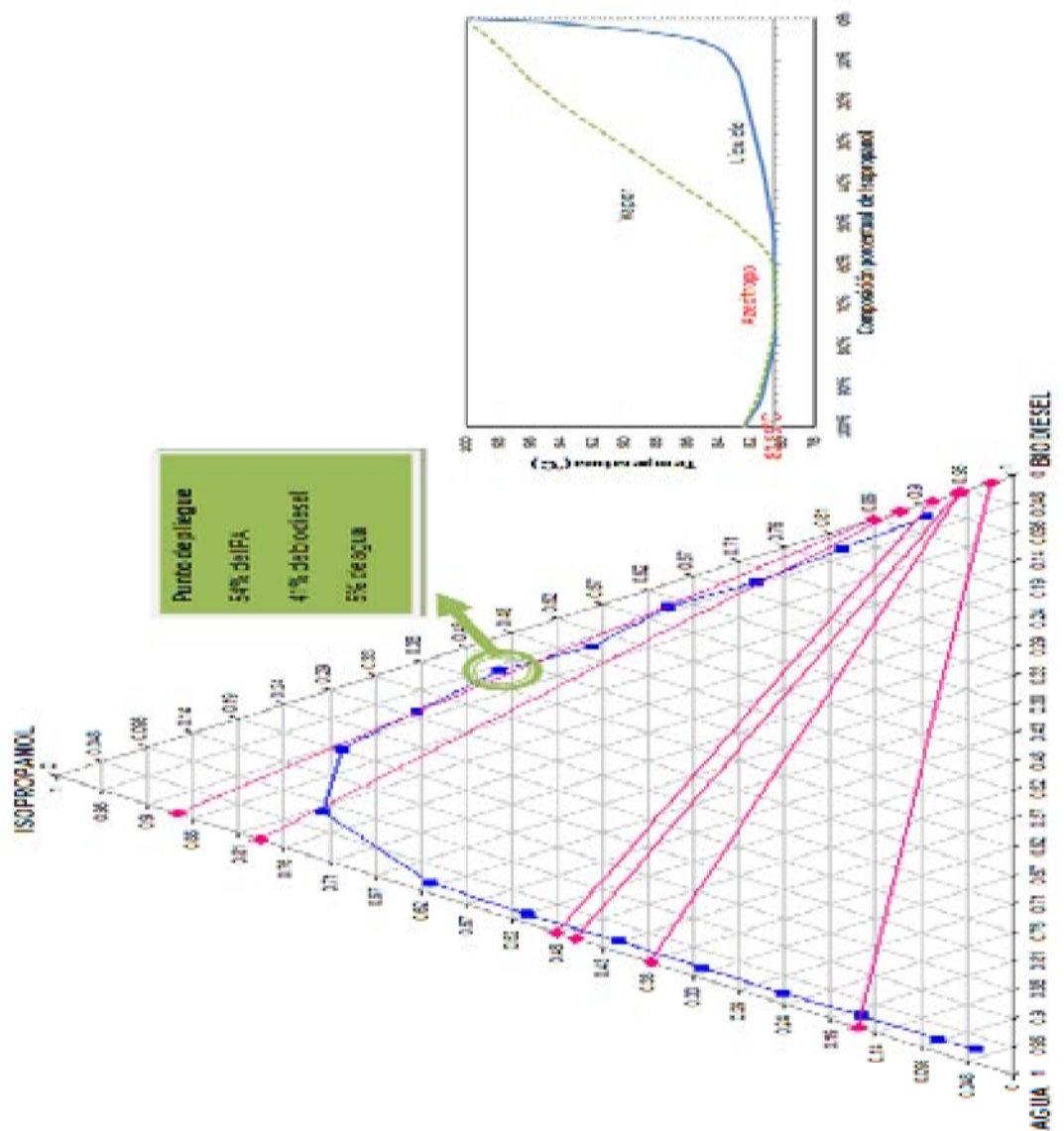
Datos de las concentraciones de Isopropanol en agua para determinar la cantidad de ciclos de lavado, para una muestra de 50 ml de biodiesel al 15% de isopropanol con agitación constante a 400 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de 24±1°C

Relación biodiesel: agua	Ciclos	IPA en agua (% en peso)	IPA residual (% en peso)
10.1	1	43.0644	9.3383
	2	29.6438	6.6300
	3	21.5250	4.3383
5.1	1	35.8387	6.6300
	2	18.6571	2.4633
	3	11.0712	2.2550
2.5.1	1	22.0577	3.7133
	2	14.4138	2.2550
	3	6.0585	2.2550

Fuente: elaboración propia

APÉNDICE 4. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PLIEGUE

Domo de solubilidad tipo I de los datos experimentales en el sistema isopropanol-biodiesel-agua a $24 \pm 1^\circ\text{C}$ y diagrama líquido vapor del sistema isopropanol-agua a una presión constante de 101.3 kPa



Fuente: elaboración propia

APÉNDICE 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

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

Variación dentro de las muestras

Para una muestra de n mediciones X_1, X_2, \dots, X_n se define como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los datos (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

X' : valor de la media de propiedades

n : número de mediciones

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

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

Donde:

V_{di} : valor de la variación para cada muestra

gl : grados libertad

h : número de muestras

n : número de propiedades

Variación entre las muestras

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

- 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% ($\alpha = 0.05$).
- Conclusiones

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

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

En la siguiente tabla se resume el método.

Resumen del método ANOVA

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

Fuente: elaboración propia

Análisis de la variación del índice de refracción en soluciones de isopropanol en agua de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 24 °C

Concentración nominal (% en peso)	Índice de refracción promedio (N)	Desviación	Vd	Ve
5	1.3370	0.000000	0.000000	0.000286
10	1.3390	0.000000	7.40E-32	
20	1.3460	0.000000	0.000000	
30	1.3540	0.000000	0.000000	
40	1.3575	0.000000	0.000000	
50	1.3623	0.000471	8.33E-08	
60	1.3670	0.000000	0.000000	
70	1.3705	0.000000	0.000000	
85	1.3728	0.000471	8.33E-08	
95	1.3745	0.000707	2.50E-07	
Promedio	1.3581	$\sum V_d$	4.17E-07	

Fuente: elaboración propia

Análisis de la variación del índice de refracción en soluciones de isopropanol en biodiesel de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 24 °C

Concentración nominal (% en peso)	Índice de refracción promedio (N)	Desviación	Vd	Ve
10	1.4440	0.0000	0.000000	0.00072
20	1.4347	0.0005	8.33E-08	
30	1.4298	0.0005	8.33E-08	
40	1.4200	0.0000	0.000000	
50	1.4135	0.0000	0.000000	
60	1.4038	0.0033	4.33E-06	
70	1.3958	0.0005	8.33E-08	
80	1.3887	0.0005	8.33E-08	
90	1.3835	0.0000	0.000000	
100	1.3740	0.0000	7.40E-32	
Promedio	1.4088	$\sum V_d$	4.75E-06	

Fuente: elaboración propia

Análisis de la variación del volumen de biodiesel adicionado en soluciones de isopropanol en agua de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 24 ± 1 °C

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel promedio (ml)	Desviación	Vd	Ve
5	0.0867	0.0189	0.00013	0.30001
10	0.0733	0.0471	0.00093	
20	0.0733	0.0189	0.00013	
30	0.0600	0.0000	0.00000	
40	0.0600	0.0000	0.00000	
50	0.0600	0.0283	0.00040	
60	0.0467	0.0189	0.00013	
70	0.0533	0.0189	0.00013	
85	0.2533	0.0189	0.00013	
95	1.8067	0.7165	0.19613	
Promedio	0.2573	$\sum V_d$	0.19813	

Fuente: elaboración propia

Análisis de la variación del volumen de agua adicionado en soluciones de isopropanol en biodiesel de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 24 ± 1 °C

Concentración nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel promedio (ml)	Desviación	Vd	Ve
10	0.0600	0.0283	0.00040	0.00696
20	0.0867	0.0377	0.00053	
30	0.1133	0.0377	0.00053	
40	0.1000	0.0283	0.00040	
50	0.1733	0.0754	0.00213	
60	0.1467	0.0189	0.00013	
70	0.2133	0.0471	0.00093	
80	0.2800	0.0283	0.00040	
90	0.2133	0.0189	0.00013	
100	0.0000	0.0000	0.00000	
Promedio	0.1387	$\sum V_d$	0.00560	

Fuente: elaboración propia

Análisis de varianza del índice de refracción en función de soluciones de isopropanol en agua de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema isopropanol-biodiesel-agua a 24 °C

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F_c
Concentración nominal (% en peso)	0.000286	9	0.000286	18513.13	2.8400
Repeticiones	1.389E-07	20	4.17E-07		

Fuente: elaboración propia

Análisis de varianza del índice de refracción en función de soluciones de isopropanol en biodiesel de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema isopropanol-biodiesel-agua a 24 °C

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F_c
Concentración nominal (% en peso)	0.006517	9	0.00072	4115.869	2.8400
Repeticiones	1.583E-06	20	4.75E-06		

Fuente: elaboración propia

Análisis de varianza del volumen adicionado de biodiesel a soluciones de isopropanol en agua de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema isopropanol-biodiesel-agua a 24±1°C

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F_c
Concentración nominal (% en peso)	2.70011	9	0.30001	40.88318	2.8400
Repeticiones	0.06604	20	0.19813		

Fuente: elaboración propia

Análisis de varianza del volumen adicionado de agua a soluciones de isopropanol en biodiesel de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema isopropanol-biodiesel-agua a 24±1°C

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F_c
Concentración nominal (% en peso)	0.06265	9	0.00696	33.5619	2.8400
Repeticiones	0.00187	20	0.00560		

Fuente: elaboración propia

APÉNDICE 6. ANÁLISIS DE COSTOS PARA EL TRABAJO DE GRADUCIÓN DEL SISTEMA TERNARIO IPA-BIODIESEL-AGUA

Costo de reactivos

Reactivos	Unidad	Fuente	Costo unitario (Q)	Cantidad	Costo total (Q)
Biodiesel	1 galón	Toledo	24.00	1	24.00
Isopropanol anhídrido	3 litro	Química Técnica	124.25	3	372.75
Agua destilada	2 garrafrones	Emb. Mariposa	15.00	2	30.00
				Total	426.75

Fuente: elaboración propia

Costo de equipo

Equipo	Descripción	Costo inicial (Q)	Depreciación (Q)	Costo/ 2 meses (Q)
Balanza analítica	marca OHAUS, modelo AR1530	18,393.00	3,678.60	613.10
Plancha de calentamiento con agitación	SYBRON/Thermolyne, SP18425	3,280.00	656.00	109.33
Refractómetro	marca ABBE, modelo 32200	35,000.00	7000.00	1,166.67
Campana de extracción	LABOTEC	36,952.00	7,390.40	1,231.73
			Total	3,120.83

Fuente: elaboración propia

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
Varilla de agitación	vidrio de 8 x 35 mm	PROINCA	10.50	1	10.50
Bureta	25 ml	PROINCA	323.75	2	323.75
Bureta	10 ml de boro clase B	DILAB	411.04	2	822.08
Beakers	25 ml de borosilicato	DILAB	41.11	2	82.22
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
				Total	5,300.58

Fuente: elaboración propia

Costo de accesorios

Accesorios	Descripción	Fuente	Costo unitario (Q)	Cantidad	Costo total (Q)
Pizetas de polietileno	125 ml	PROINCA	23.72	1	23.72
Soportes universales	Metálicos	DILAB	175.11	1	175.11
Anillos metálicos	hierro de 7 cm	DILAB	217.56	1	217.56
Agitador magnético	Pequeño	Química Técnica	42.00	2	84.00
				Total	500.39

Fuente: elaboración propia

Costo de energía eléctrica

Energía eléctrica	Potencia (watts)	Cantidad horas	kW-h totales	Costo kW-h (Q)	Costo total (Q)
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
				Total	136.47

Fuente: elaboración propia

Costo de otros

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
			Total	187.17

Fuente: elaboración propia.

Costos totales de la investigación

Resumen	Costo (q)
1. Reactivos	426.75
2. Equipo	3,120.83
3. Cristalería	5,300.58
4. Accesorios	500.39
5. Energía eléctrica	136.47
6. Otros	187.17
Total	9,672.19

Fuente: elaboración propia

APÉNDICE 7. IMPACTOS AMBIENTALES QUE PUEDEN SER GENERADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN

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	Gases	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.
		Ruido	No aplica	No aplica	No aplica, pues no se genera ningún ruido durante la experimentación.
		Vibraciones	No aplica	No aplica	No aplica, pues no se genera ningún tipo de vibración.

Continuación impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación

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

Continuación impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación

		domésticas)	drenaje principal.		
		Aguas residuales especiales (aguas generadas por servicios públicos municipales, actividades de servicios, industriales, agrícolas, pecuarias y hospitalarias)	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.
		Mezcla de las aguas residuales anteriores	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.
		Agua de lluvia	No aplica	No aplica, pues no se generará ningún Impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún Impacto ambiental.
3	SUELO	Desechos sólidos (basura común)	1. Papel mayordomo 2. Papel parafilm	<ul style="list-style-type: none"> • Durante la realización de la parte experimental de la investigación (1, 2) • Secado de la cristalería y limpieza del laboratorio (1) 	Manejo de desechos sólidos dentro del laboratorio.

Continuación impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación

		Desechos peligrosos (líquidos)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corrosivos 2. Reactivos 3. Explosivos 4. Tóxicos 5. Inflamables 6. Bioinfecciosos 	Durante todo el proceso de la realización de la parte experimental de la investigación, por la utilización de biodiesel (2, 3, 4 y 5).	Manejo de desechos líquidos dentro del laboratorio.
		Modificación del relieve o topografía del área	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	Flora (árboles y plantas)	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.
		Fauna (animales)	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.
		Ecosistema	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.

Continuación impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación

5	VISUAL	Modificación del paisaje	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"> 1. Cultural 2. Político 3. Económico 	Al terminar la investigación se espera obtener un aporte industrial para el proceso de lavado de biodiesel de manera eficiente y minimizando costos.	Se realizarán todas las actividades de la investigación procurando causar el mínimo impacto ambiental.

Fuente: elaboración propia

APÉNDICE 8. FOTOGRAFÍAS DE LA INVESTIGACIÓN

Detalle de la unidad de lavado de biodiesel



Fuente: elaboración propia

Detalle de la unidad de separación del agua de lavado



Fuente: elaboración propia

Detalle de la unidad de medición de índice de refracción a la temperatura de $24 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



Fuente: elaboración propia

Detalle de las soluciones de isopropanol en biodiesel e isopropanol en agua respectivamente a $24 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



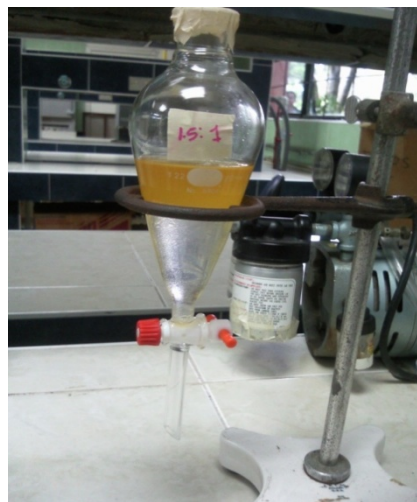
Fuente: elaboración propia

**Detalle de la unidad utilizada para las mezclas ternarias de las relaciones
biodiesel: agua por agitación a 24 ± 1 °C**



Fuente: elaboración propia

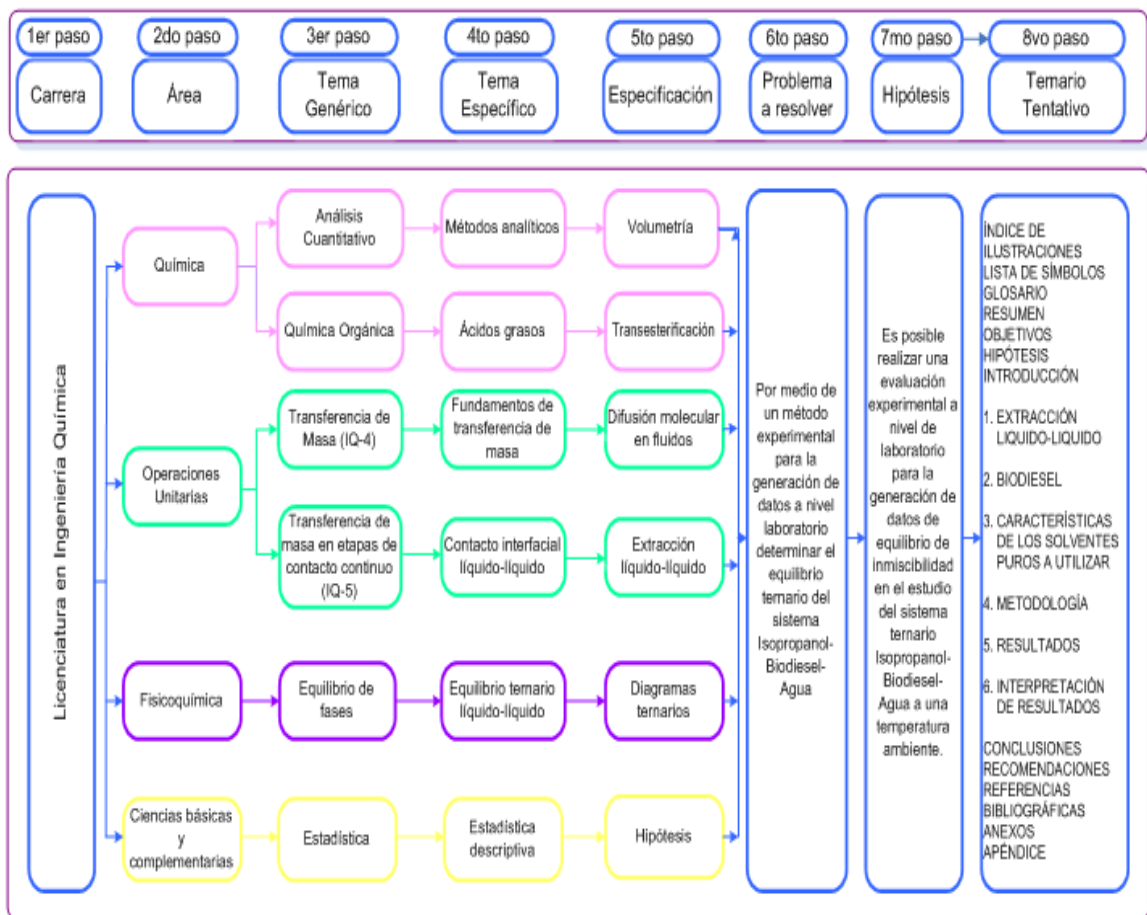
**Detalle de la unidad utilizada para la separación de fases de las relaciones
biodiesel: agua a la temperatura de 24 ± 1 °C**



Fuente: elaboración propia

ANEXO 1. REQUERIMIENTOS ACADÉMICOS

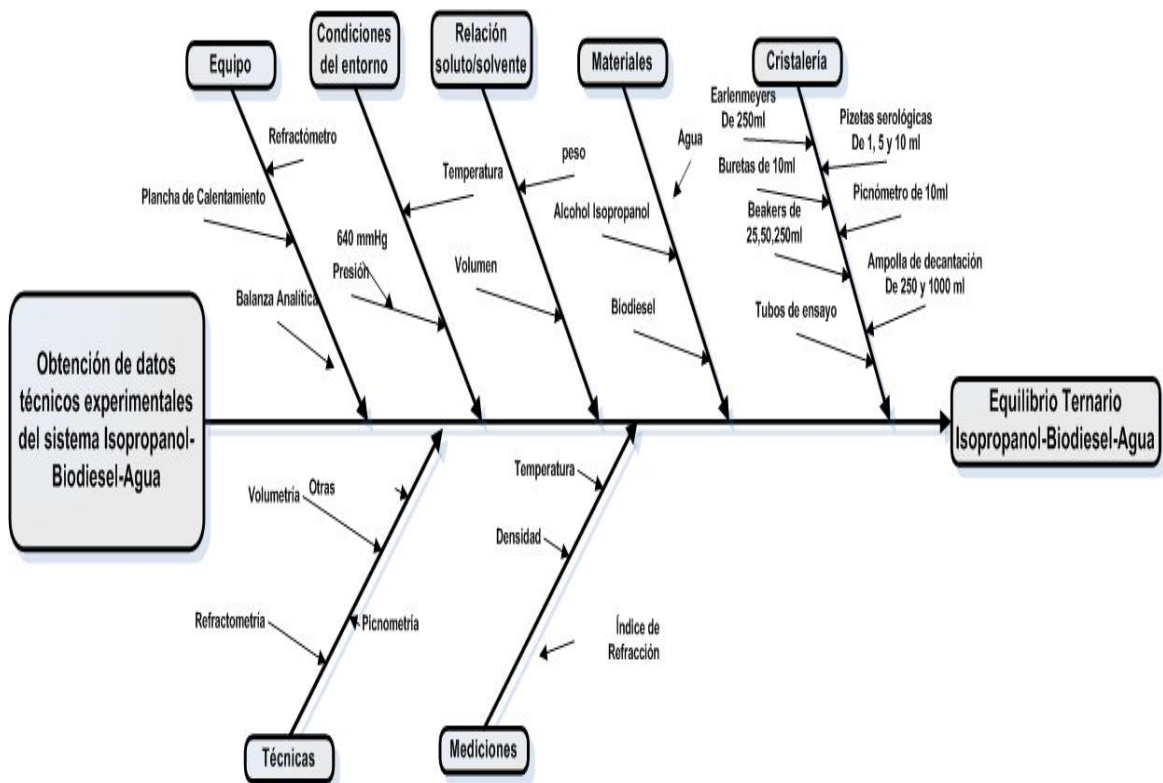
Requerimiento académico para la elaboración de tesis de extracción líquido-líquido en la carrera de ingeniería química



Fuente: elaboración propia

ANEXO 2. DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO (ISHIKAWA)

Diagrama de causa y efecto del sistema isopropanol biodiesel-agua



Fuente: elaboración propia