

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Producción de biodiésel a partir de aceite usado de frituras,  
utilizando etanol en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de  
la Universidad del Valle de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Ana Cecilia García Salas Pérez  
para optar para el grado académico de Licenciada en  
Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Producción de biodiésel a partir de aceite usado de frituras,  
utilizando etanol en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de  
la Universidad del Valle de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Ana Cecilia García Salas Pérez  
para optar para el grado académico de Licenciada en  
Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2025

Vo. Bo.

(f) \_\_\_\_\_

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M.Sc.

Terna examinadora

(f) \_\_\_\_\_

Ing. José Andrés Lam Ceballos

(f) \_\_\_\_\_

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M.Sc.

(f) \_\_\_\_\_

Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda, M.A.

Fecha de aprobación: Guatemala, 26 de febrero de 2025

## **PREFACIO**

La realización de este trabajo de graduación ha sido posible gracias al apoyo y colaboración del Departamento de Ingeniería de la Universidad del Valle de Guatemala, quienes me proporcionaron con los recursos, espacios y apoyo para poder desarrollar esta investigación sobre la producción de biodiésel con etanol a partir de aceite usado de frituras.

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta esta etapa de mi formación académica, dándome las fuerzas y oportunidades para superar cada reto en mi camino. Asimismo, expreso mi más sincero agradecimiento al ingeniero Zambrano, por su guía, retroalimentación constante y apoyo durante todo el proceso, desde la planeación del proyecto hasta la ejecución y redacción final del documento. También extiendo mi gratitud al equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias, Vero, Melissa, Chapo, Héctor y José, por su disposición y compromiso al facilitarme las herramientas necesarias para llevar a cabo los experimentos.

En el ámbito personal, quisiera expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, especialmente a mis papás Julio y Verónica, así como a mis hermanos, sobrinas, mi tía y mis abuelos, quienes con su amor, apoyo incondicional y dedicación me han impulsado a cumplir esta meta. A mi pareja, por su incontable apoyo y ayuda durante tantas noches y días, infinitas gracias. A mis amigos, gracias por su compañía, apoyo y aliento en los momentos más desafiantes. Finalmente, gracias a los compañeros y docentes con quienes compartí este camino, quienes me inspiraron a sacar lo mejor de mí y perseverar hasta el final.

A todos, extiendo mi agradecimiento.

# ÍNDICE

PREFACIO .....	v
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE ECUACIONES.....	xviii
LISTA DE CÁLCULOS.....	xxi
RESUMEN .....	xxiv
ABSTRACT.....	xxv
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. ANTECEDENTES .....	3
III. JUSTIFICACIÓN .....	5
IV. OBJETIVOS .....	6
A. General.....	6
B. Específicos .....	6
V. MARCO TEÓRICO.....	7
A. Contexto energético global .....	7
B. Estado energético en Guatemala.....	9
C. Sectores de consumo energético .....	10
a. Sector industrial .....	10
b. Sector residencial y comercial .....	11
c. Sector transporte .....	11
D. Biocombustibles en el mundo y en Guatemala.....	12
E. Biodiésel .....	13
a. Definición .....	13
b. Funcionamiento del biodiésel dentro del motor.....	14
c. Eficiencia de combustión y rendimiento.....	15
d. Normas .....	16

e.	Propiedades fisicoquímicas del biodiésel .....	17
f.	Caracterización de biodiésel a nivel laboratorio .....	20
g.	Ventajas y desventajas .....	25
F.	Materias primas en la producción de biodiésel .....	25
a.	Aceites y grasas .....	25
b.	Catalizadores .....	37
c.	Alcoholes .....	39
d.	Agentes de lavado .....	41
G.	Reacciones involucradas .....	43
a.	Transesterificación .....	43
b.	Neutralización .....	47
c.	Hidrólisis .....	48
d.	Saponificación .....	49
e.	Esterificación .....	50
H.	Diagramas teóricos del proceso .....	52
I.	Balances de masa teóricos .....	59
a.	Mezclador etanol/hidróxido de sodio .....	60
b.	Filtración del aceite usado de cocina .....	63
c.	Transesterificación .....	63
d.	Neutralización .....	65
e.	Decantación .....	67
f.	Formación del agente de lavado .....	67
g.	Lavado .....	68
h.	Secado .....	68
J.	Balances de energía teóricos .....	69
a.	Formación del etóxido ( $Q_{\text{etóxido}}$ ) .....	71
b.	Formación del agente de lavado .....	73
c.	Reacción de transesterificación ( $Q_{\text{reactor}}$ ) .....	74
d.	Secado ( $Q_{\text{secado}}$ ) .....	76

K.	Diseño de experimentos .....	77
a.	Tipos de diseños de superficie de respuesta (RSM) .....	78
b.	Diseño central compuesto (DCC) .....	79
c.	Programa “Design Expert” .....	81
L.	Análisis estadístico e inferencial.....	83
a.	Media aritmética .....	83
b.	Desviación estándar .....	84
c.	Propagación de incertidumbres en operaciones aritméticas .....	84
d.	Coefficiente de variación.....	85
e.	Intervalos de confianza .....	86
f.	Prueba t de Student .....	86
VI.	METODOLOGÍA .....	89
A.	Caracterización del aceite usado de frituras.....	89
a.	Filtración del aceite usado de frituras .....	90
b.	Densidad del aceite usado de frituras.....	90
c.	Número ácido (mg KOH/g aceite) y porcentaje de ácidos grasos libres ( % AGL).....	91
d.	Humedad del aceite usado de frituras .....	92
e.	Viscosidad del aceite usado de frituras .....	93
f.	Índice de refracción del aceite usado de frituras.....	93
g.	Material polar total (TPM) del aceite usado de frituras .....	94
B.	Diseño del experimento: Diseño Central Compuesto Face-Centered (FCC) en Design Expert.....	94
C.	Producción de biodiésel con etanol y metanol.....	95
D.	Caracterización del biodiésel producido .....	98
E.	Modelo de optimización en Design Expert (DCC-FCC).....	99
F.	Validación del modelo de optimización .....	100
VII.	RESULTADOS.....	101
VIII.	DISCUSIÓN .....	107

IX.	CONCLUSIONES .....	121
X.	RECOMENDACIONES.....	123
XI.	BIBLIOGRAFÍA .....	124
XII.	ANEXOS .....	131
A.	Datos originales .....	131
B.	Cálculos de muestra .....	146
C.	Datos calculados .....	153
D.	Análisis de error .....	176
E.	Cromatogramas .....	178
F.	Imágenes de la experimentación.....	187
G.	Diagrama de flujo .....	190
XIII.	ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO .....	191
XIV.	CERTIFICADOS DE ANÁLISIS .....	193
XV.	GLOSARIO .....	195

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Comparación de propiedades fisicoquímicas entre ésteres metílicos, etílicos y diésel fósil según normas ASTM D6751, EN 14214, ASTM D975 y referencias técnicas .....	18
<b>Cuadro 2.</b> Ventajas y desventajas del biodiésel.....	25
<b>Cuadro 3.</b> Composición química aproximada de aceites y grasas vírgenes .....	26
<b>Cuadro 4.</b> Ácidos grasos comunes: composición, saturación, isomería y fuentes .....	28
<b>Cuadro 5.</b> Composición porcentual de ácidos grasos en los aceites más comunes .....	29
<b>Cuadro 6.</b> Rangos para las principales propiedades fisicoquímicas de los aceites de fritura.....	35
<b>Cuadro 7.</b> Diferencias principales entre aceites vírgenes y aceites usados de frituras ....	36
<b>Cuadro 8.</b> Resumen comparativo entre metanol y etanol en base a distintos aspectos ...	40
<b>Cuadro 9.</b> Propiedades fisicoquímicas y riesgos del metanol y etanol.....	40
<b>Cuadro 10.</b> Propiedades relevantes de los agentes de lavado a 1 atm .....	42
<b>Cuadro 11.</b> Capacidades caloríficas para los componentes de la formación del etóxido	71
<b>Cuadro 12.</b> Entalpías estándar de formación para los componentes de la formación del etóxido.....	72
<b>Cuadro 13.</b> Capacidades caloríficas para los componentes de la formación del agente de lavado .....	74
<b>Cuadro 14.</b> Capacidades caloríficas para los componentes de la transesterificación .....	75
<b>Cuadro 15.</b> Entalpías estándar de formación para los componentes de la transesterificación .....	75
<b>Cuadro 16.</b> Capacidad calorífica para los componentes del secado .....	76
<b>Cuadro 17.</b> Calor latente de vaporización para los componentes del secado .....	77
<b>Cuadro 18.</b> Listado de equipos para la caracterización del aceite usado de frituras .....	89
<b>Cuadro 19.</b> Listado de reactivos para la caracterización de aceite usado de frituras.....	89

<b>Cuadro 20.</b> Listado de cristalería para la caracterización de aceite usado de frituras .....	89
<b>Cuadro 21.</b> Listado de materiales para la caracterización de aceite usado de frituras.....	90
<b>Cuadro 22.</b> Listado de equipos para la producción de biodiésel .....	95
<b>Cuadro 23.</b> Listado de reactivos para la producción de biodiésel .....	95
<b>Cuadro 24.</b> Listado de cristalería para la producción de biodiésel .....	95
<b>Cuadro 25.</b> Listado de materiales para la producción de biodiésel .....	96
<b>Cuadro 26.</b> Caracterización del aceite usado de frituras empleado para la producción de biodiésel .....	101
<b>Cuadro 27.</b> Comparación de rendimientos de biodiésel con etanol y metanol.....	101
<b>Cuadro 28.</b> Modelo cuadrático propuesto para el rendimiento de biodiésel con etanol	101
<b>Cuadro 29.</b> Evaluación estadística del modelo cuadrático y punto óptimo .....	103
<b>Cuadro 30.</b> Caracterización del biodiésel producido con etanol en el punto óptimo del modelo realizado .....	105
<b>Cuadro 31.</b> Caracterización del biodiésel producido con metanol según el punto experimental 3.....	105
<b>Cuadro 32.</b> Pesajes del picnómetro y aceite para la determinación de la densidad.....	131
<b>Cuadro 33.</b> Masa de ftalato acido de potasio y volumen empleado de KOH para la estandarización de la solución de KOH 0.1 M (pruebas aceite usado de frituras) .....	131
<b>Cuadro 34.</b> Mediciones de volumen de KOH y aceite para la determinación del número ácido (mg KOH/g aceite) .....	132
<b>Cuadro 35.</b> Mediciones de tiempo en el viscosímetro de Ostwald para el aceite usado de frituras .....	132
<b>Cuadro 36.</b> Índice de refracción a 40 °C del aceite usado de frituras.....	133
<b>Cuadro 37.</b> Masa de aceite y porcentaje de humedad desplegado por la balanza de humedad .....	133
<b>Cuadro 38.</b> Temperatura y materia polar total del aceite usado de frituras.....	134
<b>Cuadro 39.</b> Pesajes del picnómetro y biodiésel con etanol para la determinación de la densidad .....	134

<b>Cuadro 40.</b> Masa de ftalato acido de potasio y volumen de KOH empleado para la estandarización de la solución de KOH 0.1 M (pruebas BD con etanol) .....	135
<b>Cuadro 41.</b> Mediciones de volumen de KOH y biodiésel con etanol para la determinación del número ácido (mg KOH/g BD).....	135
<b>Cuadro 42.</b> Mediciones de tiempo en el viscosímetro de Ostwald para el biodiésel con etanol.....	136
<b>Cuadro 43.</b> Índice de refracción a 40 °C del biodiésel con etanol.....	137
<b>Cuadro 44.</b> Masa de biodiésel con etanol y porcentaje de humedad desplegado por la balanza de humedad.....	137
<b>Cuadro 45.</b> Mediciones de pH y prueba 3/27 para el biodiésel con etanol .....	138
<b>Cuadro 46.</b> Pesajes del picnómetro y biodiésel con metanol para la determinación de la densidad .....	139
<b>Cuadro 47.</b> Masa de ftalato acido de potasio y volumen de KOH empleado para la estandarización de la solución de KOH 0.1 M (pruebas BD con metanol) .....	139
<b>Cuadro 48.</b> Mediciones de volumen de KOH y biodiésel con metanol para la determinación del número ácido (mg KOH/g BD).....	140
<b>Cuadro 49.</b> Mediciones de tiempo en el viscosímetro de Ostwald para el biodiésel con metanol.....	141
<b>Cuadro 50.</b> Índice de refracción a 40 °C del biodiésel con metanol.....	141
<b>Cuadro 51.</b> Masa de biodiésel con metanol y porcentaje de humedad desplegado por la balanza de humedad.....	142
<b>Cuadro 52.</b> Mediciones de pH y prueba 3/27 para el biodiésel con metanol .....	143
<b>Cuadro 53.</b> Diseño experimental y niveles de factores para la producción de biodiésel con etanol y metanol .....	143
<b>Cuadro 54.</b> Masas reales utilizadas para la producción de biodiésel con etanol .....	144
<b>Cuadro 55.</b> Masas reales utilizadas para la producción de biodiésel con metanol .....	145
<b>Cuadro 56.</b> Masas reales utilizadas para la producción de biodiésel con etanol en el punto óptimo del modelo .....	146

<b>Cuadro 57.</b> Densidad del aceite usado de frituras.....	153
<b>Cuadro 58.</b> Molaridad estandarizada de la solución de KOH a emplear para la determinación del número ácido del aceite usado de frituras .....	154
<b>Cuadro 59.</b> Número ácido del aceite usado de frituras .....	154
<b>Cuadro 60.</b> Porcentaje de ácidos grasos libres del aceite usado de frituras.....	155
<b>Cuadro 61.</b> Viscosidad cinemática del aceite usado de frituras empleando un viscosímetro de Ostwald .....	155
<b>Cuadro 62.</b> Índice de refracción promedio del aceite usado de frituras .....	155
<b>Cuadro 63.</b> Humedad por gramo de aceite usado de frituras.....	156
<b>Cuadro 64.</b> Materia polar total promedio del aceite usado de frituras.....	156
<b>Cuadro 65.</b> Densidad del biodiésel con etanol .....	157
<b>Cuadro 66.</b> Molaridad estandarizada de la solución de KOH a emplear para la determinación del número ácido del biodiésel con etanol .....	157
<b>Cuadro 67.</b> Número ácido del biodiésel con etanol.....	158
<b>Cuadro 68.</b> Porcentaje de ácidos grasos libres del biodiésel con etanol.....	159
<b>Cuadro 69.</b> Viscosidad cinemática del biodiésel con etanol empleando un viscosímetro de Ostwald .....	159
<b>Cuadro 70.</b> Índice de refracción promedio del biodiésel con etanol .....	160
<b>Cuadro 71.</b> Humedad por gramo del biodiésel con etanol.....	161
<b>Cuadro 72.</b> Densidad del biodiésel con metanol .....	161
<b>Cuadro 73.</b> Molaridad estandarizada de la solución de KOH a emplear para la determinación del número ácido del biodiésel con metanol.....	162
<b>Cuadro 74.</b> Número ácido del biodiésel con metanol.....	163
<b>Cuadro 75.</b> Porcentaje de ácidos grasos libres del biodiésel con metanol .....	163
<b>Cuadro 76.</b> Viscosidad cinemática del biodiésel con metanol empleando un viscosímetro de Ostwald .....	164
<b>Cuadro 77.</b> Índice de refracción promedio del biodiésel con metanol .....	165
<b>Cuadro 78.</b> Humedad por gramo del biodiésel con metanol .....	165

<b>Cuadro 79.</b> Masas estequiométricas teóricas de reactivos y productos para la producción de biodiésel con etanol y metanol.....	166
<b>Cuadro 80.</b> Rendimiento de biodiésel producido con etanol y con metanol .....	167
<b>Cuadro 81.</b> Pruebas T para la comparación de rendimientos de biodiésel con etanol y metanol.....	167
<b>Cuadro 82.</b> Masas estequiométricas teóricas de reactivos y productos para la producción de biodiésel con etanol en el punto óptimo del modelo.....	168
<b>Cuadro 83.</b> Coeficientes del modelo cuadrático de rendimiento de biodiésel con etanol .....	168
<b>Cuadro 84.</b> Estadísticas de ajuste del modelo.....	168
<b>Cuadro 85.</b> Diagnósticos del modelo cuadrático .....	169
<b>Cuadro 86.</b> Punto óptimo del modelo cuadrático .....	169
<b>Cuadro 87.</b> Validación del punto óptimo del modelo cuadrático para el rendimiento de biodiésel con etanol.....	169
<b>Cuadro 88.</b> Rangos de precios de los reactivos para la producción de biodiésel a escala laboratorio en Guatemala .....	191
<b>Cuadro 89.</b> Comparación de costos relativos en la producción de biodiésel con etanol y metanol.....	191
<b>Cuadro 90.</b> Comparación de características entre el uso de etanol y metanol en la producción de biodiésel .....	192

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución porcentual del suministro mundial de energía primaria en 2023, según la fuente .....	7
<b>Figura 2.</b> Comportamiento de la generación por tipo de tecnología durante el año 2023 .....	10
<b>Figura 3.</b> Cambio en porcentajes de emisiones para NOx, material particulado EP, CO e hidrocarburos HC.....	16
<b>Figura 4.</b> Clasificación de ácidos grasos y triglicéridos: estructuras y saturación.....	27
<b>Figura 5.</b> Ácidos grasos con isomería cis y trans.....	28
<b>Figura 6.</b> Cambios químicos relevantes que ocurren durante el uso prolongado de aceites para freír.....	32
<b>Figura 7.</b> Reacción de transesterificación .....	43
<b>Figura 8.</b> Mecanismo de la reacción de transesterificación .....	44
<b>Figura 9.</b> Reacción general de neutralización y neutralización de jabones .....	48
<b>Figura 10.</b> Reacción de hidrólisis de un triglicérido .....	49
<b>Figura 11.</b> Reacción de saponificación .....	50
<b>Figura 12.</b> Reacción general de esterificación .....	51
<b>Figura 13.</b> Proceso con esterificación previa y neutralización .....	54
<b>Figura 14.</b> Proceso por lotes .....	55
<b>Figura 15.</b> Proceso con recuperación de metanol y glicerina refinada .....	55
<b>Figura 16.</b> Proceso simplificado con lavado final.....	56
<b>Figura 17.</b> Proceso de producción comunitaria .....	57
<b>Figura 18.</b> Esquema con postratamiento de biodiésel.....	57
<b>Figura 19.</b> Esquema con recuperación de metanol antes de la separación de fases.....	58
<b>Figura 20.</b> Esquema para la producción de biodiésel con etanol de este trabajo.....	59
<b>Figura 21.</b> Puntos experimentales en un diseño central compuesto (DCC).....	80

<b>Figura 22.</b> Interfaz del software Design Expert (no disponible en español).....	82
<b>Figura 23.</b> Gráficas de superficie de respuesta para el rendimiento de biodiésel con etanol en función de los factores experimentales.....	102
<b>Figura 24.</b> Diagnóstico gráfico del modelo cuadrático propuesto .....	104
<b>Figura 25.</b> Cromatograma y tabla de tiempos de retención del biodiésel con etanol producido en el punto óptimo del modelo .....	106
<b>Figura 26.</b> Superficie de respuesta del rendimiento de biodiésel con etanol en función de la relación molar alcohol:aceite y el porcentaje de catalizador .....	170
<b>Figura 27.</b> Superficie de respuesta del rendimiento de biodiésel con etanol en función de la relación molar alcohol:aceite y el tiempo de reacción .....	171
<b>Figura 28.</b> Superficie de respuesta del rendimiento de biodiésel con etanol en función del porcentaje de catalizador y el tiempo de reacción .....	172
<b>Figura 29.</b> Rendimientos predichos vs observados para el modelo cuadrático de biodiésel con etanol .....	173
<b>Figura 30.</b> Gráfico de normalidad de residuos del modelo cuadrático de rendimiento de biodiésel con etanol.....	174
<b>Figura 31.</b> Gráfico de residuos vs valores predichos del modelo cuadrático de rendimiento de biodiésel con etanol .....	175
<b>Figura 32.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 1 .....	178
<b>Figura 33.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 2 .....	179
<b>Figura 34.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 3 .....	180
<b>Figura 35.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 4 .....	181
<b>Figura 36.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 5 .....	182

<b>Figura 37.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 6	183
<b>Figura 38.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 7	184
<b>Figura 39.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 8	185
<b>Figura 40.</b> Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 9	186
<b>Figura 41.</b> Separación de fases durante la producción de biodiésel con etanol.....	187
<b>Figura 42.</b> Lavado del biodiésel con etanol utilizando agua destilada y cloruro de sodio	188
<b>Figura 43.</b> Sistema empleado para la producción de biodiésel a escala laboratorio con etanol y metanol.....	189
<b>Figura 44.</b> Lotes de biodiésel con etanol y metanol producidos.....	189
<b>Figura 45.</b> Diagrama de flujo para el proceso de producción de biodiésel con etanol y metanol.....	190
<b>Figura 46.</b> Certificado de análisis para el metanol al 99 % .....	193
<b>Figura 47.</b> Certificados de análisis para el etanol al 99 %.....	194

## LISTA DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Rendimiento de biodiésel.....	16
<b>Ecuación 2.</b> Número ácido expresado en mg KOH/g .....	21
<b>Ecuación 3.</b> Concentración real de la solución de KOH.....	21
<b>Ecuación 4.</b> Densidad mediante el uso de un picnómetro.....	22
<b>Ecuación 5.</b> Viscosidad cinemática expresada en mm <sup>2</sup> /s.....	22
<b>Ecuación 6.</b> Índice de refracción.....	23
<b>Ecuación 7.</b> Contenido de agua mediante la balanza de humedad.....	23
<b>Ecuación 8.</b> Relación entre número ácido y porcentaje de ácidos grasos libres .....	33
<b>Ecuación 9.</b> Ecuación general típica de un balance de masa por lotes con reacción química.....	60
<b>Ecuación 10.</b> Balance de masa general simplificado para el mezclador EtOH/NaOH.....	61
<b>Ecuación 11.</b> Cantidad de NaOH para reaccionar con los ácidos grasos libres.....	62
<b>Ecuación 12.</b> Cantidad de etanol a utilizar por ensayo .....	62
<b>Ecuación 13.</b> Formación de etóxido de sodio .....	62
<b>Ecuación 14.</b> Consumo de etanol en la formación de etóxido de sodio.....	62
<b>Ecuación 15.</b> Etanol en exceso derivada de la formación del etóxido de sodio.....	63
<b>Ecuación 16.</b> Agua formada durante la reacción de formación del etóxido de sodio.....	63
<b>Ecuación 17.</b> Balance de masa general simplificado para el filtrado del aceite .....	63
<b>Ecuación 18.</b> Balance de masa general simplificado para la transesterificación .....	64
<b>Ecuación 19.</b> Jabones formados durante la transesterificación.....	64
<b>Ecuación 20.</b> Biodiésel formado durante la transesterificación.....	65
<b>Ecuación 21.</b> Glicerol formado durante la transesterificación.....	65
<b>Ecuación 22.</b> Etanol en exceso derivado de la transesterificación.....	65
<b>Ecuación 23.</b> Balance de masa general simplificado de la neutralización.....	66
<b>Ecuación 24.</b> Ácido acético derivado de la neutralización .....	66

<b>Ecuación 25.</b> Ácidos grasos libres formados durante la neutralización.....	67
<b>Ecuación 26.</b> Acetato de sodio formado durante la neutralización.....	67
<b>Ecuación 27.</b> Balance de masa general simplificado de la decantación .....	67
<b>Ecuación 28.</b> Balance de masa general simplificado de la formación del agente de lavado .....	68
<b>Ecuación 29.</b> Balance de masa general simplificado del lavado.....	68
<b>Ecuación 30.</b> Balance de masa general simplificado del secado .....	68
<b>Ecuación 31.</b> Balance general de energía para un sistema cerrado.....	69
<b>Ecuación 32.</b> Balance de energía sin consideración de energía cinética y potencial.....	70
<b>Ecuación 33.</b> Relación entre calor y entalpía en sistemas isobáricos .....	70
<b>Ecuación 34.</b> Definición de entalpía .....	70
<b>Ecuación 35.</b> Relación entre entalpía y energía interna en sistemas con volumen y presión constante .....	70
<b>Ecuación 36.</b> Balance de energía simplificado, incluyendo suposiciones pertinentes.....	70
<b>Ecuación 37.</b> Balance de energía para la formación del etóxido .....	71
<b>Ecuación 38.</b> Calor de mezcla para la formación del etóxido.....	71
<b>Ecuación 39.</b> Calor de reacción para la formación del etóxido.....	71
<b>Ecuación 40.</b> Entalpía molar de reacción a partir de las entalpías estándar de formación	72
<b>Ecuación 41.</b> Pérdidas de calor para la formación del etóxido .....	72
<b>Ecuación 42.</b> Trabajo realizado por el agitador magnético.....	73
<b>Ecuación 43.</b> Potencia de agitación del agitador magnético .....	73
<b>Ecuación 44.</b> Balance de energía para la formación del agente de lavado .....	73
<b>Ecuación 45.</b> Calor de mezcla para la formación del agente de lavado.....	74
<b>Ecuación 46.</b> Calor de disolución para la formación del agente de lavado.....	74
<b>Ecuación 47.</b> Balance de energía para la transesterificación .....	74
<b>Ecuación 48.</b> Calor de mezcla para la transesterificación.....	75
<b>Ecuación 49.</b> Balance de energía para el secado.....	76
<b>Ecuación 50.</b> Calor de mezcla para el secado .....	76

<b>Ecuación 51.</b> Calor de evaporación para el secado .....	76
<b>Ecuación 52.</b> Parámetro alfa para un diseño rotacional .....	81
<b>Ecuación 53.</b> Media aritmética.....	83
<b>Ecuación 54.</b> Desviación estándar.....	84
<b>Ecuación 55.</b> Incertidumbre para operaciones de suma y resta .....	85
<b>Ecuación 56.</b> Incertidumbre para operaciones de multiplicación y división .....	85
<b>Ecuación 57.</b> Coeficiente de variación.....	86
<b>Ecuación 58.</b> Intervalo de confianza .....	86
<b>Ecuación 59.</b> Prueba t independiente .....	87
<b>Ecuación 60.</b> Prueba T pareada.....	88

## LISTA DE CÁLCULOS

<b>Cálculo 1</b> – Densidad del lote 1 de aceite usado de frituras en g/mL .....	146
<b>Cálculo 2.</b> Molaridad real de la solución de KOH .....	146
<b>Cálculo 3.</b> Número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras en mg KOH /g .....	146
<b>Cálculo 4.</b> Porcentaje de ácidos grasos libres del lote 1 de aceite usado de frituras .....	147
<b>Cálculo 5.</b> Viscosidad cinemática del lote 1 de aceite usado de frituras en mm <sup>2</sup> /s.....	147
<b>Cálculo 6.</b> Masa de NaOH adicional para reaccionar con los ácidos grasos libres.....	147
<b>Cálculo 7.</b> Masa de etanol para la formación del etóxido de sodio en el punto experimental 1.....	147
<b>Cálculo 8.</b> Masa de etóxido de sodio formada en el punto experimental 1.....	147
<b>Cálculo 9.</b> Masa de etanol en exceso del etóxido de sodio en el punto experimental 1..	148
<b>Cálculo 10.</b> Masa de agua formada en el punto experimental 1.....	148
<b>Cálculo 11.</b> Balance de masa de la formación del etóxido de sodio del punto experimental 1.....	148
<b>Cálculo 12.</b> Balance de masa de la filtración del aceite usado de frituras en el punto experimental 1.....	148
<b>Cálculo 13.</b> Masa de jabones formada en el punto experimental 1 .....	149
<b>Cálculo 14.</b> Masa de biodiésel formado en el punto experimental 1 .....	149
<b>Cálculo 15.</b> Masa de glicerina formada en el punto experimental 1 .....	149
<b>Cálculo 16.</b> Masa de etanol en exceso de la transesterificación en el punto experimental 1 .....	149
<b>Cálculo 17.</b> Balance de masa de la transesterificación en el punto experimental 1 .....	150
<b>Cálculo 18.</b> Masa de ácido acético glacial agregado en el punto experimental 1 .....	150
<b>Cálculo 19.</b> Masa de ácidos grasos libres formados en el punto experimental 1 .....	150
<b>Cálculo 20.</b> Masa de acetato de sodio formado en el punto experimental 1 .....	150
<b>Cálculo 21.</b> Balance de masa de la neutralización del punto experimental 1 .....	150

<b>Cálculo 22.</b> Balance de masa de la decantación del punto experimental 1 .....	151
<b>Cálculo 23.</b> Balance de masa del agente de lavado del punto experimental 1 .....	151
<b>Cálculo 24.</b> Balance de masa del lavado del punto experimental 1 .....	151
<b>Cálculo 25.</b> Balance de masa del secado en el punto experimental 1 .....	151
<b>Cálculo 26.</b> Calor de mezcla del etóxido de sodio en el punto experimental 1.....	151
<b>Cálculo 27.</b> Entalpía molar de la reacción de formación del etóxido de sodio en el punto experimental 1 .....	152
<b>Cálculo 28.</b> Calor de la reacción de etóxido de sodio en el punto experimental 1.....	152
<b>Cálculo 29.</b> Pérdidas de calor al ambiente durante la formación de etóxido de sodio en el punto experimental 1.....	152
<b>Cálculo 30.</b> Potencia del agitador mecánico .....	152
<b>Cálculo 31.</b> Trabajo mecánico del agitador mecánico en el punto experimental 1 .....	152
<b>Cálculo 32.</b> Calor total necesario para la formación del etóxido de sodio en el punto experimental 1 .....	153
<b>Cálculo 33.</b> Calor de evaporación del secado en el punto experimental 1 .....	153
<b>Cálculo 34.</b> Rendimiento de biodiésel producido con etanol en el punto experimental 1 .....	153
<b>Cálculo 35.</b> Media de las mediciones de índice de refracción del aceite usado de frituras en triplicado .....	176
<b>Cálculo 36.</b> Desviación estándar de las mediciones del número ácido del aceite usado de frituras .....	176
<b>Cálculo 37.</b> Incertidumbre de sumas y restas para la densidad del lote 1 de aceite usado de frituras .....	176
<b>Cálculo 38.</b> Incertidumbre en multiplicaciones y divisiones para la molaridad del lote 1 de aceite usado de frituras.....	176
<b>Cálculo 39.</b> Coeficiente de variación (CV. %) del número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras .....	176

<b>Cálculo 40.</b> Intervalo de confianza al 95 % del número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras .....	177
<b>Cálculo 41.</b> Prueba T independiente de los rendimientos de biodiésel con etanol y metanol .....	177
<b>Cálculo 42.</b> Prueba T pareada de los rendimientos de biodiésel con etanol y metanol...	177

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar la producción de biodiésel a partir de aceite usado de frituras, utilizando etanol como reactivo en sustitución de metanol, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Para ello, se caracterizó el aceite usado de frituras mediante pruebas fisicoquímicas para validarlo como materia prima. Se produjeron lotes de biodiésel utilizando etanol y metanol para comparar sus propiedades y rendimientos, además se implementó un diseño central compuesto de 20 puntos experimentales en el programa Design Expert para optimizar la reacción, considerando variables clave como la relación molar, la concentración de catalizador y el tiempo de reacción. Los resultados del modelo cuadrático propuesto mostraron un rendimiento promedio del 89.7 % con etanol, con propiedades que cumplen la norma ASTM D6751. Se identificó que el uso de etanol presenta desafíos operativos relacionados con la formación de emulsiones y la separación de fases, pero ofrece ventajas al ser un alcohol completamente renovable. Finalmente, se proponen mejoras al proceso, como la implementación de un sistema de recuperación de etanol, el uso de catalizadores heterogéneos y la evaluación de aceites más degradados para aumentar la sostenibilidad del proceso.

## **ABSTRACT**

The main objective of this research was to evaluate the production of biodiesel from used frying oil using ethanol as a substitute for methanol in the Unit Operations Laboratory at Universidad del Valle de Guatemala. The frying oil was characterized through physicochemical tests to validate its suitability as a raw material, and experimental batches of biodiesel were produced using ethanol and methanol to compare their properties and yields. A central composite design consisting of 20 experimental points was employed to optimize the reaction, considering key variables such as molar ratio, catalyst concentration, and reaction time. The proposed quadratic model predicted an average yield of 89.7 % with ethanol, obtaining biodiesel that meets the ASTM D6751 standard. The results indicate that the use of ethanol poses operational challenges related to emulsion formation and phase separation, but it offers advantages as a fully renewable alcohol. Finally, improvements to the process are proposed, such as the implementation of an ethanol recovery system, the use of heterogeneous catalysts, and the evaluation of more degraded oils to enhance sustainability and efficiency of the process.

# I. INTRODUCCIÓN

La producción de biodiésel a partir de aceites residuales ha surgido como una alternativa prometedora para reducir el impacto ambiental de los combustibles fósiles y aprovechar residuos industriales y domésticos. La elección del alcohol reactivo juega un papel importante en la eficiencia del proceso y la calidad del biodiésel obtenido. Tradicionalmente, el metanol ha sido el alcohol más utilizado debido a su disponibilidad y bajo costo; no obstante, el etanol, además de ser renovable y de origen biológico, tiene la ventaja de ser producido en Guatemala. Esto no solo favorece la sostenibilidad del proceso, sino también lo posiciona como un reactivo estratégicamente más accesible en el contexto local, disminuyendo la dependencia de alcoholes importados como el metanol.

Este trabajo tiene como finalidad evaluar la producción de biodiésel con etanol como reactivo alternativo en la transesterificación de aceite usado de frituras, un residuo común en la industria alimentaria y los hogares, determinando si sus propiedades cumplen los estándares de calidad ASTM D6751 y cómo se compara su rendimiento con el biodiésel producido con metanol.

Para alcanzar este objetivo, se implementó un diseño experimental central compuesto, considerando factores clave como la relación molar alcohol:aceite, la concentración de catalizador y el tiempo de reacción, debido a su alta incidencia en el rendimiento y la eficiencia de la reacción. La metodología incluyó la caracterización fisicoquímica del aceite usado de frituras para garantizar su idoneidad como materia prima y la producción de biodiésel con etanol y metanol para comparar sus rendimientos y propiedades.

Posteriormente, se propuso un modelo cuadrático para describir el comportamiento de la reacción y determinar condiciones más favorables de operación. Los resultados mostraron que, aunque el uso de etanol conlleva retos como la formación de emulsiones y una separación de fases más compleja, el rendimiento promedio en el punto óptimo alcanzó un 89.7 %, con propiedades fisicoquímicas dentro de los rangos aceptados por la norma

ASTM D6751. Esto evidencia que el etanol puede ser una alternativa viable al metanol, con la ventaja de ser un reactivo renovable y producido localmente.

Las conclusiones obtenidas permiten proponer mejoras al proceso, como la implementación de un sistema de recuperación de etanol. Además, se recomienda explorar las condiciones adecuadas de almacenamiento del biodiésel para evitar su degradación debido a la humedad.

## II. ANTECEDENTES

La producción de biodiésel mediante transesterificación ha sido objeto de numerosos estudios debido a su potencial para sustituir los combustibles fósiles convencionales. Esta reacción química ha sido ampliamente investigada para determinar las condiciones óptimas de producción y la viabilidad de diferentes materias primas y reactivos.

Uno de los primeros avances significativos fue el trabajo de Knothe et al. (2005), quienes evaluaron el impacto de las propiedades fisicoquímicas de diferentes aceites en la producción de biodiésel, demostrando la importancia de factores como el contenido de ácidos grasos libres (AGL) y la viscosidad en el rendimiento del producto. Posteriormente, estudios como el de Meher et al. (2006) se centraron en el uso de metanol debido a su bajo costo y alta reactividad, pero también señalaron las desventajas de este alcohol, como su carácter tóxico y su origen no renovable. Con el interés en encontrar alternativas más sostenibles, el uso de etanol ha sido propuesto como una opción prometedora. Investigaciones como las de Silva et al. (2011) analizaron los beneficios del etanol debido a su carácter renovable y menor toxicidad, pero también señalaron desafíos, como la tendencia a formar emulsiones que dificultan la separación de fases. Asimismo, Moser (2009) destacó la importancia de mejorar las condiciones de reacción para evitar pérdidas de rendimiento cuando se utiliza etanol.

En el contexto de aceites usados de frituras, varios autores han evaluado su aptitud como materia prima, como lo evidencian los trabajos de Alva y Cipra (2015), quienes resaltaron la necesidad de implementar etapas de pretratamiento para reducir el contenido de AGL y asegurar una mayor conversión. Sin embargo, se ha reportado que el aceite usado presenta variabilidad en su composición, lo que puede afectar la reproducibilidad de los resultados y requiere ajustes en los parámetros operativos (Danane et al., 2022). Este trabajo se enmarca en dichos antecedentes, explorando el uso de etanol como alcohol alternativo en la transesterificación de aceite usado de frituras para la producción de biodiésel.

Por otro lado, el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala cuenta con una trayectoria de más de 15 años experiencia investigativa en biodiésel, respaldada por una planta piloto con capacidad de producción de 480 litros. Este recurso ha permitido desarrollar proyectos orientados a evaluar diferentes materias primas y reactivos, consolidando la base técnica y académica necesaria para abordar los retos del presente trabajo.

### III. JUSTIFICACIÓN

El impacto sobre el ambiente provocado por el uso de petróleo y sus derivados ha llevado a la necesidad de buscar otro tipo de energías sostenibles. En el sector de transporte, los biocombustibles líquidos son las fuentes renovables más utilizadas, en donde predominan el bioetanol y el biodiésel (Dey et al., 2021). Este último es obtenido mediante una reacción de transesterificación a partir de aceites vegetales, que reaccionan con un alcohol en presencia de un catalizador. Su producción presenta una combustión más limpia, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) sin realizar modificaciones a los motores diésel tradicionales (Basque Research, 2014).

La planta piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala cuenta con una capacidad diaria de producción por lotes de 480 litros de biodiésel, empleando aceites usados de frituras y metanol como reactivos principales (Sosa, 2021). Sin embargo, este último es un alcohol altamente tóxico para el ser humano que, de ser ingerido o absorbido, puede llevar a complicaciones como acidosis metabólica, discapacidad visual y disfunción neurológica (NIOSH, 2020). Desde el punto de vista ambiental, la obtención de metanol es en su mayoría a partir de combustibles fósiles, principalmente gas natural, lo cual afecta el carácter renovable del biodiésel producido (Martin, 2021).

Por ende, el presente trabajo busca investigar y experimentar las condiciones de reacción necesarias en términos de relación molar alcohol:aceite, porcentaje de catalizador y tiempo de reacción para la sustitución de metanol por etanol como reactivo en la producción de biodiésel, ya que es completamente renovable y puede ser producido dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. General**

Producir biodiésel a partir de aceite usado de frituras utilizando etanol en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para determinar el rendimiento de la reacción.

### **B. Específicos**

1. Caracterizar con pruebas fisicoquímicas el aceite usado de frituras empleado como materia prima para la producción de biodiésel.
2. Comparar las propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido con etanol y metanol para determinar si ambas cumplen la norma ASTM D6751.
3. Calcular el rendimiento de la producción de biodiésel utilizando etanol y metanol para determinar cuál reactivo maximiza la reacción.
4. Proponer mejoras al método de producción de biodiésel, que genere el menor rendimiento, según el reactivo utilizado.

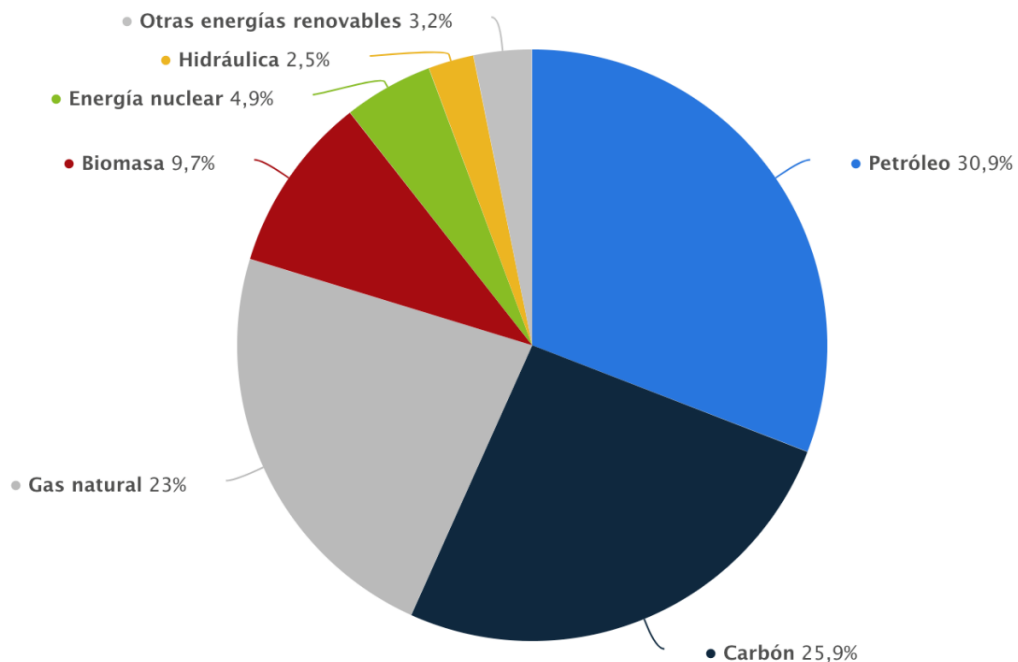
## V. MARCO TEÓRICO

### A. Contexto energético global

El panorama energético mundial atraviesa una fase de transición, impulsada por la creciente demanda, las preocupaciones sobre la seguridad en el suministro y la necesidad urgente de abordar el cambio climático. El crecimiento poblacional, junto con el desarrollo económico, han incrementado los requerimientos globales, principalmente en los países en vías de desarrollo (IPCC, 2021). Según la Agencia Internacional de la Energía (2022), se estima que el consumo de recursos energéticos aumentará aproximadamente un 30 % para 2040 si las tendencias actuales se mantienen, a medida que más países avanzan en su industrialización y urbanización (Agencia Internacional de Energía IEA, 2022).

Durante el siglo XX y principios del XXI, los combustibles fósiles – petróleo, carbón y gas natural – han dominado la matriz energética mundial, proporcionando aproximadamente el 84 % del suministro total de energía en 2022 (Agencia Internacional de Energía IEA, 2022).

**Figura 1.** Distribución porcentual del suministro mundial de energía primaria en 2023, según la fuente



(Statista, 2023)

El carbón ha sido históricamente la fuente de energía dominante, especialmente en la generación de electricidad, debido a su abundancia y bajo costo. Sin embargo, el carbón es también el combustible fósil más contaminante, responsable de alrededor del 40 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (IPCC, 2021). En respuesta a sus altos niveles de contaminación muchos países han comenzado a reducir gradualmente su dependencia del carbón, con un enfoque particular en el cierre de plantas de carbón (Agencia Internacional de Energía IEA, 2022).

El petróleo, por su parte es la fuente de energía más importante para el sector transporte, representando aproximadamente el 90 % del consumo energético en ese sector (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021). A nivel global, la demanda de petróleo sigue siendo elevada, especialmente en países en vías de desarrollo. No obstante, el crecimiento de los carros eléctricos, biocombustibles y políticas de eficiencia energética han moderado en parte el aumento en la demanda de petróleo (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021). En 2022, el consumo global de petróleo fue de aproximadamente 100 millones de barriles por día, ejemplificando la magnitud de su rol en la economía global (Agencia Internacional de Energía IEA, 2022).

El gas natural ha representado una fuente de energía más limpia en comparación con el carbón y el petróleo. Se utiliza tanto para la generación de electricidad como en la industria y en el sector residencial. Este produce aproximadamente 50 % menos emisiones de CO<sub>2</sub> que el carbón cuando se quema para generar electricidad, lo que ha impulsado su uso en diversos países como una alternativa de transición hacia fuentes de energía más limpias (BP, 2022). Sin embargo, sigue siendo un recurso fósil y el agotamiento de dichas fuentes no renovables, junto con el impacto negativo de sus emisiones sobre el cambio climático, ha impulsado un movimiento hacia fuentes más sostenibles.

En paralelo al uso de combustibles fósiles, se ha visto un crecimiento exponencial en el desarrollo de energías renovables. En 2022, alrededor del 29 % de la electricidad global se generó a partir de fuentes renovables, encabezadas por la energía hidroeléctrica, eólica y solar (IRENA, 2022). Las energías renovables no solo son esenciales para reducir las emisiones de carbono, sino que también ofrecen una mayor seguridad energética al reducir

la dependencia de los combustibles fósiles importados y, a largo plazo, ofrecen mayor estabilidad en los costos energéticos (IRENA, 2022).

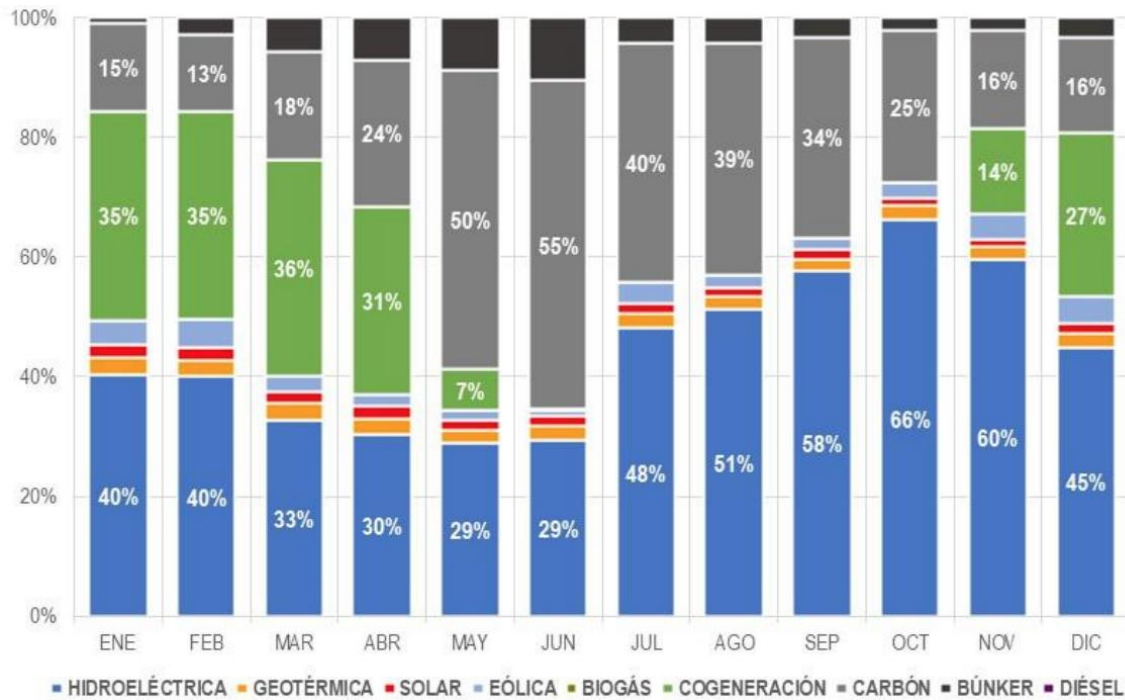
## **B. Estado energético en Guatemala**

Guatemala, como parte de la región de Centroamérica, cuenta con una amplia diversidad de fuentes de energía y un gran potencial para desarrollar energías renovables, principalmente la hidroeléctrica y la biomasa. Sin embargo, a pesar de sus recursos naturales, el país enfrenta desafíos para garantizar un acceso equitativo y sostenible a la energía en todas las regiones (CNEE, 2024). En 2023, la generación total de energía en Guatemala fue de 14,195.25 GWh, de los cuales el 99.4 % provinieron de generadores para cubrir la demanda eléctrica, mientras que el 0.6 % restante correspondió a energía inadvertida (CNEE, 2024).

Asimismo, la matriz de generación eléctrica del país está constituida en gran medida por fuentes renovables, principalmente la energía hidroeléctrica, que históricamente ha representado más del 50 % de la electricidad producida en Guatemala, aunque este porcentaje puede variar ligeramente cada año, dependiendo de la estación. En 2023, la energía hidroeléctrica representó aproximadamente el 52.3 % de la generación total, seguida por el 16 % proveniente de biomasa y el 24.9 % de combustibles fósiles, principalmente derivados de petróleo (MEM, 2023). A pesar de dichos avances en energías renovables, Guatemala aún depende en gran medida de los combustibles fósiles para satisfacer la demanda energética, especialmente de los sectores de transporte y manufactura, donde se usa diésel y gas natural (CNEE, 2024).

En línea con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo, el Gobierno de Guatemala ha delineado metas a través de la Política Energética 2023-2050, que busca incrementar la participación de energías renovables en la matriz eléctrica del país y reducir la dependencia de los combustibles fósiles (MEM, 2023). Entre las metas a resaltar de esta política se incluye alcanzar el 80 % de generación eléctrica a partir de fuentes renovables para 2050, impulsando especialmente el desarrollo de la energía solar y eólica, que actualmente tienen una participación limitada debido a barreras regulatorias y la falta de incentivos financieros (MEM, 2023).

**Figura 2.** Comportamiento de la generación por tipo de tecnología durante el año 2023



(AGER, 2024)

### C. Sectores de consumo energético

El consumo energético mundial está determinado por las características de cada sector económico, lo que genera diferencias significativas en los patrones de uso entre distintas regiones y países. En Guatemala, al igual que en muchas naciones en vías de desarrollo, sectores como el industrial, residencial, comercial y transporte presentan patrones de consumo energético influenciados por la disponibilidad de recursos, el acceso a tecnologías limpias y las limitaciones de infraestructura (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021). Entre estos sectores, el transporte juega un papel importante, tanto en la dependencia de combustibles fósiles como en los esfuerzos por la descarbonización a nivel global.

#### a. Sector industrial

A nivel global, el sector industrial es el mayor consumidor de energía, representando el 37 % del consumo final de energía en 2021, con una alta concentración en las industrias de manufactura intensiva en energía, como el acero, cemento y productos químicos (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021). En Guatemala, este sector representa

aproximadamente el 30 % del consumo energético total, con un enfoque en industrias como la de alimentos, bebidas y cemento (MEM, 2023). Aunque el uso de gas natural, carbón y diésel sigue siendo dominante, el aprovechamiento de biomasa en forma de residuos agrícolas contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles en algunas actividades industriales.

### **b. Sector residencial y comercial**

En el sector residencial y comercial, el consumo de energía global representó alrededor del 22 % del consumo final en 2021, utilizado para calefacción, refrigeración, iluminación y electrodomésticos (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021). En los países desarrollados ha habido avances en la implementación de tecnologías de eficiencia energética y energías renovables, como la solar y eólica.

En Guatemala, el sector residencial está marcado por la disparidad entre las zonas urbanas y rurales. Mientras que en las áreas urbanas el consumo de energía se ha electrificado en gran medida, en las zonas rurales aproximadamente el 50 % de los hogares aún dependen de la leña como principal fuente de energía, lo cual lleva a problemas ambientales y de salud debido a la deforestación y exposición al humo en interiores (MEM, 2023). En cuanto al sector comercial, la implementación de paneles solares en techos ha crecido progresivamente, especialmente en las zonas metropolitanas (CNEE, 2024).

### **c. Sector transporte**

El sector transporte es una de las áreas de mayor importancia a nivel global, abarcando el 27 % del consumo final de energía en 2021 y siendo el responsable de aproximadamente el 90 % del consumo del petróleo (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021). Incluye una variedad de medios de transporte, como carros ligeros, camiones, aviones y barcos, los cuales dependen principalmente de combustibles fósiles como diésel y gasolina para su funcionamiento. Aunque los carros eléctricos han ganado terreno en muchos países, los desafíos técnicos y de infraestructura limitan su adopción masiva, especialmente en el transporte pesado (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021).

En Guatemala, dicho sector es el mayor consumidor de energía y en 2022 representó el 45 % del consumo final de energía del país (MEM, 2023). Similar al panorama global,

el sector transporte depende casi en su totalidad de los combustibles fósiles, con el diésel siendo dominante en el transporte pesado y la gasolina utilizada principalmente en los carros ligeros. El transporte público también depende de los combustibles fósiles, con esfuerzos mínimos para electrificarlo (CNEE, 2024). Los altos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> y la creciente demanda de combustibles en el sector transporte representan problemáticas importantes para Guatemala en términos de reducir su dependencia del petróleo.

Además, la falta de una infraestructura adecuada para carros eléctricos y altos costos iniciales limitan su adopción en el país (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021). Por ende, la introducción de biocombustibles ofrece una oportunidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y disminuir la dependencia del diésel fósil.

#### **D. Biocombustibles en el mundo y en Guatemala**

Los biocombustibles han emergido como una alternativa sostenible frente a los combustibles fósiles debido a su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promover la independencia energética. A nivel mundial, los países líderes en la producción de biocombustibles, como Brasil y Estados Unidos, han impulsado políticas públicas para fomentar su adopción, especialmente en el sector transporte, que es responsable de una alta proporción de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Agencia Internacional de Energía IEA, 2021). En América Latina, el bioetanol y el biodiésel son los principales biocombustibles producidos, siendo el primero derivado principalmente de la caña de azúcar y el maíz, y el segundo de aceites vegetales y grasas animales.

En Guatemala, el uso de biocombustibles se ha considerado una alternativa viable para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir la contaminación ambiental. La biomasa representa un 16 % de la generación de energía primaria del país, destacando su uso en los ingenios azucareros y otras (MEM, 2023). Sin embargo, el sector transporte aún depende casi en su totalidad de derivados del petróleo, representando cerca del 45 % del consumo energético nacional. El uso de biodiésel a partir de aceites usados de fritura podría contribuir significativamente a promover una economía circular, reduciendo los desechos urbanos y generando un combustible renovable que disminuya las emisiones contaminantes.

A pesar de estos beneficios, la falta de regulaciones específicas y de un marco de incentivos económicos ha limitado la expansión de los biocombustibles en Guatemala. La Política Energética 2023-2050 establece metas ambiciosas para incrementar la participación de energías renovables, pero la participación del biodiésel en este esfuerzo sigue siendo incipiente (MEM, 2023). Con políticas adecuadas, mejoras en infraestructura y proyectos piloto, el país podría aprovechar mejor sus recursos renovables y posicionarse como un líder en la región en el uso de biocombustibles.

## **E. Biodiésel**

### **a. Definición**

El biodiésel es un combustible renovable compuesto por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos derivados de lípidos naturales, como aceites vegetales y grasas animales. Es producido mediante un proceso químico denominado transesterificación, en el cual los triglicéridos presentes en los lípidos reaccionan con un alcohol, generalmente metanol o etanol, en presencia de un catalizador, resultando en la formación de ésteres de ácidos grasos (biodiésel) y glicerol (glicerina) como subproducto (Zhang et al., 2003).

Desde una perspectiva química, los lípidos que constituyen la materia prima son triglicéridos, es decir, ésteres formados por una molécula de glicerol unida a tres ácidos grasos. La transesterificación consiste en reemplazar el glicerol por un alcohol de cadena corta, formando ésteres alquílicos que poseen propiedades combustibles similares al diésel fósil (Encinar et al., 2007). Este proceso es favorecido mediante el uso de un exceso de alcohol para desplazar el equilibrio químico hacia la formación de biodiésel.

En este contexto, los productos resultantes de la transesterificación son conocidos como ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés: Fatty Acid Methyl Esters) o ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE, por sus siglas en inglés: Fatty Acid Ethyl Esters), según se utilice metanol o etanol, respectivamente. Ambos presentan propiedades combustibles adecuadas, siendo los ésteres etílicos preferidos en algunos casos debido a su mejor comportamiento en climas fríos y su origen completamente renovable cuando se emplea etanol biológico.

En términos regulatorios, la definición técnica del biodiésel, según los estándares internacionales ASTM D6751 y EN 14214, se basa en su composición como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos obtenidos mediante transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol de cadena corta como metanol o etanol. Estos estándares especifican requisitos como una concentración mínima de ésteres, viscosidad cinemática adecuada, un punto de inflamación alto y una estabilidad oxidativa aceptable según el método Rancimat (ASTM International, 2024). Estas regulaciones garantizan que el biodiésel sea seguro, eficiente y compatible con motores diésel convencionales (Knothe et al., 2005).

Asimismo, el término B100 se refiere al biodiésel puro, sin mezclas con combustibles fósiles. Las mezclas suelen designarse con el prefijo "B" seguido de un número que indica el porcentaje de biodiésel presente. Por ejemplo, B20 contiene un 20 % de biodiésel y un 80 % de diésel fósil, resaltando la flexibilidad del biodiésel para adaptarse a diferentes necesidades y regulaciones del mercado energético.

#### **b. Funcionamiento del biodiésel dentro del motor**

El funcionamiento del biodiésel en motores diésel se basa en el ciclo Diesel, también conocido como ciclo de encendido por compresión. En este proceso, el aire es comprimido dentro de la cámara de combustión, aumentando su temperatura y presión hasta que el combustible es inyectado, atomizado e incendiado espontáneamente sin necesidad de una chispa externa. El ciclo consta de las siguientes etapas: admisión, compresión, inyección y combustión del combustible, expansión (trabajo) y escape de gases (Demirbas, 2009).

Durante la admisión, el pistón desciende, permitiendo la entrada de aire en la cámara de combustión. Posteriormente, en la etapa de compresión, el aire es comprimido adiabáticamente, elevando su temperatura entre 500 y 700 °C. Una vez que el aire ha alcanzado una temperatura suficientemente alta, se inyecta el biodiésel a alta presión en forma de finas gotas, conocido como atomización (Meher et al., 2006). En esta etapa, la viscosidad del combustible es un parámetro clave, ya que influye en la correcta atomización y mezcla con el aire caliente (Knothe et al., 2005).

La combustión ocurre debido al encendido espontáneo del combustible, influenciado por su índice de cetano, que determina la rapidez de ignición. Los ésteres etílicos presentan un índice de cetano ligeramente superior al de los ésteres metílicos, lo que favorece una combustión más uniforme y eficiente, reduciendo el retraso de encendido (Knothe et al., 2005).

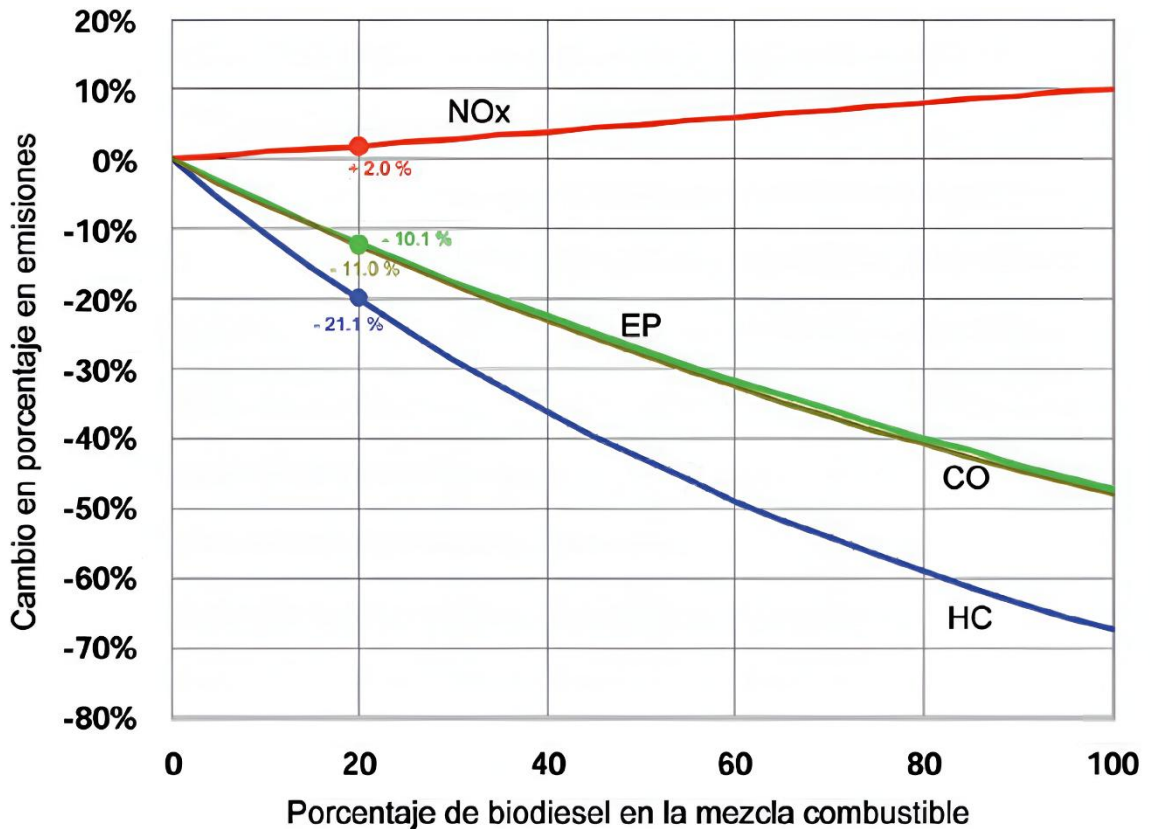
Luego, en la etapa de expansión (trabajo), la rápida expansión de los gases generados por la combustión empuja el pistón hacia abajo, produciendo trabajo mecánico que se transmite al cigüeñal. Finalmente, en la etapa de escape, los gases resultantes de la combustión ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y trazas de  $\text{NO}_x$ ) son expulsados de la cámara a través de la válvula de escape (Yaakob et al., 2013)

### **c. Eficiencia de combustión y rendimiento**

El biodiésel presenta ventajas significativas en términos de eficiencia de combustión y emisiones respecto al diésel fósil. Su mayor contenido de oxígeno (10-12 % en peso) favorece una combustión más completa, reduciendo las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y material particulado (PM o EP) (Encinar et al., 2007). Sin embargo, la combustión más caliente y oxigenada puede aumentar ligeramente las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), especialmente en los ésteres metílicos. En contraste, los ésteres etílicos, al poseer una estructura molecular menos insaturada, tienden a producir menores niveles de  $\text{NO}_x$  (Lapuerta et al., 2008).

El rendimiento del motor con biodiésel es comparable al del diésel convencional, aunque pueden observarse ligeras reducciones en la potencia y el torque debido a su menor valor calorífico. Sin embargo, esto se compensa con una combustión más limpia y una mayor lubricidad, lo que reduce el desgaste de los componentes del motor (Gnanaprakasam et al., 2013).

**Figura 3.** Cambio en porcentajes de emisiones para NOx, material particulado EP, CO e hidrocarburos HC



(Fundación Mapfre, 2010)

En cuanto a la compatibilidad con materiales del motor, el caucho natural puede degradarse con el biodiésel. Sin embargo, los motores modernos utilizan materiales resistentes como Viton o nitrilo, que son compatibles con combustibles alternativos (Gnanaprakasam et al., 2013).

En términos de rendimiento a nivel de la reacción, se expresa como la relación entre la masa de biodiésel producida y la masa de aceite utilizado, según la siguiente ecuación.

**Ecuación 1.** Rendimiento de biodiésel

$$Y(\%) = \frac{\text{Masa de biodiésel}}{\text{Masa de aceite}} * 100$$

#### d. Normas

Las normas internacionales más relevantes que regulan las propiedades fisicoquímicas del biodiésel son ASTM D6751, utilizada en Estados Unidos, y EN 14214,

aplicada en Europa. Estas normativas establecen criterios técnicos estrictos para garantizar que el biodiésel sea seguro, eficiente y compatible con motores diésel convencionales (ASTM International, 2024). Sin embargo, ambas normas se enfocan principalmente en ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), mientras que los ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE) no están directamente normados, aunque se consideran técnicamente equivalentes en algunas aplicaciones y se estudian en la literatura científica.

Las diferencias entre las normas ASTM y EN radican en sus enfoques regulatorios y necesidades de mercado. ASTM D6751, aplicable principalmente en Estados Unidos, establece rangos más amplios en parámetros como viscosidad y punto de inflamación para permitir una mayor flexibilidad en las materias primas utilizadas, incluidas grasas animales y aceites reciclados. EN 14214, utilizada en Europa, es más estricta en cuanto a la composición química, exigiendo una mayor pureza de ésteres y limitando los niveles de insaturación y contaminantes para asegurar el cumplimiento con estándares ambientales más rigurosos. Estas diferencias reflejan factores climáticos, tipos de motores predominantes y políticas energéticas (ASTM International, 2024) (European Committee for Standardization, 2018).

#### **e. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel**

Las diferencias entre ésteres metílicos, etílicos y el diésel fósil también se reflejan en sus propiedades fisicoquímicas esenciales, como se muestra en el cuadro siguiente.

La viscosidad cinemática mide la resistencia del combustible al flujo a una temperatura determinada (40 °C). Es esencial para la correcta atomización del combustible en el motor, afectando el rendimiento y la combustión. Los ésteres metílicos tienen viscosidades más bajas, facilitando la atomización, mientras que los etílicos son ligeramente más viscosos, lo que mejora su lubricidad, pero puede dificultar el flujo en climas fríos. Según ASTM D6751 y EN 14214, la viscosidad de los ésteres metílicos debe estar entre 1.9 y 6.0 mm<sup>2</sup>/s y 3.5 y 5.0 mm<sup>2</sup>/s, respectivamente. Aunque los ésteres etílicos no están normados, se han reportado valores dentro de rangos similares (ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018).

**Cuadro 1.** Comparación de propiedades fisicoquímicas entre ésteres metílicos, etílicos y diésel fósil según normas ASTM D6751, EN 14214, ASTM D975 y referencias técnicas

Propiedad	FAME ASTM D6751	FAME EN 14214	FAEE	Diésel fósil ASTM D975
Viscosidad (mm <sup>2</sup> /s a 40 °C)	1.9. 6.0	3.5. 5.0	3.5. 5.5	2.0. 4.5
Punto de inflamación (°C)	≥ 93	≥ 120	≥ 120	≥ 52
Estabilidad oxidativa (h)	No especificado	≥ 6	≥ 8	Alta
Índice de cetano	≥ 47	≥ 51	≥ 51	40. 52
Contenido de ésteres (%)	No especificado	≥ 96.5	≥ 96.5	No aplicable
Densidad (kg/m <sup>3</sup> a 15 °C)	No especificado	860. 900	850. 890	820. 860
Contenido de agua (%)	No especificado	≤ 0.05	≤ 0.05	No permitido
Número ácido (mg KOH/g)	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	No aplicable
Índice de yodo (mg I <sub>2</sub> /100 g)	No especificado	≤ 120	≤ 120	No aplicable

(ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018; Larosa, 2005)

El punto de inflamación es una propiedad relacionada con la seguridad, ya que indica la temperatura mínima a la cual los vapores del biodiésel se encienden en presencia de una fuente de ignición. Un punto de inflamación alto reduce el riesgo de incendio durante el almacenamiento y transporte. Los ésteres metílicos y etílicos presentan valores superiores a 93 °C (ASTM D6751) y 120 °C (EN 14214), siendo los ésteres etílicos menos volátiles debido a su mayor masa molecular (ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018).

La estabilidad oxidativa evalúa la resistencia del biodiésel a la degradación en presencia de oxígeno, un parámetro clave para su almacenamiento a largo plazo. Los ésteres metílicos son más propensos a la oxidación, mientras que los etílicos muestran una mayor resistencia, aunque pueden degradarse en ambientes húmedos debido a su mayor solubilidad en agua. EN 14214 establece un valor mínimo de estabilidad de 6 horas mediante el método Rancimat (ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018).

El índice de cetano mide la facilidad de encendido del combustible y su capacidad de combustión eficiente. Un índice alto mejora el encendido, reduce las emisiones y minimiza el ruido del motor. Los ésteres metílicos y etílicos deben cumplir con valores mínimos de 47 (ASTM D6751) y 51 (EN 14214). Los ésteres etílicos suelen tener índices superiores, favoreciendo una combustión más eficiente (ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018).

La densidad es otra propiedad importante, relacionada con la cantidad de masa contenida en un volumen específico de combustible. Según EN 14214, los ésteres metílicos deben tener densidades entre 860 y 900 kg/m<sup>3</sup> a 15 °C. Los ésteres etílicos, al utilizar etanol en lugar de metanol, presentan densidades ligeramente menores (850 a 890 kg/m<sup>3</sup>), afectando la cantidad de masa entregada por volumen inyectado, lo que puede traducirse en menos energía disponible para la combustión (ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018).

El contenido de agua es otra propiedad crítica que impacta la estabilidad y eficiencia del biodiésel durante el almacenamiento. Según EN 14214, los ésteres metílicos y etílicos deben tener un contenido máximo de agua de 0.05 % (ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018).

El número ácido es un parámetro que mide la cantidad de ácidos libres en el biodiésel, los cuales pueden causar corrosión en los sistemas de inyección de combustible. EN 14214 y ASTM D6751 establecen un valor máximo de 0.5 mg KOH/g biodiésel para los ésteres metílicos. Para los ésteres etílicos, los estudios indican valores generalmente más bajos debido a su mayor estabilidad frente a la hidrólisis (ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018).

Por último, el índice de yodo mide la cantidad de insaturaciones en el biodiésel, lo que se relaciona con la estabilidad oxidativa. EN 14214 establece un valor máximo de 120 mg I<sub>2</sub>/100 g de biodiésel para los ésteres metílicos. En los ésteres etílicos, los valores pueden variar ligeramente dependiendo de la materia prima utilizada, pero suelen estar dentro de rangos similares (ASTM International, 2024; European Committee for Standardization, 2018).

## **f. Caracterización de biodiésel a nivel laboratorio**

En el análisis del biodiésel, las pruebas de caracterización de laboratorio son esenciales para evaluar la calidad y asegurar que cumpla con estándares internacionales como ASTM D6751 y EN 14214. A continuación, se describen las principales pruebas de calidad, junto con los principios y ecuaciones asociadas.

### **i. 3/27**

La prueba 3/27 es un método cualitativo empleado para evaluar la pureza del biodiésel y verificar la ausencia de monoacilglicéridos, diacilglicéridos y triglicéridos residuales. Consiste en disolver 3 mL de biodiésel en 27 mL de metanol cuando se trabaja con ésteres metílicos. Si la muestra permanece completamente soluble, se considera que el biodiésel es de alta pureza; por el contrario, la formación de precipitados o turbidez indica la presencia de glicerolos o acilglicéridos no convertidos. Sin embargo, cuando se trabaja con ésteres etílicos, el metanol puede no ser el solvente más adecuado debido a diferencias en la solubilidad de estos compuestos, por lo que se debe buscar un solvente alternativo, como el hexano. Esta prueba es ampliamente utilizada debido a su simplicidad y rapidez, lo que la convierte en una herramienta valiosa para el control de calidad del biodiésel. Aunque es una prueba cualitativa, es clave para asegurar que el producto final cumpla con los estándares requeridos por normativas internacionales, como la ASTM D6751 o la EN 14214 (Knothe et al., 2005).

### **ii. Prueba de número ácido**

El número ácido mide la cantidad de ácidos grasos libres presentes en el biodiésel, los cuales pueden provocar corrosión en componentes metálicos y afectar negativamente la estabilidad del combustible durante su almacenamiento. La prueba consiste en una valoración ácido-base, en la que una solución estandarizada de hidróxido de potasio (KOH) 0.1 M se utiliza para neutralizar los ácidos grasos presentes en la muestra de biodiésel (Knothe et al., 2005). El número ácido se calcula mediante la siguiente ecuación.

**Ecuación 2.** Número ácido expresado en mg KOH/g

$$\text{Número ácido (mg KOH/g)} = \frac{M_{\text{KOH}} * (V_{\text{prom,KOH}} - V_{\text{blanco}}) * C_{\text{KOH}}}{V_{\text{aceite}} * \rho_{\text{aceite}}}$$

(Knothe et al., 2005)

En donde:

- $M_{\text{KOH}}$  = masa molar de KOH (g/mol)
- $V_{\text{prom,KOH}}$  = volumen de KOH promedio para titular el aceite (mL)
- $V_{\text{blanco}}$  = volumen de KOH usado en la titulación del blanco (mL)
- $C_{\text{KOH}}$  = concentración de la solución de KOH (M)
- $V_{\text{aceite}}$  = volumen de aceite usado en la titulación (mL)
- $\rho_{\text{aceite}}$  = densidad del aceite (g/mL)

En donde la concentración de la solución de KOH se calcula mediante una estandarización ácido-base utilizando ftalato ácido de potasio (KHP) como estándar primario.

**Ecuación 3.** Concentración real de la solución de KOH

$$C_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KHP}}}{M_{\text{KHP}} * V_{\text{KOH}}}$$

En donde:

- $m_{\text{KHP}}$  = masa de ftalato ácido de potasio (g)
- $M_{\text{KHP}}$  = masa molar del ftalato ácido de potasio (g/mol)
- $V_{\text{KOH}}$  = volumen de hidróxido de potasio añadido (L)

### iii. Densidad

La densidad es un parámetro fundamental que relaciona la masa del combustible con su volumen, lo cual es crucial para determinar la eficiencia energética del biodiésel. Una densidad adecuada garantiza una combustión eficiente y evita problemas en la dosificación de combustible en el motor. La densidad se mide utilizando un picnómetro o densímetro digital a una temperatura controlada (Demirbas, 2009). La relación entre masa y volumen se expresa mediante la siguiente ecuación.

**Ecuación 4.** Densidad mediante el uso de un picnómetro

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{(m_{\text{pic+aceite}} - m_{\text{pic vacío}})}{V_{\text{pic}}}$$

(Demirbas, 2009)

En donde:

- $m_{\text{pic+aceite}}$  = masa del picnómetro con aceite (g)
- $m_{\text{pic vacío}}$  = masa del picnómetro vacío (g)
- $V_{\text{pic}}$  = volumen del picnómetro utilizado (mL)

#### iv. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática mide la resistencia del biodiésel a fluir bajo condiciones gravitacionales. Es una propiedad crucial, ya que afecta directamente la atomización del combustible durante la inyección, lo cual influye en la eficiencia de la combustión y en el rendimiento del motor. La prueba consiste en medir el tiempo de flujo de una muestra a través de un viscosímetro capilar calibrado, el cual cuenta con una constante dada por el fabricante (Demirbas, 2009). La viscosidad se determina con la siguiente ecuación.

**Ecuación 5.** Viscosidad cinemática expresada en mm<sup>2</sup>/s

$$\text{Viscosidad cinemática (mm}^2/\text{s)} = t * C$$

(Demirbas, 2009)

En donde:

- $t$  = tiempo de flujo de la muestra a través del viscosímetro (s)
- $C$  = constante del viscosímetro (mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)

#### v. Índice de refracción

El índice de refracción mide la desviación de un rayo de luz al pasar a través de la muestra de biodiésel, siendo una propiedad que permite detectar impurezas o contaminación en el combustible. Valores fuera del rango esperado pueden indicar presencia de glicerol, agua o materiales no convertidos durante el proceso de transesterificación (Lapuerta et al., 2008). La prueba se realiza utilizando un refractómetro calibrado a 40 °C y se expresa mediante la siguiente ecuación.

### **Ecuación 6.** Índice de refracción

$$\text{Índice de refracción } (n_D) = \frac{c}{v}$$

(Lapuerta et al., 2008)

En donde:

- $c$  = velocidad de la luz en el vacío (m/s)
- $v$  = velocidad de la luz en la muestra (m/s)

### **vi. Contenido de agua**

El contenido de agua en el biodiésel es un factor determinante para su estabilidad y rendimiento, ya que el agua puede provocar corrosión en el sistema de combustible y fomentar el crecimiento microbiano durante el almacenamiento (Yaakob et al., 2013). La prueba más común para determinar el contenido de agua es mediante una balanza de humedad, que mide la pérdida de peso al calentar la muestra hasta evaporar completamente el agua presente (OHAUS, 2024). El contenido de agua se calcula mediante la siguiente ecuación.

### **Ecuación 7.** Contenido de agua mediante la balanza de humedad

$$\% \text{ agua} = \frac{(m_{inicial} - m_{final})}{m_{inicial}}$$

(OHAUS, 2024)

En donde:

- $m_{inicial}$  = masa inicial de la muestra antes del calentamiento (g)
- $m_{final}$  = masa de la muestra después de la evaporación completa del agua (g)

### **vii. Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)**

La cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) es una técnica analítica que permite separar, identificar y cuantificar compuestos volátiles con alta precisión y sensibilidad. En esta técnica, la cromatografía de gases separa los componentes de la muestra en función de su volatilidad y su interacción con la fase estacionaria de una columna capilar, utilizando un gas portador (como helio o nitrógeno). Los parámetros clave incluyen la temperatura del horno, el flujo

del gas y el tiempo de retención, que corresponde al tiempo que un compuesto tarda en alcanzar el detector (Sparkman et al., 2011).

Por otro lado, la espectrometría de masas fragmenta los compuestos ionizándolos y separa los iones resultantes según su relación masa/carga ( $m/z$ ). La identificación se realiza comparando los espectros obtenidos con bases de datos de referencia. La preparación de la muestra es fundamental para evitar interferencias: los ésteres etílicos de ácidos grasos se diluyen frecuentemente en hexano debido a su carácter apolar, lo que permite disolver eficientemente los ésteres y separar compuestos más polares, como glicerol o agua residual (Chiu y Kuo, 2019).

En el análisis, los compuestos separados ingresan al espectrómetro de masas y generan un cromatograma donde cada pico corresponde a un compuesto. En la producción de biodiésel etílico, el GC-MS se utiliza para identificar y cuantificar los ésteres etílicos, evaluar la eficiencia de la transesterificación y detectar impurezas como glicerol y monoglicéridos. Además, permite cuantificar el etanol residual, que puede alterar las propiedades del biodiésel si excede los límites normativos. Esta técnica garantiza que el biodiésel cumpla con los estándares de calidad establecidos y es esencial en el control de calidad y la optimización del proceso (Chiu y Kuo, 2019).

### **viii. pH**

La medición de pH del biodiésel con tiras indicadoras es un procedimiento sencillo y directo que permite evaluar la presencia de residuos ácidos o básicos en el producto. Para realizar la prueba, se sumerge una tira indicadora de pH en una pequeña cantidad de biodiésel y, tras unos segundos, se retira la tira y se compara el cambio de color con la escala de referencia incluida en el empaque. Esta comparación permite identificar si el biodiésel tiene un pH neutro o si contiene impurezas que podrían afectar su estabilidad y desempeño (Gupta et al., 2022).

La importancia de esta prueba radica en la detección de restos de catalizador o agentes de lavado que no hayan sido eliminados por completo durante el proceso de purificación. Un pH muy ácido o alcalino puede comprometer la calidad del

biodiésel y provocar problemas de corrosión en los componentes del motor. Por lo tanto, esta prueba rápida y accesible es fundamental como parte del control de calidad en la producción de biodiésel (Gupta et al., 2022).

### **g. Ventajas y desventajas**

El biodiésel presenta numerosas ventajas y desventajas que deben considerarse al compararlo con combustibles fósiles. Estas características influyen en su viabilidad como alternativa energética sostenible (Knothe et al., 2005). Un resumen de las principales ventajas y desventajas se presenta en el siguiente cuadro.

**Cuadro 2.** Ventajas y desventajas del biodiésel

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Es un combustible renovable, derivado de recursos naturales como aceites vegetales y grasas.	Mayor absorción de agua, lo que puede provocar corrosión en sistemas de almacenamiento y motores.
Reduce las emisiones de gases contaminantes como CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> y material particulado.	Menor densidad energética en comparación con el diésel fósil, lo que afecta el rendimiento.
Se degrada de 4 a 5 veces más rápido que el diésel fósil.	Mayor susceptibilidad a la oxidación, reduciendo su estabilidad a largo plazo.
Tiene propiedades lubricantes superiores, prolongando la vida útil del motor.	Mayor costo de producción debido a las materias primas y procesos involucrados.
Puede ser utilizado en motores diésel convencionales sin necesidad de modificaciones.	Su producción depende de materias primas agrícolas, compitiendo con la producción de alimentos.

(Demirbas, 2009; Meher et al., 2006)

## **F. Materias primas en la producción de biodiésel**

### **a. Aceites y grasas**

Los aceites y grasas son mezclas complejas de compuestos químicos principalmente formados por triglicéridos, ácidos grasos y materiales insaponificables. Su importancia en la producción de biodiésel radica en su disponibilidad, contenido energético y composición química, factores que afectan directamente el rendimiento y calidad del producto final (Baccaro, 2007).

### **i. Composición general**

Los aceites son líquidos a temperatura ambiente, generalmente derivados de fuentes vegetales como la soya, el maíz y la palma. Las grasas son sólidas a temperatura ambiente y provienen principalmente de fuentes animales como el sebo y la manteca. Ambos están compuestos principalmente por triglicéridos, que son ésteres formados por la unión de una molécula de glicerol con tres ácidos grasos (Baccaro, 2007).

**Cuadro 3.** Composición química aproximada de aceites y grasas vírgenes

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje aproximado ( %)</b>
Triglicéridos	90 – 98
Materiales insaponificables	0.5 – 5
Ácidos grasos libres	0.1 – 0.5
Agua	< 0.1

(Baccaro, 2007)

Los triglicéridos son la estructura principal de los aceites y grasas. Cada triglicérido está compuesto por tres moléculas de ácidos grasos unidas a una molécula de glicerol mediante enlaces éster. Cuando los tres ácidos grasos son iguales se define como triglicérido simple, mientras que cuando son diferentes se denomina triglicérido compuesto. La transesterificación convierte estos triglicéridos en biodiésel y glicerol como subproducto (Alva, 2015).

Los materiales insaponificables incluyen compuestos como esteroides, tocoferoles y pigmentos que no participan en reacciones químicas durante la producción de biodiésel, pero pueden afectar la estabilidad oxidativa y la calidad del producto (Alva, 2015).

Los ácidos grasos libres son ácidos grasos no unidos al glicerol. Su presencia es indeseable en la producción de biodiésel, ya que generan jabones durante la transesterificación y disminuyen el rendimiento del proceso (Alva, 2015).

### **ii. Química de los ácidos grasos**

Los ácidos grasos son los componentes fundamentales de los triglicéridos. Están compuestos por cadenas de carbono con un grupo carboxilo (-COOH) en un extremo y un grupo metilo (-CH<sub>3</sub>) en el otro extremo. La longitud de la cadena carbonada, el grado de

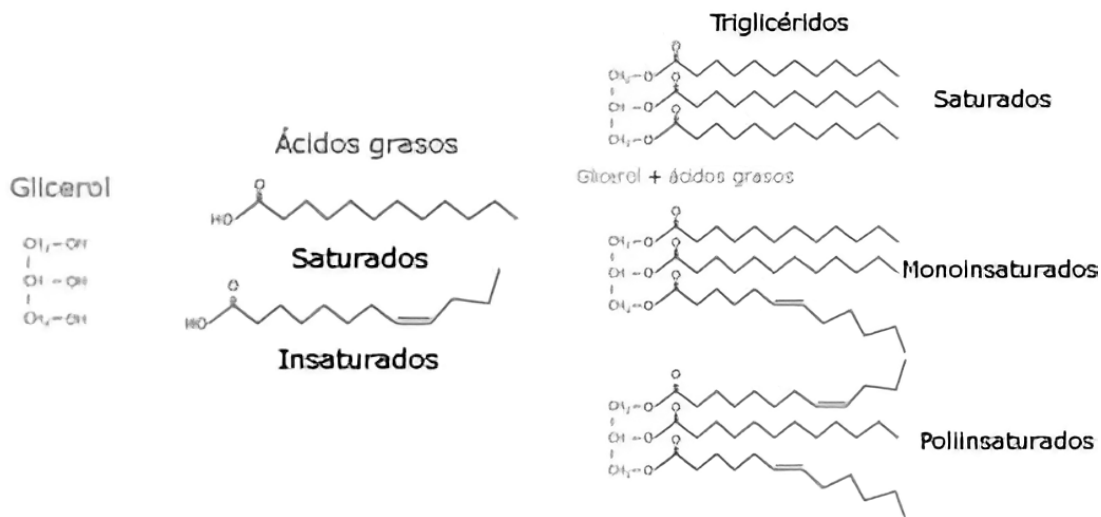
saturación y la isomería determinan las propiedades físicas y químicas de los aceites y grasas (Alva, 2015).

Los ácidos grasos saturados no contienen dobles enlaces en su estructura, lo que les confiere alta estabilidad oxidativa y puntos de fusión elevados. Son sólidos a temperatura ambiente, lo que puede dificultar su fluidez y aplicación en climas fríos. Algunos ejemplos son el ácido palmítico (C16:0) y ácido esteárico (C18:0) (Alva, 2015).

Por su parte, los monoinsaturados contienen un doble enlace, lo que reduce su punto de fusión y mejora la fluidez. Tienen estabilidad oxidativa moderada y son ideales para biodiésel en términos de eficiencia de combustión. Entre estos se encuentra el ácido oleico (C18:1) (Alva, 2015).

Por último, los poliinsaturados poseen múltiples dobles enlaces, lo que mejora la fluidez del aceite incluso a bajas temperaturas. Sin embargo, son muy propensos a la oxidación, lo que reduce la estabilidad del biodiésel. Aquí se encuentran el ácido linoleico (C18:2) y linolénico (C18:3) (Alva, 2015).

**Figura 4.** Clasificación de ácidos grasos y triglicéridos: estructuras y saturación

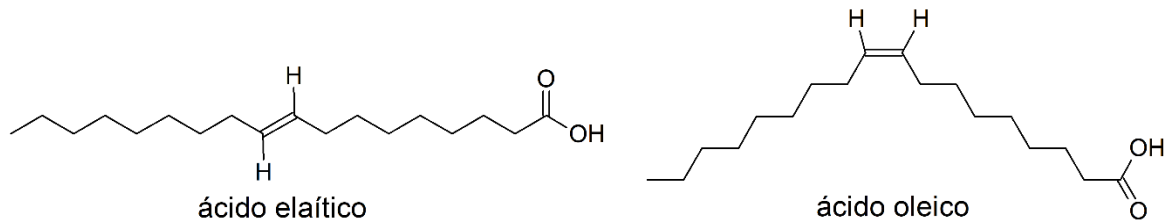


(ESHE, 2021)

En cuanto a la isomería, esta se divide principalmente en -cis y -trans. En los ácidos grasos con isomería cis, los átomos de hidrógeno están en el mismo lado del doble enlace, lo que confiere a la molécula una forma curvada y flexible. Esto reduce su punto de fusión y los hace más fluidos. En cambio, en la isomería trans, los átomos de hidrógeno están en

lados opuestos del doble enlace, generando una estructura rígida y lineal, lo que aumenta el punto de fusión y hace que sean sólidos a temperatura ambiente. Los ácidos grasos trans pueden formarse durante la hidrogenación parcial de aceites (Alva, 2015).

**Figura 5.** Ácidos grasos con isomería cis y trans



(Alaiz, 2018)

El siguiente cuadro resume los ácidos grasos más comunes, indicando su composición química, nivel de saturación, tipo de isomería (si aplica) y las fuentes naturales de donde se obtienen.

**Cuadro 4.** Ácidos grasos comunes: composición, saturación, isomería y fuentes

Nombre	Fórmula química	Saturación	Isomería	Fuentes comunes
Ácido butírico	$C_4H_8O_2$	Saturado	-	Mantequilla, leche
Ácido palmítico	$C_{16}H_{32}O_2$	Saturado	-	Aceite de palma, grasa animal
Ácido esteárico	$C_{18}H_{36}O_2$	Saturado	-	Sebo, manteca, cacao
Ácido oleico	$C_{18}H_{34}O_2$	Monoinsaturado	Cis	Aceite de oliva, girasol, aguacate
Ácido elaídico	$C_{18}H_{34}O_2$	Monoinsaturado	Trans	Aceites parcialmente hidrogenados
Ácido linoleico	$C_{18}H_{32}O_2$	Poliinsaturado	Cis	Aceite de soya, maíz, girasol
Ácido linolénico	$C_{18}H_{30}O_2$	Poliinsaturado	Cis	Aceite de lino, chía
Ácido araquidónico	$C_{20}H_{40}O_2$	Saturado	-	Aceite de cacahuete, grasas animales
Ácido gadoleico	$C_{20}H_{38}O_2$	Monoinsaturado	Cis	Aceite de pescado

Ácido behénico	C <sub>22</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub>	Saturado	-	Aceite de maní, colza
Ácido erúxico	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	Monoinsaturado	Cis	Aceite de colza
Ácido caprílico	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	Saturado	-	Aceite de coco, leche de cabra
Ácido cáprico	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	Saturado	-	Aceite de coco, aceite de palma
Ácido mirístico	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	Saturado	-	Aceite de coco, grasa de mantequilla

(Atabani et al., 2012)

Alternativamente, el siguiente cuadro muestra la composición porcentual de los ácidos grasos más relevantes presentes en los aceites y grasas comúnmente utilizados en la producción de biodiésel. Estos porcentajes reflejan la variabilidad típica según la fuente de obtención y el proceso de extracción, factores que determinan las propiedades fisicoquímicas esenciales para su aplicación en la industria.

**Cuadro 5.** Composición porcentual de ácidos grasos en los aceites más comunes

Aceite	Palmítico (%)	Esteárico (%)	Oleico (%)	Linoleico (%)	Linolénico (%)	Otros ácidos (%)
Aceite de palma	<b>44 – 48</b>	4 – 5	<b>37 – 41</b>	10 – 13	< 1	2 – 5
Aceite de soya	7 – 11	2 – 4	23 – 26	<b>50 – 55</b>	5 – 7	1 – 2
Aceite de oliva	7 – 17	1 – 3	<b>55 – 83</b>	3 – 21	< 1	1 – 5
Aceite de girasol	5 – 7	2 – 3	15 – 25	<b>60 – 75</b>	< 1	2 – 3
Aceite de canola	4 – 5	1 – 2	<b>55 – 65</b>	20 – 30	< 1	1 – 3
Aceite de maíz	10 – 12	2 – 3	25 – 30	<b>55 – 60</b>	< 1	2 – 4
Sebo animal	20 – 25	15 – 20	<b>40 – 45</b>	2 – 5	< 1	10 – 15
Grasa de manteca	20 – 25	10 – 15	<b>35 – 45</b>	2 – 4	< 1	8 – 10

(Lam et al., 2010; Silva et al., 2010)

Los aceites vegetales son la fuente más utilizada debido a su alta disponibilidad y renovabilidad. Sin embargo, su uso presenta desventajas significativas, como la competencia con la producción de alimentos y los impactos ambientales derivados de la

expansión de cultivos, como el de palma. Esta situación ha generado preocupaciones sobre la sostenibilidad del biodiésel producido a partir de aceites comestibles (Silva et al., 2010).

Por otro lado, las grasas animales representan una opción atractiva, ya que permiten el aprovechamiento de subproductos de la industria cárnica, reduciendo el desperdicio. Sin embargo, el alto contenido de ácidos grasos saturados limita la calidad del biodiésel producido a partir de estas grasas, especialmente en términos de fluidez a bajas temperaturas (Silva et al., 2010).

Los aceites usados de fritura han emergido como una alternativa sostenible y económica para la producción de biodiésel. No obstante, estos aceites presentan un alto nivel de degradación, lo que aumenta la concentración de ácidos grasos libres y peróxidos. Para su uso eficiente, es necesario someterlos a procesos de pretratamiento que reduzcan las impurezas y mejoren la calidad del producto final (Silva et al., 2010).

### **iii. Aceite usado de frituras**

El aceite usado de fritura (AUF) es un residuo generado tras utilizar aceites vegetales o grasas animales para cocinar alimentos mediante el proceso de fritura, sea una o repetidas veces. Durante su uso, el aceite sufre cambios químicos significativos debido a la exposición al calor, oxígeno y residuos alimenticios, lo que altera sus propiedades iniciales.

Estos cambios químicos se deben al proceso de fritura, la cual es una técnica de cocción en la que los alimentos se sumergen en aceite caliente, generalmente a temperaturas entre 150 y 200 °C. Durante este proceso, el aceite actúa como medio de transferencia de calor y como ingrediente, afectando la textura y el sabor de los alimentos. La fritura puede clasificarse en continua o discontinua según el tipo de operación, siendo la fritura profunda la más común en aplicaciones industriales (Serna-Saldivar, 2022).

Debido a la exposición continua al calor, oxígeno y residuos alimenticios, el calor sufre diversas reacciones químicas. La primera es la hidrólisis, en la cual la presencia de agua proveniente de los alimentos genera la ruptura de triglicéridos en ácidos grasos libres (AGL) y glicerol, aumentando la acidez del aceite. Asimismo, el contacto con el oxígeno del aire (oxidación) provoca la formación de peróxidos y productos secundarios polares

como aldehídos y cetonas, lo que contribuye al deterioro del aceite y genera olores y sabores desagradables (Serna-Saldivar, 2022; Bombón, 2021).

Además, a altas temperaturas, los ácidos grasos insaturados se polimerizan, formando compuestos de alto peso molecular que aumentan la viscosidad y generan depósitos oscuros. Finalmente, se encuentra la formación de compuestos polares, que incluyen productos de oxidación y ácidos grasos libres, que afectan negativamente la calidad del aceite y reducen su vida útil (Serna-Saldivar, 2022).

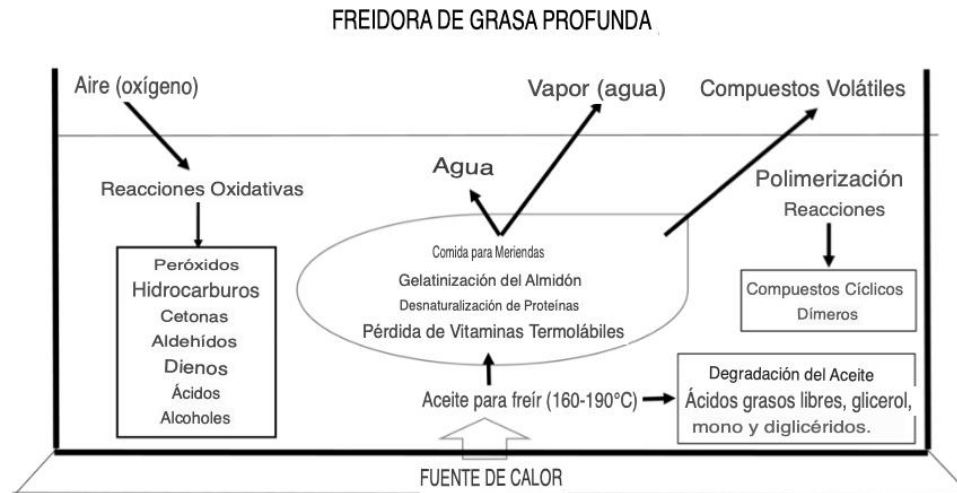
Dicha extensión de la degradación del aceite depende de diversos factores. Uno de los más importantes es la temperatura, ya que un aumento de esta acelera las reacciones de oxidación y polimerización, favoreciendo la formación de compuestos indeseables. Asimismo, el tiempo de uso del aceite juega un papel importante, pues, entre más se reutiliza, mayor es su deterioro debido a la acumulación de productos de degradación (Serna-Saldivar, 2022; Bombón, 2021).

Otro factor importante es el tipo de alimento cocinado. Los alimentos ricos en almidones o proteínas generan más residuos y partículas carbonizadas que se incorporan al aceite, afectando su calidad. Finalmente, la calidad inicial del aceite también influye significativamente. Los aceites con mayor contenido de ácidos grasos insaturados son más propensos a degradarse debido a su susceptibilidad a la oxidación, lo que reduce su estabilidad durante la fritura (Serna-Saldivar, 2022; Bombón, 2021).

El uso de aceite usado de fritura para producir biodiésel presenta diversas ventajas y desventajas. Entre las principales ventajas se encuentran su costo significativamente más bajo que el de los aceites vírgenes, su disponibilidad abundante como residuo industrial y doméstico, y su contribución a una economía circular mediante el reciclaje de residuos. Además, su uso permite reducir el impacto ambiental al evitar su desecho en cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado (Atabani et al., 2012). Sin embargo, también existen desventajas importantes. Si el aceite presenta un alto contenido de AGL, requiere pretratamiento mediante esterificación ácida. Además, la presencia de agua puede causar la formación de jabones y reducir el rendimiento del biodiésel. La calidad del aceite varía según su origen y condiciones de almacenamiento, lo que puede afectar el proceso de

producción. Asimismo, los costos adicionales asociados a procesos de pretratamiento, filtrado y purificación deben ser considerados (Sajid et al., 2016).

**Figura 6.** Cambios químicos relevantes que ocurren durante el uso prolongado de aceites para freír



(Serna-Saldivar, 2022)

Con relación a lo anterior, se recomienda realizar pretratamiento cuando el contenido de AGL supera el 2 %. Valores superiores al 5 % hacen imprescindible la esterificación ácida para evitar la formación de jabones. El agua debe ser inferior al 0.5 % para minimizar la formación de jabones y la hidrólisis de triglicéridos. En niveles superiores, es esencial realizar un secado previo. Aunque no existen límites normativos estrictos para los compuestos polares, su presencia debe minimizarse mediante filtrado y purificación para mejorar la calidad final del biodiésel (Bombón, 2021).

Además, se estima que se generan más de 25 millones de toneladas de aceite usado de cocina en todo el mundo cada año, según datos de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2021). En regiones como la Unión Europea y Estados Unidos, el manejo adecuado de estos residuos está regulado por políticas ambientales, mientras que, en países en desarrollo, su disposición inadecuada sigue siendo un problema importante.

Desde una perspectiva ambiental, un litro de aceite usado puede contaminar hasta 40,000 litros de agua, afectando gravemente los ecosistemas acuáticos (IRENA, 2021). El vertido incontrolado de este residuo también obstruye alcantarillas y contribuye a la contaminación del suelo, lo que hace imperativo establecer sistemas eficientes de

recolección y reciclaje. Además, incorporar aceites usados a la producción de biodiésel fomenta la economía circular, creando nuevas oportunidades de empleo en actividades de recolección, procesamiento y producción industrial. De esta manera, el manejo adecuado de este residuo no solo beneficia al ambiente, sino que también genera impactos económicos y sociales positivos a nivel global (Atabani et al., 2012).

#### iv. Caracterización del aceite usado de fritura

En el análisis del aceite usado de fritura, las pruebas de caracterización son esenciales para evaluar su calidad y determinar su idoneidad como materia prima en la producción de biodiésel. A continuación, se describen las principales pruebas de calidad utilizadas en el laboratorio, junto con sus principios y ecuaciones asociadas.

##### 1. Ácidos grasos libres (AGL) y número ácido

El contenido de ácidos grasos libres es un indicador fundamental de la calidad del aceite usado, ya que un alto contenido implica mayor acidez y requiere pretratamiento antes de la transesterificación. El valor recomendado para aceites destinados a la producción de biodiésel debe ser inferior al 2 %. Valores superiores al 5 % indican la necesidad de una esterificación ácida previa para evitar la formación de jabones (Gupta et al., 2022).

Al igual que para la caracterización de biodiésel, la prueba consiste en una valoración ácido-base utilizando una solución estandarizada de hidróxido de potasio (KOH) para neutralizar los ácidos grasos presentes (Knothe et al., 2005). El número ácido se calcula igualmente con la Ecuación 2 (ver Marco teórico – Caracterización de biodiésel a nivel laboratorio).

Luego, para convertir el número ácido a porcentaje de ácidos grasos libres (AGL), se utiliza una ecuación basada en la definición de número ácido y el peso molecular promedio de los ácidos grasos libres en la muestra.

**Ecuación 8.** Relación entre número ácido y porcentaje de ácidos grasos libres

$$\% AGL = \frac{\text{Número ácido} * 561}{M_{AG}}$$

(Knothe et al., 2005)

En donde:

- Número ácido = Cantidad en mg KOH/g
- $M_{AG}$  = Masa molar promedio de los ácidos grasos. Usualmente se toma la del ácido oleico, que es aproximadamente 282 g/mol.
- 561 = Es una constante que corresponde al equivalente en mg de KOH por mol

## **2. Densidad**

La densidad del aceite usado de fritura es un parámetro importante para determinar su calidad. El rango aceptable para aceites usados destinados a biodiésel está entre 0.88 y 0.95 g/mL a 15 °C (Gupta et al., 2022). Una densidad fuera de este rango puede indicar la presencia de contaminantes o productos de oxidación. Se mide utilizando un picnómetro (Demirbas, 2009). La relación entre la masa y el volumen se expresa mediante la Ecuación 3 (ver Marco teórico – Caracterización de biodiésel a nivel laboratorio).

## **3. Viscosidad cinemática**

La viscosidad cinemática mide la resistencia del aceite a fluir bajo condiciones gravitacionales, lo que indica su grado de degradación. El valor recomendado para aceites usados es de 35-60 mm<sup>2</sup>/s a 40 °C (Gupta et al., 2022). Un valor superior puede señalar la formación de polímeros y productos de oxidación. La prueba se realiza utilizando un viscosímetro capilar calibrado y se calcula de la misma forma que con el biodiésel usando la Ecuación 4 (ver Marco teórico – Caracterización de biodiésel a nivel laboratorio) (Demirbas, 2009).

## **4. Índice de refracción**

El índice de refracción permite detectar impurezas y productos de oxidación en el aceite. El rango aceptable está entre 1.46 y 1.48 a 40 °C (Gupta et al., 2022). Un valor mayor puede indicar la presencia de compuestos polares y productos de descomposición. Se mide con un refractómetro calibrado a 40 °C y se expresa mediante la Ecuación 5 (ver Marco teórico – Caracterización de biodiésel a nivel laboratorio) (Lapuerta et al., 2008).

## 5. Contenido de agua

El agua es un contaminante crítico en el aceite usado, ya que favorece la formación de jabones y la hidrólisis de triglicéridos. El límite máximo permitido es de 0.5 %. Se mide mediante una balanza de humedad, pesando la muestra antes y después de ser calentada a 105-110 °C hasta evaporar completamente el agua (OHAUS, 2024). La ecuación es la misma para el biodiésel que para el aceite, mediante la Ecuación 6 (ver Marco teórico – Caracterización de biodiésel a nivel laboratorio).

## 6. Material polar total (TPM)

El TPM mide la proporción de compuestos polares en el aceite, indicativos de oxidación y polimerización. Un contenido elevado señala que el aceite ha sido reutilizado excesivamente. El límite máximo aceptado es de 35 % (Gupta et al., 2022). La determinación se realiza mediante equipos especializados que utilizan métodos de absorción óptica o pruebas químicas específicas.

Dado que el aceite usado de fritura no está regulado por normas internacionales específicas, sus propiedades pueden variar considerablemente según factores como el tipo de alimento, la temperatura de fritura y el tiempo de uso. Por esta razón, se establecen rangos basados en estudios científicos y literatura especializada que han caracterizado esta materia prima y demostrado su viabilidad en la producción de biodiésel.

**Cuadro 6.** Rangos para las principales propiedades fisicoquímicas de los aceites de fritura

Propiedad	Unidad	Rango aceptable
Ácidos grasos libres	mg KOH/g; %	< 4; < 2
Densidad	g/mL	0.88 – 0.95
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s a 40 °C	35 – 60
Índice de refracción	-	1.46 – 1.48
Contenido de agua	%	< 0.6
Materiales polares totales	%	< 35

(Monika et al., 2023; Gupta et al., 2022; Yaakob et al., 2013)

Asimismo, en el siguiente cuadro se presenta una comparación que resume las diferencias en las propiedades fisicoquímicas entre aceites vírgenes y aceites usados de fritura.

**Cuadro 7.** Diferencias principales entre aceites vírgenes y aceites usados de frituras

<b>Propiedad</b>	<b>Aceite virgen</b>	<b>Aceite usado de fritura</b>
Índice de acidez	Generalmente bajo, indicando menor presencia de ácidos grasos libres.	Aumenta significativamente debido a la hidrólisis de triglicéridos durante la fritura, elevando la concentración de ácidos grasos libres.
Índice de peróxidos	Bajo, reflejando menor oxidación y mayor frescura del aceite.	Incrementa con el uso repetido, señalando una mayor oxidación y formación de compuestos peroxídicos.
Viscosidad	Estable y consistente, adecuada para aplicaciones culinarias y técnicas.	Se incrementa debido a la formación de polímeros y compuestos de mayor peso molecular durante la fritura.
Color	Característico según la fuente del aceite, generalmente claro y uniforme.	Se oscurece con el uso debido a la formación de compuestos de degradación y la incorporación de partículas de alimentos.
Estabilidad oxidativa	Alta, gracias a la presencia de antioxidantes naturales y menor contenido de compuestos reactivos.	Disminuye con el uso repetido, aumentando la susceptibilidad a la rancidez y la formación de compuestos tóxicos.
Contenido de AGL	Bajo, indicando alta calidad y frescura del aceite.	Aumenta significativamente con el uso, afectando negativamente la calidad y estabilidad del aceite.

(Gupta et al., 2022; Yaakob et al., 2013)

#### **v. Industria de aceites vegetales en Guatemala**

Guatemala se destaca como uno de los principales productores de aceite de palma a nivel mundial. En 2021, la producción de aceite crudo de palma alcanzó aproximadamente 941,963 toneladas métricas, de las cuales el 79 % se destinó a la exportación y el 21 % al consumo local. Esta agroindustria ha generado divisas significativas para el país, con exportaciones que ascendieron a US\$715 millones en 2021 (Ministerio de Economía de Guatemala, 2021).

En el mercado local, especialmente en Ciudad de Guatemala, los consumidores tienen acceso a una variedad de aceites vegetales, incluyendo aceite de soya, maíz, canola, girasol y mezclas vegetales. Las principales cadenas de supermercados ofrecen diversas marcas y presentaciones de estos aceites. Por ejemplo, la cadena de supermercados La Torre comercializa productos como aceite vegetal Blend Mazola, aceite de maíz Inés, aceite vegetal Girasol Ideal y aceite canola Mazola. Asimismo, Walmart Guatemala ofrece aceites

como aceite Olmeca Light, aceite Mazola Natural Blend y aceite Ideal Vegetal (La Torre, 2023; Walmart Guatemala, 2023).

Aunque el aceite de palma es predominante en la producción nacional, los consumidores en la capital muestran preferencias variadas. La disponibilidad de aceites de canola, girasol y mezclas vegetales en los principales puntos de venta sugiere una demanda significativa por estos tipos de aceite (Deguate, 2015).

Las decisiones de compra están influenciadas por factores como la percepción de beneficios para la salud, el precio y la versatilidad en la cocina. Los aceites con menor contenido de grasas saturadas, como el de canola y girasol, son percibidos como opciones más saludables, atrayendo a consumidores preocupados por su bienestar. Asimismo, el precio es un factor determinante en mercados sensibles a los costos, donde las mezclas vegetales suelen ser una opción más accesible (Deguate, 2015).

#### **b. Catalizadores**

Los catalizadores son sustancias químicas que aceleran la velocidad de una reacción sin ser consumidos durante el proceso. Actúan disminuyendo la energía de activación necesaria para que ocurra la reacción, permitiendo que el proceso se desarrolle de manera más eficiente y en condiciones menos extremas (Basha et al., 2009).

En la reacción de transesterificación, los triglicéridos presentes en los aceites reaccionan con un alcohol de cadena corta, como metanol o etanol, para formar biodiésel y glicerol. Sin un catalizador, esta reacción sería extremadamente lenta y requeriría temperaturas y presiones muy elevadas. El catalizador permite que la reacción ocurra a temperaturas moderadas y en tiempos razonables, mejorando el rendimiento y reduciendo los costos operativos (Basha et al., 2009).

Los catalizadores utilizados en la transesterificación se clasifican en tres categorías principales: homogéneos, heterogéneos y enzimáticos.

Los catalizadores homogéneos están disueltos en la fase líquida de la reacción, formando una mezcla uniforme. Se dividen en básicos y ácidos. Los catalizadores básicos, como hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) son los más utilizados

debido a su alta eficiencia y bajo costo. Sin embargo, son sensibles a la presencia de agua y ácidos grasos libres, lo que genera jabones y emulsiones no deseadas (Basha et al., 2009).

Por otro lado, los catalizadores ácidos como el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y el ácido clorhídrico (HCl) son efectivos para materias primas con alto contenido de ácidos grasos libres, aunque su uso implica tiempos de reacción más largos y condiciones más severas debido a su naturaleza corrosiva y tóxica (Basha et al., 2009).

Los catalizadores heterogéneos son sólidos que actúan en una fase diferente a la de los reactivos. Ejemplos comunes incluyen óxidos metálicos como óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y zeolitas. Estos catalizadores son reutilizables y más fáciles de separar del producto final, lo que los hace menos contaminantes. Sin embargo, su actividad catalítica suele ser menor bajo condiciones estándar y requieren temperaturas más elevadas para funcionar eficazmente (Helwani et al., 2009).

Por último, los catalizadores enzimáticos utilizan enzimas como lipasas para catalizar la reacción. Son altamente selectivos y generan menos residuos, lo que contribuye a un proceso más sostenible. No obstante, su alto costo y su sensibilidad a condiciones como la presencia de alcoholes en altas concentraciones limitan su uso a aplicaciones específicas y de alta tecnología (Basha et al., 2009).

Por otro lado, los catalizadores utilizados en la transesterificación deben cumplir con ciertas condiciones específicas para asegurar su efectividad. Deben ser anhidros, ya que la presencia de agua provoca la formación de jabones y disminuye la eficiencia del proceso. También deben tener una pureza elevada para minimizar reacciones secundarias no deseadas. Además, la estabilidad química y la resistencia a la desactivación por contaminantes son factores importantes para mantener un proceso continuo y eficiente (Basha et al., 2009; Helwani et al., 2009).

En la industria, los catalizadores básicos homogéneos, como NaOH y KOH, son los más utilizados debido a su bajo costo, alta disponibilidad y efectividad comprobada en reacciones con metanol. En algunos procesos avanzados, se emplean catalizadores heterogéneos como óxido de calcio (CaO) para facilitar la separación y reducir los costos de purificación del biodiésel (Basha et al., 2009; Helwani et al., 2009).

### **c. Alcoholes**

En la producción de biodiésel, los alcoholes juegan un papel fundamental, al actuar como reactivos principales en la reacción de transesterificación. La elección del alcohol afecta tanto el rendimiento como la sostenibilidad del proceso. Los alcoholes más comúnmente utilizados son el metanol y el etanol, aunque otros como el propanol, butanol e incluso alcoholes secundarios también pueden emplearse en ciertas condiciones específicas (Alva, 2015).

Los alcoholes son compuestos químicos que contienen uno o más grupos hidroxilo (-OH) unidos a un átomo de carbono. En la reacción de transesterificación, los triglicéridos presentes en los aceites y grasas reaccionan con un alcohol de cadena corta en presencia de un catalizador, formando ésteres de ácidos grasos (biodiésel) y glicerol como subproducto. La estructura química y la polaridad del alcohol utilizado afectan la miscibilidad con el aceite y la eficiencia del proceso (Baccaro, 2007).

#### **i. Metanol (CH<sub>3</sub>OH)**

El metanol es el alcohol más utilizado en la producción de biodiésel debido a su baja masa molecular, alta reactividad y disponibilidad comercial. Desde el punto de vista químico, su alta polaridad y pequeño tamaño molecular facilitan la disolución y la reacción con los triglicéridos. Económicamente, es más barato y está disponible a gran escala, ya que se produce industrialmente a partir de gas natural. Sin embargo, desde una perspectiva ambiental, es tóxico y altamente inflamable. Su producción a partir de fuentes fósiles lo hace menos sostenible (Karki et al., 2017).

#### **ii. Etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)**

El etanol es el segundo alcohol más utilizado en la producción de biodiésel. Su estructura química más larga lo hace menos polar que el metanol, pero es compatible con aceites vegetales y grasas animales. Presenta una mayor compatibilidad con aceites vegetales, lo que permite mejorar la miscibilidad y la formación de biodiésel. Desde una perspectiva ambiental, es menos tóxico y biodegradable, además de poder obtenerse de fuentes renovables como la caña de azúcar, el maíz y residuos agrícolas. Sin embargo, es más caro que el metanol debido a los costos de producción y la variabilidad en la oferta agrícola. Su característica higroscópica representa un desafío técnico, ya que absorbe agua

del ambiente, afectando la reacción y favoreciendo la formación de jabones (Bulla et al., 2014).

**Cuadro 8.** Resumen comparativo entre metanol y etanol en base a distintos aspectos

Aspecto	Metanol	Etanol
Costo	Más económico	Más caro
Disponibilidad	Alta, basado en fósiles	Variable, depende de cultivos
Impacto ambiental	Tóxico, menos sostenible	Biodegradable, renovable
Reactividad química	Alta, mayor velocidad	Media, reacciones más lentas
Seguridad	Altamente inflamable y tóxico	Menos tóxico, pero también inflamable

(Verma, 2016; Karki et al., 2017; Bulla et al., 2014)

Asimismo, se presenta un cuadro que detalla las principales diferencias entre el metanol y el etanol en base a sus propiedades fisicoquímicas y riesgos asociados. Esta comparación permite evaluar sus ventajas y limitaciones en el contexto de la producción de biodiésel, considerando aspectos económicos, ambientales y técnicos.

**Cuadro 9.** Propiedades fisicoquímicas y riesgos del metanol y etanol

Propiedad	Metanol	Etanol
Fórmula química	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
Peso molecular	32.04 g/mol	46.07 g/mol
Punto de ebullición	64.7 °C	78.5 °C
Densidad	0.791 g/mL a 20 °C	0.789 g/mL a 20 °C
Solubilidad	Totalmente miscible	Totalmente miscible
Inflamabilidad	Altamente inflamable	Altamente inflamable
Toxicidad	Muy tóxico; causa ceguera o muerte si se ingiere	Menos tóxico, pero puede causar intoxicación severa
Impacto ambiental	Menos sostenible, depende de fuentes fósiles	Más sostenible, puede derivarse de fuentes renovables
Costo aproximado	Más bajo debido a su producción industrial en masa	Más alto debido a costos de cultivo y procesamiento
Higroscopicidad	Baja	Alta, absorbe agua del ambiente
Uso industrial	Biodiésel a gran escala	Aplicaciones sostenibles y rurales

(Bulla et al., 2014; Sosa, 2021)

### **iii. Isopropanol y butanol**

El isopropanol ( $C_3H_7OH$ ) y el butanol ( $C_4H_9OH$ ) también han sido investigados para la producción de biodiésel. Ambos presentan ventajas potenciales debido a su mayor longitud de cadena, lo que reduce la polaridad y mejora la solubilidad en aceites, favoreciendo la miscibilidad. El butanol, en particular, ya que es menos volátil y tóxico que el metanol, lo que lo hace más seguro para manejar en entornos industriales. Sin embargo, sus costos de producción son significativamente más altos y su disponibilidad comercial es limitada, lo que restringe su uso a proyectos de investigación y desarrollos industriales específicos (Farobie y Yukihiro, 2015).

### **d. Agentes de lavado**

El lavado del biodiésel es una etapa esencial en el proceso de producción, diseñada para eliminar impurezas como glicerol residual, catalizadores, jabones y alcohol no reaccionado que puedan afectar la calidad del producto final. Los agentes de lavado juegan un papel crucial en este proceso, ya que garantizan que el biodiésel cumpla con las normas internacionales, como ASTM D6751 y EN 14214.

Los agentes de lavado más comunes incluyen agua destilada, soluciones ácidas y, en casos más avanzados, técnicas de lavado seco con materiales adsorbentes. El lavado con agua destilada es uno de los métodos más utilizados debido a su simplicidad y efectividad. Al emplear agua a una temperatura controlada, generalmente alrededor de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se mejora la capacidad de arrastre de las impurezas y se evita la formación de emulsiones. Este método es ideal para eliminar compuestos solubles en agua, como restos de glicerol y catalizadores (Marchetti et al., 2007).

Por otro lado, las soluciones ácidas, como el ácido acético glacial, son efectivas para neutralizar los residuos alcalinos del biodiésel y romper las emulsiones formadas durante la reacción de transesterificación. El ácido acético es preferido debido a su disponibilidad, baja toxicidad relativa y capacidad para ajustar el pH del producto final. Finalmente, el lavado seco utiliza materiales como arcillas activadas, sílica o resinas para eliminar impurezas sin generar residuos líquidos. Aunque es más costoso, presenta ventajas significativas en términos de sostenibilidad y reducción de residuos (Bulla et al., 2014).

La química detrás de los agentes de lavado radica en sus interacciones con los componentes residuales del biodiésel. El agua destilada actúa como un solvente universal para las impurezas polares, facilitando su eliminación mediante arrastre físico. Cuando se calienta a 40 °C, aumenta su capacidad de solubilización, permitiendo una eliminación más eficiente de glicerol y catalizadores (Marchetti et al., 2007).

Por su parte, el ácido acético glacial, como un ácido débil, neutraliza las bases presentes en la mezcla, formando sales que son fácilmente removibles en la fase acuosa. Además, su capacidad para desestabilizar emulsiones lo convierte en una opción ideal frente a otros ácidos más fuertes, como el clorhídrico, que son más corrosivos y difíciles de manejar. El ácido acético glacial también es más fácil de eliminar durante la etapa de secado, ya que su volatilidad permite que se evapore más fácilmente en comparación con otros ácidos, reduciendo costos y tiempos en el procesamiento (Bulla et al., 2014).

**Cuadro 10.** Propiedades relevantes de los agentes de lavado a 1 atm

<b>Propiedad</b>	<b>Agua destilada</b>	<b>Ácido acético glacial</b>	<b>Ácido sulfúrico</b>	<b>Ácido clorhídrico</b>
Fórmula	H <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub> COOH	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCl
pH	7 (neutral)	≈ 2.4 (ácido)	≈1 (muy ácido)	≈1 (muy ácido)
Viscosidad	1.002 mPa·s (a 20 °C)	1.22 mPa·s (a 20 °C)	26.7 mPa·s (a 20 °C)	Similar al agua
Temp. de ebullición	100 °C	118 °C	290 °C	57 °C
Solubilidad en biodiésel	Baja	Moderada	Baja	Baja
Capacidad de lavado	Arrastra jabones y catalizadores	Neutraliza jabones	Neutraliza bases fuertes y jabones	Neutraliza bases fuertes y jabones
Toxicidad	Nula	Baja, manejar con cuidado	Alta, corrosivo y peligroso	Alta, corrosivo y peligroso
Ventaja principal	Inerte y no reactivo	Neutraliza residuos alcalinos	Elimina catalizadores residuales	Elimina catalizadores residuales
Desventaja principal	Puede requerir varios ciclos de lavado	Puede dejar trazas de olor si no se elimina	Muy corrosivo, difícil de eliminar	Muy corrosivo, introduce agua al sistema

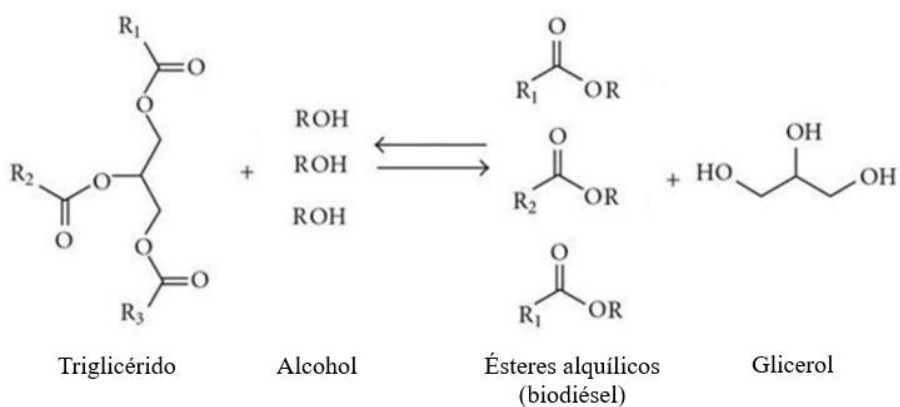
(Bulla et al., 2014; Marchetti et al., 2007)

## G. Reacciones involucradas

### a. Transesterificación

La transesterificación es una reacción química en la que un triglicérido reacciona con un alcohol, generalmente en presencia de un catalizador, para producir ésteres alquílicos (biodiésel) y glicerol como subproducto. En esta reacción, los grupos éster de los triglicéridos son reemplazados por el alcohol, formando ésteres de ácidos grasos y liberando glicerol (Knothe et al., 2005).

**Figura 7.** Reacción de transesterificación



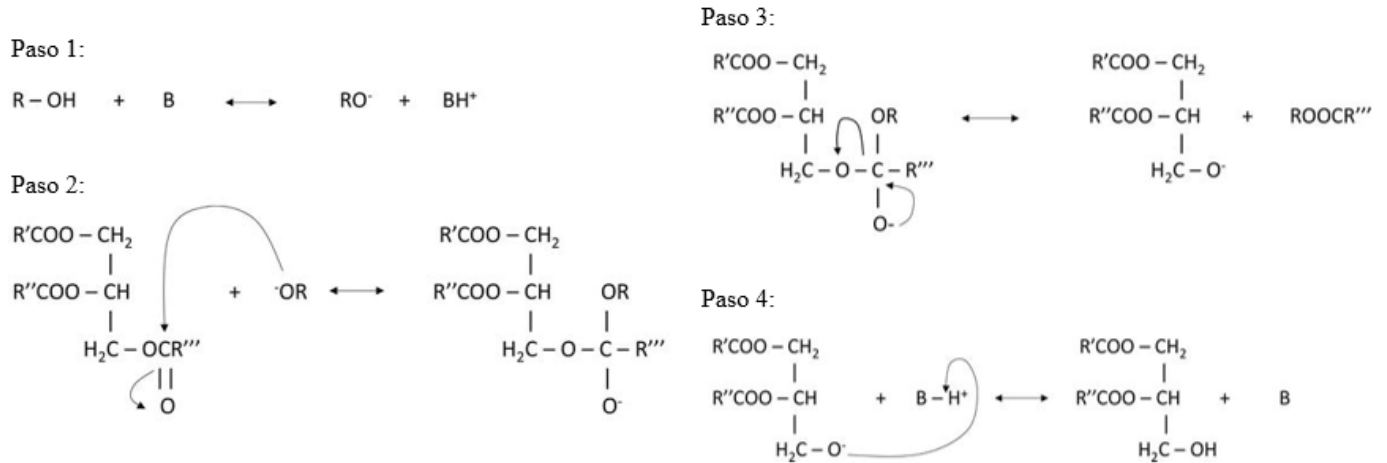
(Arnol, 2020)

El mecanismo de reacción en presencia de catalizadores alcalinos ocurre en múltiples etapas. En el primer paso, el catalizador reacciona con el alcohol para formar un alcóxido, que es un nucleófilo fuerte. Este alcóxido ataca el carbono electrofílico del grupo carbonilo en el triglicérido, generando un intermediario tetraédrico, como se muestra en el segundo paso. Este intermediario se descompone y el catalizador se regenera para formar un éster alquílico y un diglicérido (pasos tres y cuatro). En pasos sucesivos, el mismo mecanismo se repite: el diglicérido se convierte en un monoglicérido, y finalmente, el monoglicérido reacciona para liberar glicerol y un último éster alquílico. Este mecanismo asegura que cada molécula de triglicérido sea completamente convertida en biodiésel y glicerol (Trejo-Zárraga et al., 2018).

La regeneración del catalizador ocurre al final de cada paso mediante la deprotonación del alcohol, lo que permite que el catalizador participe en nuevas reacciones.

Este proceso se repite hasta que todos los triglicéridos han reaccionado, siempre que las condiciones del sistema sean óptimas (Trejo-Zárraga et al., 2018).

**Figura 8.** Mecanismo de la reacción de transesterificación



(Trejo-Zárraga et al., 2018)

Después de la reacción, el biodiésel y el glicerol, como productos principales, se separan debido a sus diferencias de densidad y polaridad. Esta separación suele realizarse por decantación o centrifugación. Posteriormente, el biodiésel crudo pasa por un proceso de lavado con agua destilada para eliminar impurezas como catalizadores residuales, jabones y alcohol no reaccionado. En algunos casos, se utiliza ácido acético diluido para neutralizar restos alcalinos y facilitar la purificación. Finalmente, el biodiésel se seca a bajas presiones o mediante secado por calor para remover cualquier traza de agua residual, asegurando que cumpla con las especificaciones técnicas necesarias para su uso en motores diésel (Knothe et al., 2005).

### i. Equilibrio químico y cinética

La transesterificación es una reacción reversible, lo que significa que se puede desplazar el equilibrio hacia la formación de biodiésel aumentando la concentración del alcohol o eliminando uno de los productos, como el glicerol. Cabe destacar que la eliminación continua del glicerol es una estrategia aplicable únicamente en procesos continuos, donde el flujo permite remover el glicerol a medida que se forma. En procesos por lotes, esto no es posible, por lo que se depende más del exceso de alcohol para desplazar el equilibrio químico hacia la formación de biodiésel (Knothe et al., 2005).

El tipo de catalizador es un factor determinante en la cinética de la transesterificación. Los catalizadores alcalinos, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH), reducen la barrera de activación al aumentar la concentración de iones alcoxi. Estos iones son nucleófilos fuertes que atacan rápidamente los triglicéridos, favoreciendo una mayor velocidad de reacción inicial. Por otro lado, los catalizadores ácidos tienen una cinética más lenta, ya que dependen de la protonación de los grupos éster antes de que ocurra la ruptura del enlace (Knothe et al., 2005).

La temperatura también influye directamente en la velocidad de reacción. Un incremento en la temperatura no solo reduce la viscosidad del aceite, facilitando su mezcla con el alcohol, sino que también aumenta la solubilidad del alcohol en la fase grasa. Esto mejora el contacto entre las fases, incrementa la frecuencia de colisiones efectivas y, por ende, acelera la reacción. Sin embargo, temperaturas excesivas pueden causar evaporación del alcohol y degradación de los catalizadores, disminuyendo la eficiencia global del proceso (Knothe et al., 2005).

El tiempo de reacción debe ser cuidadosamente escogido. En general, la mayor parte de la conversión ocurre dentro de los primeros 60-120 minutos bajo condiciones óptimas. Prolongar el tiempo más allá de este punto puede resultar en la formación de subproductos no deseados debido a reacciones secundarias, como la oxidación del biodiésel (Knothe et al., 2005).

## **ii. Factores que afectan la reacción**

### **1. Pureza del alcohol**

El alcohol utilizado en la transesterificación ya sea metanol o etanol, debe ser lo más puro posible, preferiblemente con una concentración superior al 99.5 %. La presencia de agua en el alcohol puede inducir la hidrólisis de los triglicéridos, generando ácidos grasos libres (AGL). Estos AGL reaccionan con los catalizadores alcalinos, formando jabones, lo que disminuye la eficiencia de la reacción y dificulta la separación del biodiésel y el glicerol. Por ello, se recomienda almacenar el alcohol en condiciones anhidras y utilizar desecantes si es necesario (Knothe et al., 2005).

## **2. Calidad del aceite**

El contenido de ácidos grasos libres en el aceite debe mantenerse por debajo del 2-3 % para evitar la formación de jabones. En aceites usados de fritura, los niveles de AGL pueden superar el 5 %, requiriendo un pretratamiento como la esterificación ácida para reducirlos. Además, los compuestos polares y los residuos de alimentos presentes en aceites usados también afectan la reacción, disminuyendo la conversión y aumentando la necesidad de purificación posterior (Knothe et al., 2005).

## **3. Relación molar alcohol:aceite**

La relación molar entre alcohol y aceite es crucial para desplazar el equilibrio hacia los productos. La literatura sugiere una relación molar óptima de 6:1, aunque relaciones mayores pueden ser necesarias para aceites con alto contenido de impurezas. Sin embargo, un exceso excesivo de alcohol puede aumentar los costos de recuperación y purificación (Knothe et al., 2005).

## **4. Humedad del ambiente**

La humedad ambiental puede introducir trazas de agua en el sistema de reacción, especialmente durante el manejo de materias primas. La presencia de agua favorece la hidrólisis de triglicéridos, generando AGL y reduciendo la eficiencia de la transesterificación. Aunque no se reportan valores específicos en la literatura sobre los niveles de humedad relativa que se deben mantener durante el proceso, se recomienda minimizar la exposición a ambientes húmedos mediante el uso de recipientes sellados y controles ambientales adecuados. La presencia de agua favorece la hidrólisis de triglicéridos, generando AGL y reduciendo la eficiencia de la transesterificación. En ambientes con alta humedad relativa, se recomienda mantener las materias primas y el alcohol sellados herméticamente (Knothe et al., 2005).

## **5. Temperatura**

La temperatura afecta tanto la velocidad como la eficiencia de la reacción. Las temperaturas ideales oscilan entre 60 y 70 °C, cercanas al punto de ebullición

del metanol. A estas temperaturas, la viscosidad del aceite disminuye, facilitando la mezcla con el alcohol. Sin embargo, temperaturas superiores pueden causar la evaporación del alcohol y la degradación de los catalizadores (Knothe et al., 2005).

## **6. Agitación**

Una agitación adecuada asegura un contacto eficiente entre las fases polar (alcohol) y apolar (aceite), mejorando la transferencia de masa. La insuficiente agitación puede llevar a reacciones incompletas, mientras que una agitación excesiva puede introducir aire al sistema, favoreciendo la oxidación del biodiésel. Según la literatura, la velocidad de agitación óptima se encuentra entre 200 y 600 revoluciones por minuto (rpm), dependiendo de la viscosidad del aceite y el tipo de reactor utilizado. Valores inferiores pueden resultar en una mezcla ineficiente, mientras que valores superiores pueden causar problemas mecánicos o aumento no deseado de temperatura por fricción (Knothe et al., 2005).

## **7. Tiempo de reacción**

Un tiempo de reacción insuficiente puede resultar en una conversión incompleta de los triglicéridos, mientras que tiempos excesivamente largos pueden favorecer reacciones secundarias no deseadas. En condiciones óptimas, la reacción generalmente alcanza el equilibrio en 1-2 horas (Knothe et al., 2005).

## **8. Concentración y tipo de catalizador**

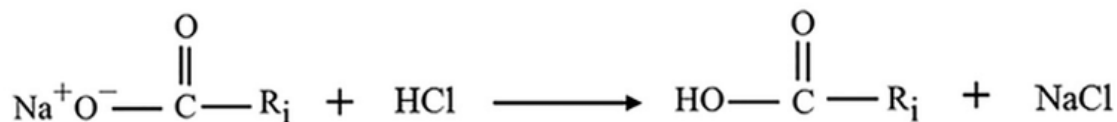
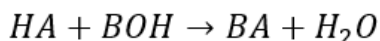
Los catalizadores alcalinos, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el de potasio (KOH), son los más utilizados debido a su alta eficiencia. Su concentración debe mantenerse entre 0.5 y 1.0 % en peso respecto al aceite. Catalizadores ácidos, como el ácido sulfúrico, son menos comunes pero útiles en el pretratamiento de aceites con alto contenido de AGL. Los catalizadores heterogéneos y enzimáticos presentan ventajas en términos de sostenibilidad, aunque su uso está limitado por costos y tiempos de reacción más largos (Knothe et al., 2005).

### **b. Neutralización**

La neutralización es una reacción química en la que un ácido reacciona con una base para formar una sal y agua. Esta reacción es fundamental en la producción de

biodiésel, ya que se utiliza para eliminar los catalizadores ácidos o alcalinos residuales y neutralizar los jabones formados durante el proceso de transesterificación. La ecuación general para una reacción de neutralización es:

**Figura 9.** Reacción general de neutralización y neutralización de jabones



(Liu, 2017)

Donde HA representa un ácido, BOH es una base, BA es la sal formada y H<sub>2</sub>O es el agua. En el contexto del biodiésel, el ácido utilizado suele ser ácido acético diluido, mientras que los residuos alcalinos incluyen compuestos como el hidróxido de sodio (NaOH) o potasio (KOH) (Encinar et al., 2007).

El mecanismo de la neutralización implica la transferencia de un protón (H<sup>+</sup>) del ácido a la base, formando agua y una sal. En el contexto del biodiésel, este mecanismo asegura la conversión de los residuos alcalinos en compuestos neutros que no afectan la calidad del biodiésel. Además, la neutralización de jabones convierte estos compuestos en ácidos grasos libres, facilitando su eliminación mediante procesos de purificación (Encinar et al., 2007).

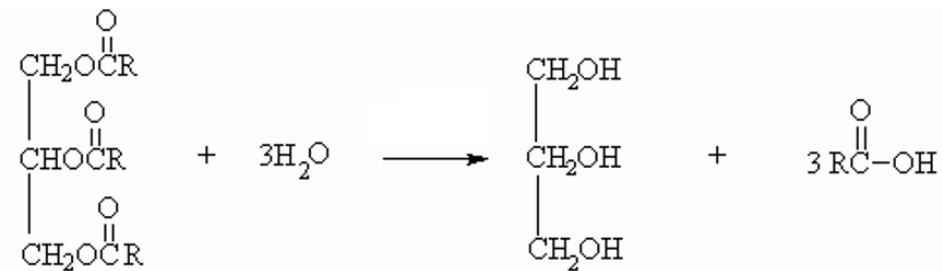
Las sales generadas durante la neutralización deben eliminarse para garantizar la pureza del biodiésel. Esto se logra generalmente mediante un proceso de lavado con agua destilada o desionizada, que arrastra las sales hacia la fase acuosa. Posteriormente, el biodiésel se seca para eliminar cualquier traza de agua residual, asegurando que cumpla con las especificaciones requeridas (Encinar et al., 2007).

### c. Hidrólisis

La hidrólisis, en el contexto de producción de biodiésel, es una reacción no deseada que afecta negativamente la eficiencia del proceso. Los triglicéridos presentes en el aceite o grasa reaccionan con agua, generando ácidos grasos libres (AGL) y glicerol como

subproductos (Lam et al., 2010). El agua puede venir del proceso de fritura – en el caso de aceite usado – del ambiente o de los propios reactivos, si estos no son anhidros.

**Figura 10.** Reacción de hidrólisis de un triglicérido



(Lárez, 2017)

Los ácidos grasos libres formados reaccionan con los catalizadores alcalinos durante la transesterificación, dando lugar a la formación de jabones. Esto no solo disminuye el rendimiento de biodiésel, sino que también complica la separación de fases entre el biodiésel y el glicerol, incrementando los costos asociados con la purificación del producto final. La presencia de agua residual en el sistema puede amplificar estos problemas (Lam et al., 2010).

La hidrólisis ocurre más frecuentemente bajo ciertas condiciones específicas. La presencia de agua, incluso en pequeñas cantidades, proporciona el reactivo necesario para que la reacción avance. Las altas temperaturas, por su parte, aumentan la energía cinética de las moléculas, acelerando la velocidad de la reacción. Además, los catalizadores ácidos o básicos presentes en el sistema pueden incrementar significativamente la tasa de hidrólisis. Finalmente, el tiempo de almacenamiento prolongado de aceites o grasas en condiciones inadecuadas, como alta humedad o exposición al calor, puede intensificar la degradación de los triglicéridos (Lam et al., 2010).

#### d. Saponificación

La saponificación es otra reacción secundaria no deseada que ocurre durante la transesterificación cuando los ácidos grasos libres (AGL) en el aceite, sea por degradación térmica o hidrólisis, reaccionan con catalizadores alcalinos, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH), en presencia de agua, produciendo jabones (Knothe et al., 2005). La ecuación química básica de la saponificación es:

**Figura 11.** Reacción de saponificación



(Alva, 2015)

La formación de jabones tiene varios efectos adversos en el proceso de producción de biodiésel. Los jabones consumen catalizador, reduciendo la cantidad disponible para la transesterificación. Además, dadas sus propiedades tensoactivas y anfipáticas – parte hidrófoba y parte hidrófila – estabilizan emulsiones entre el biodiésel y el glicerol, lo que dificulta su separación. Esto no solo reduce el rendimiento general, sino que también aumenta los costos asociados a la purificación del biodiésel, ya que se requieren pasos adicionales para eliminar los jabones residuales (Meher et al., 2006).

Aunque la saponificación no puede eliminarse completamente, su impacto puede minimizarse mediante el control de varios factores. Reducir el contenido de AGL a menos del 2 % mediante pretratamientos, como la esterificación ácida, es una estrategia clave. Además, el uso de alcohol anhidro evita la introducción de agua en el sistema, lo que reduce la formación de jabones. Ajustar la relación molar alcohol:aceite también es importante, ya que ayuda a desplazar el equilibrio hacia la transesterificación en lugar de la saponificación. Finalmente, mantener un pH levemente alcalino limita la formación excesiva de jabones (Meher et al., 2006).

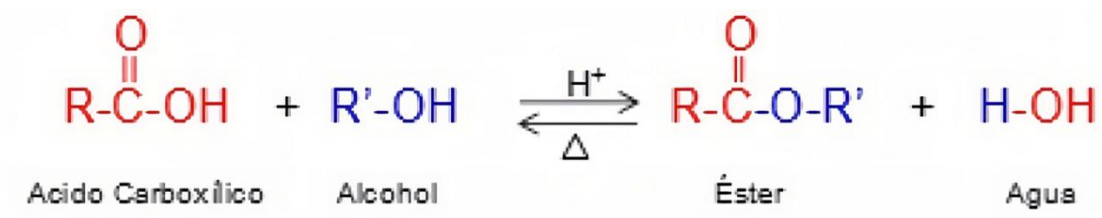
Para mejorar la calidad del biodiésel y facilitar la separación de fases, los jabones formados durante la reacción deben ser eliminados. El lavado con agua caliente es un método común, ya que arrastra los jabones hacia la fase acuosa, separándolos del biodiésel. Otro método efectivo es la neutralización con ácido acético diluido, que convierte los jabones en ácidos grasos libres, más fáciles de separar. La centrifugación también es útil, ya que permite una separación mecánica eficiente entre las fases (Meher et al., 2006).

#### **e. Esterificación**

La esterificación es una reacción química que ocurre entre un ácido carboxílico y un alcohol, en presencia de un catalizador ácido, para formar un éster y agua como

subproducto (Danane et al., 2022). Es necesaria únicamente si el contenido de AGL del aceite es superior a 2 %. Esta reacción es reversible y se puede expresar mediante la ecuación general:

**Figura 12.** Reacción general de esterificación



(Ruiz, 2017)

El principal objetivo de la esterificación en el contexto de la producción de biodiésel es reducir el contenido de AGL en aceites y grasas que presentan altos niveles de estos compuestos. Como se mencionó anteriormente, los AGL reaccionan con catalizadores alcalinos durante la transesterificación, formando jabones que disminuyen el rendimiento y dificultan la separación de fases. Mediante la esterificación, los AGL se convierten en ésteres al ser tratados con alcohol, minimizando los problemas asociados a la saponificación (Sharif et al., 2010).

En el primer paso de la reacción, el ácido carboxílico es protonado por el catalizador, lo que hace que el carbono del grupo carbonilo sea más electrofílico. Esto permite que el alcohol ataque el carbono del carbonilo, formando un intermediario tetraédrico. Este intermediario colapsa para liberar agua y formar el éster. Este mecanismo garantiza que los AGL presentes en el aceite sean convertidos en compuestos que no interfieran con la transesterificación (Sharif et al., 2010).

Una vez finalizada la esterificación, es importante realizar una serie de pasos para preparar el aceite tratado para la transesterificación. El primer paso implica la separación del agua formada como subproducto de la reacción. Esta etapa es clave para evitar que el agua interfiera con la transesterificación posterior. El agua se elimina mediante métodos como decantación, centrifugación o secado a baja presión y temperatura controlada, lo que asegura un aceite libre de humedad (Sharif et al., 2010).

El segundo paso consiste en la neutralización del catalizador si se utilizó uno ácido homogéneo, como el ácido sulfúrico. Esto se realiza mediante la adición de una base débil, como hidróxido de sodio o carbonato de sodio, para evitar problemas de corrosión o interferencias en los procesos siguientes. Posteriormente, el aceite tratado pasa por un proceso de filtración y purificación para eliminar cualquier residuo sólido o impureza remanente, garantizando así que esté limpio y adecuado para la etapa posterior (Sharif et al., 2010).

Finalmente, antes de proceder con la transesterificación, se realiza una verificación del contenido de ácidos grasos libres (AGL) para confirmar que se han reducido a niveles inferiores al 2 %. Este control es fundamental para garantizar la eficiencia de la transesterificación y evitar la formación de jabones durante el proceso (Sharif et al., 2010).

La esterificación requiere condiciones específicas para ser eficiente. Generalmente, se utiliza un catalizador ácido como el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), aunque también se emplean ácidos orgánicos o catalizadores heterogéneos. Los catalizadores ácidos aumentan la velocidad de la reacción al protonar el grupo carboxílico, haciéndolo más reactivo. La relación molar entre el alcohol y el ácido carboxílico también es un factor importante; una relación elevada, normalmente entre 6:1 y 10:1, favorece el desplazamiento del equilibrio hacia la formación del éster. La reacción se lleva a cabo a temperaturas de entre 50 y 70 °C. Estas temperaturas permiten una mayor velocidad de reacción sin causar una evaporación excesiva del alcohol. El tiempo de reacción suele variar entre 1 y 2 horas, dependiendo de las condiciones y la concentración inicial de AGL (Sharif et al., 2010).

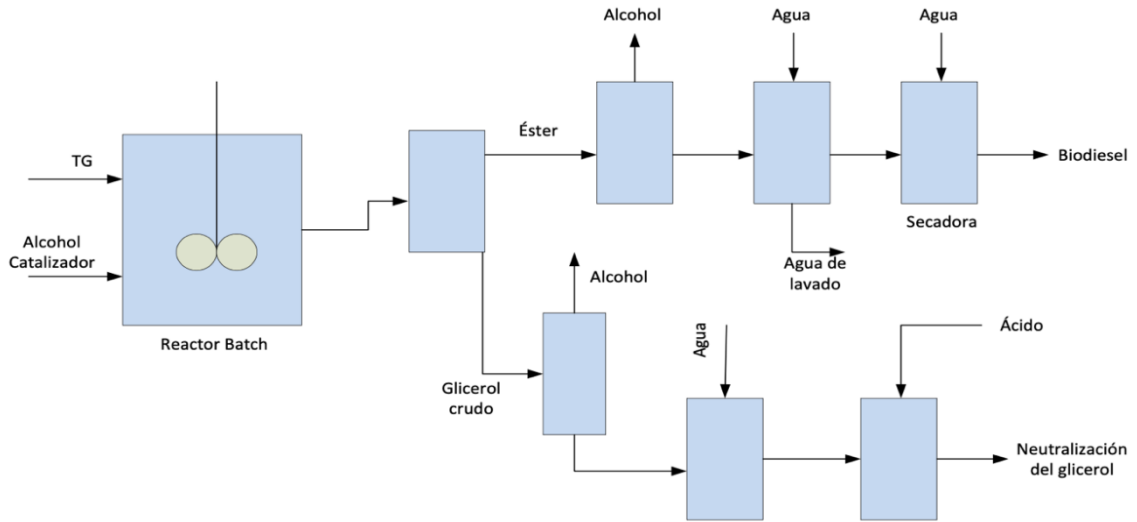
## **H. Diagramas teóricos del proceso**

La producción de biodiésel es un proceso complejo que involucra diversas etapas, incluyendo el pretratamiento de la materia prima, la reacción de transesterificación y las etapas de purificación del producto final. En esta sección se analizan distintos diagramas de flujo obtenidos de la literatura, los cuales representan configuraciones típicas para la producción de biodiésel en diferentes contextos, con el fin de poder establecer el diagrama propio a utilizar.

Este diagrama incluye una etapa inicial de filtrado del aceite usado de fritura seguido por la reacción de esterificación utilizando ácido sulfúrico y etanol como reactivos. Posteriormente, se realiza una decantación para separar la fase esterificada y residuos como el ácido sulfúrico. La transesterificación se lleva a cabo utilizando un catalizador alcalino (hidróxido de sodio), y el proceso finaliza con una neutralización mediante ácido acético, eliminando jabones y estabilizando el biodiésel crudo. La configuración destaca por el manejo detallado de residuos y por incorporar neutralización para mejorar la calidad del producto (Bulla et al., 2014).



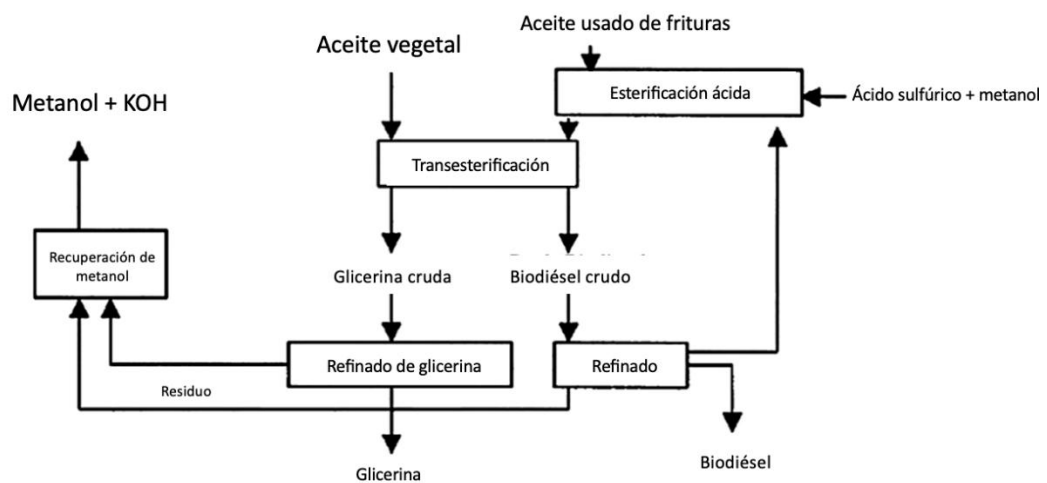
**Figura 14.** Proceso por lotes



(Bulla et al., 2014)

Este esquema representa un proceso por lotes clásico, donde el triglicérido (TG), alcohol y catalizador se mezclan en un reactor. Posteriormente, la mezcla pasa por etapas de separación, lavado y secado. Adicionalmente, el glicerol crudo se neutraliza utilizando un ácido, generando subproductos que deben manejarse de manera adecuada (Bulla et al., 2014).

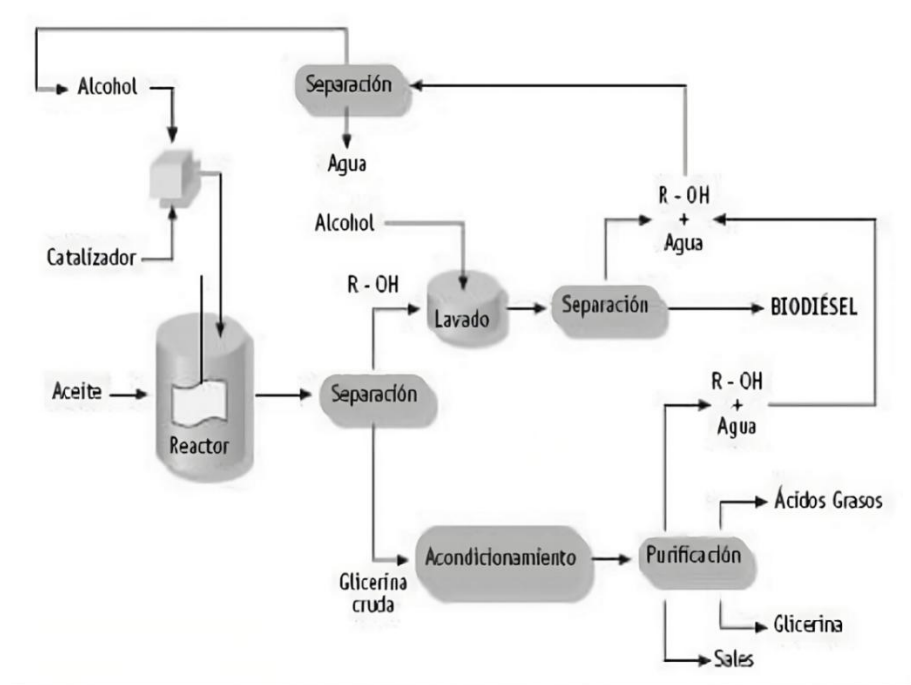
**Figura 15.** Proceso con recuperación de metanol y glicerina refinada



(Atadashi, 2016)

En este diagrama, se destaca la integración de tecnologías para la recuperación de metanol y la refinación del glicerol crudo. Además, incluye una esterificación ácida previa para aceites con alto contenido de AGL (Atadashi, 2016).

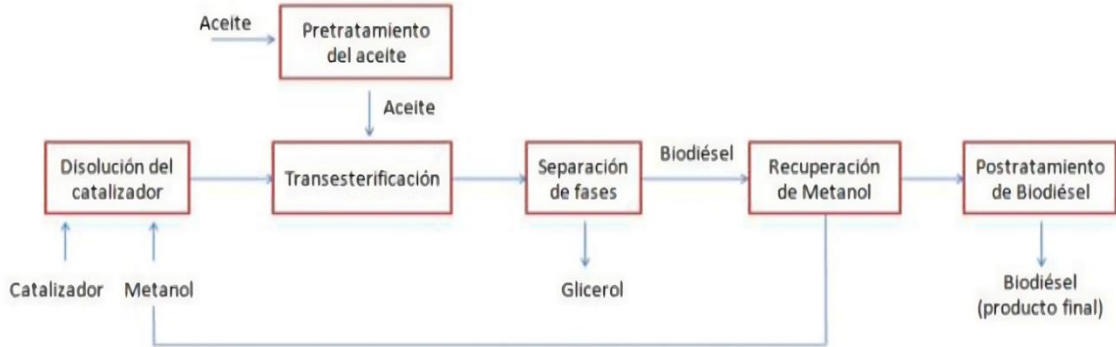
**Figura 16.** Proceso simplificado con lavado final



(Jesús, 2011)

Este diagrama enfatiza las etapas de lavado y separación, pero no incluye mecanismos para la recuperación de alcohol o refinación del glicerol. Se orienta hacia un enfoque sencillo para la obtención de biodiésel crudo (Jesús, 2011).

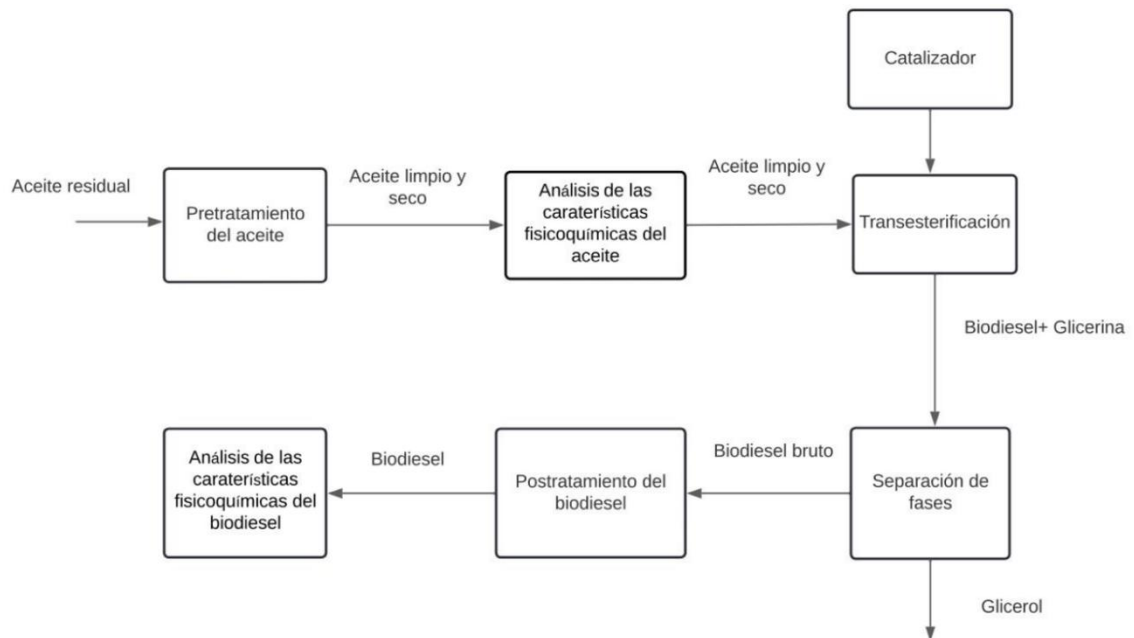
**Figura 17.** Proceso de producción comunitaria



(Alfonso, 2013)

Enfocado en el uso de aceites usados en comunidades, este diagrama incorpora una etapa de pretratamiento para reducir contaminantes y estabilizar el aceite antes de la transesterificación (Alfonso, 2013).

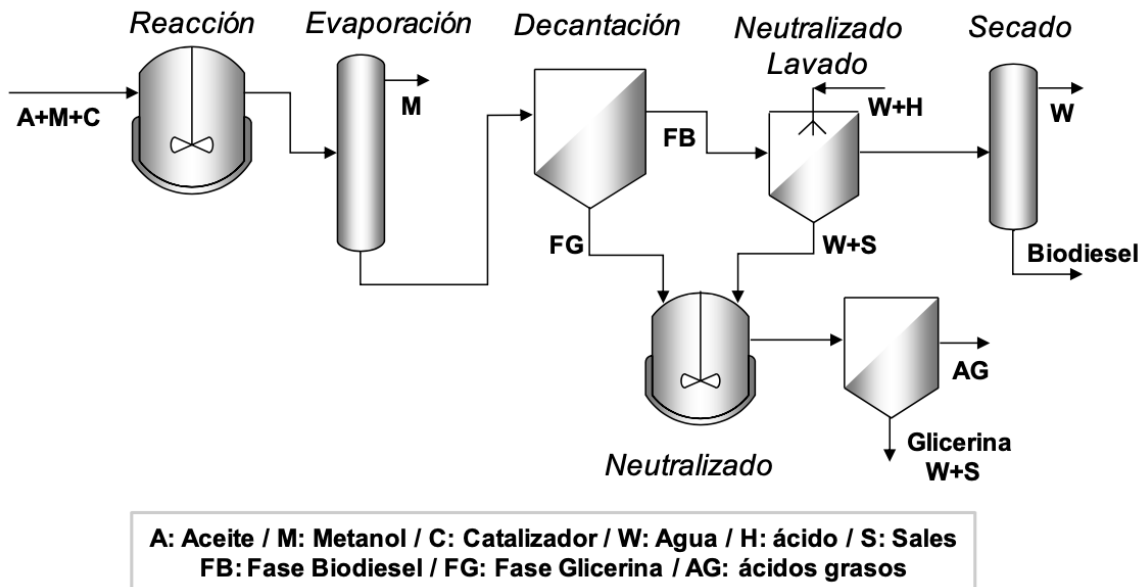
**Figura 18.** Esquema con postratamiento de biodiésel



(Bustán, 2022)

Este esquema incluye un postratamiento del biodiésel para mejorar su calidad. Además, resalta el análisis de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel y del aceite reciclado como pasos esenciales (Buestán, 2022).

**Figura 19.** Esquema con recuperación de metanol antes de la separación de fases



(Pisarello, 2010)

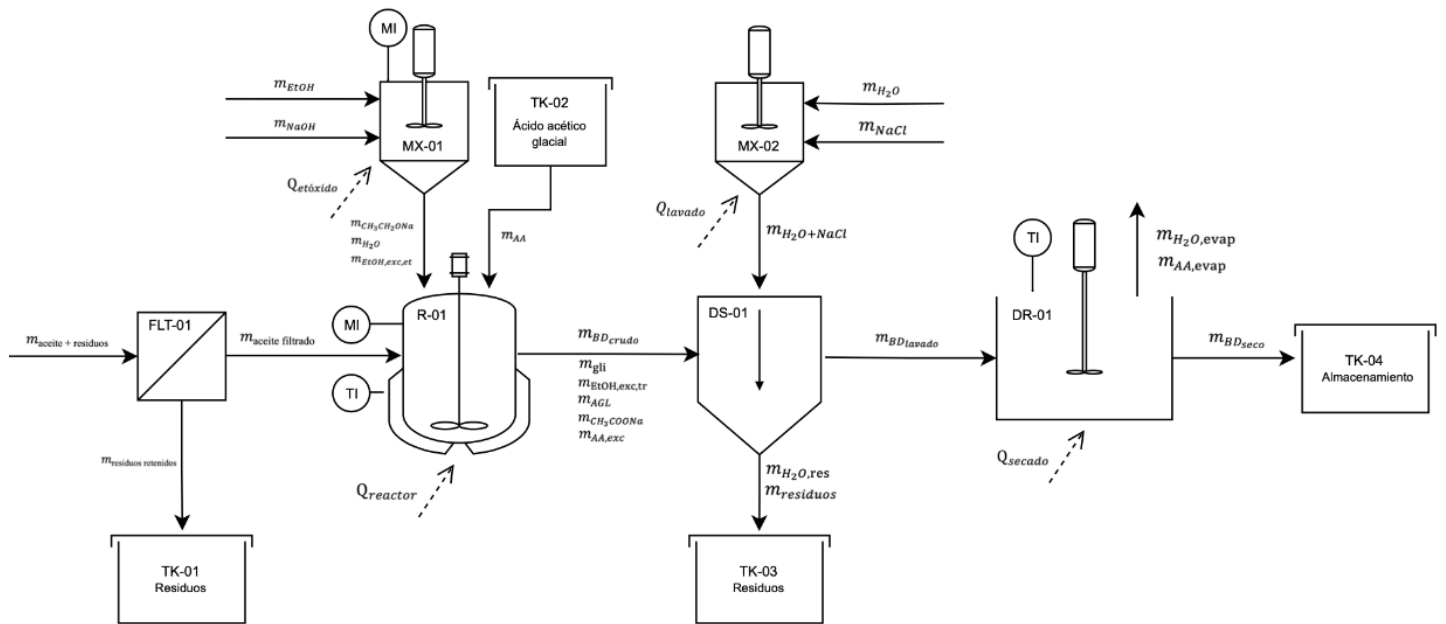
Este diagrama incorpora una etapa de recuperación de metanol antes de la separación de fases, lo que representa una configuración alternativa que tiene varias implicaciones. La evaporación del metanol excedente permite concentrar los jabones y otras impurezas en la fase de glicerina, lo que facilita su purificación y, al mismo tiempo, recupera el metanol para su reutilización. Posteriormente, el biodiésel crudo pasa por etapas de neutralización y lavado, y finalmente se seca para obtener el producto final (Pisarello, 2010).

Los diagramas anteriores destacan distintos enfoques para la producción de biodiésel, reflejando las necesidades específicas de cada contexto, como la escala de producción, el tipo de materia prima y los recursos disponibles. Por ejemplo, procesos por lotes son ideales para pequeñas operaciones, mientras que los esquemas con recuperación de metanol y refinación del glicerol son más adecuados para producciones industriales. La

inclusión de etapas como la esterificación previa y el postratamiento también muestra cómo los procesos pueden ajustarse para abordar desafíos específicos, como altos niveles de AGL o la necesidad de cumplir con normas de calidad.

Con esto en mente, dado que el aceite a utilizar no contiene altos niveles de AGL (menor al 2 %) y el proceso es a pequeña escala, el diagrama con el cual se trabajará es:

**Figura 20.** Esquema para la producción de biodiésel con etanol de este trabajo



Fuente: Autor

## I. Balances de masa teóricos

El balance de masa es una herramienta importante en el diseño y análisis de procesos químicos, ya que permite cuantificar la distribución de materiales en cada etapa de producción. En el caso de la producción de biodiésel, el balance de masa garantiza que las entradas, salidas y acumulaciones de materia se comprendan y controlen adecuadamente. Este enfoque permite mejorar el rendimiento del proceso, minimizar pérdidas, y asegurar la calidad del producto final.

Dado que este es un proceso por lotes llevado a cabo a nivel de laboratorio en un matraz de Kitasato, el balance de masa se formula como  $\text{entradas} = \text{salidas}$ , bajo la consideración de que no hay acumulación en el sistema desde la perspectiva del balance

global. Esto significa que toda la masa de los reactivos que se introducen en el matraz – es decir, las "entradas" – eventualmente se contabiliza como productos, subproductos y excedentes que se recolectan al final del proceso – las "salidas".

En un sistema por lotes típico y en presencia de una reacción química, la ecuación general del balance de masa incluye un término de acumulación y excluyen los términos de entradas y salidas:

**Ecuación 9.** Ecuación general típica de un balance de masa por lotes con reacción química

$$\textit{Generación} - \textit{Consumo} = \textit{Acumulación}$$

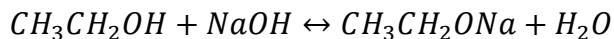
Sin embargo, en este caso específico, las reacciones ocurren completamente dentro del matraz antes de que se retiren los productos, y no se considera acumulación porque todos los componentes se agregan inicialmente y luego se recolectan al final del proceso. Desde esta perspectiva simplificada, las entradas corresponden a las masas iniciales de reactivos agregados y las salidas corresponden a las masas de todos los productos finales recolectados (Bulla et al., 2014).

Es importante notar que, aunque normalmente los términos "entradas" y "salidas" podrían implicar flujos continuos en un proceso de estado estacionario, en este caso por lotes se adaptan para representar la masa total de reactivos introducidos al sistema al inicio del proceso y la masa total de productos (incluidos subproductos y reactivos en exceso) recolectados después de completar la reacción.

#### **a. Mezclador etanol/hidróxido de sodio**

En el mezclador EtOH/NaOH se produce el catalizador necesario para la transesterificación: el etóxido de sodio. La reacción química entre el etanol y el hidróxido de sodio permite formar este compuesto, generando agua como subproducto (Alfonso, 2013).

La reacción que tiene lugar se puede describir mediante la siguiente ecuación estequiométrica:



Lo anterior establece que, por cada mol de hidróxido de sodio, se requiere un mol de etanol para formar un mol de etóxido de sodio. Además, como resultado de la reacción, se genera un mol de agua.

Sin embargo, el etanol se emplea en exceso para garantizar que todo el NaOH reaccione completamente. Esto también minimiza la formación de subproductos no deseados, como jabones. Además, se realiza bajo agitación a 50 °C, ya que estas condiciones facilitan la disolución completa del NaOH en el etanol, promoviendo una mezcla homogénea y asegurando que la reacción se lleve a cabo de manera eficiente (Bulla et al., 2014).

Por lo tanto, la ecuación de balance de masa simplificada para este sistema por lotes es:

**Ecuación 10.** Balance de masa general simplificado para el mezclador EtOH/NaOH

$$\textit{Entradas} = \textit{Salidas}$$

$$m_{EtOH} + m_{NaOH} = m_{CH_3CH_2ONa} + m_{H_2O} + m_{EtOH,exc,et}$$

En donde:

- $m_{EtOH}$  = masa de etanol al 99 % (g)
- $m_{NaOH}$  = masa de hidróxido de sodio (g)
- $m_{CH_3CH_2ONa}$  = masa de etóxido de sodio (g)
- $m_{H_2O}$  = masa de agua (g)
- $m_{EtOH,exc,et}$  = masa de etanol en exceso después de la formación del etóxido (g)

#### **i. Balance para el etóxido formado**

El etóxido de sodio es el producto principal de esta reacción, y su cantidad está directamente relacionada con la masa de NaOH disponible en el sistema.

Si bien la cantidad de NaOH depende del punto experimental a realizar, en el caso de aceites usados de frituras debe calcularse adicionalmente la cantidad de NaOH necesaria para reaccionar con los ácidos grasos libres, a partir del número ácido.

**Ecuación 11.** Cantidad de NaOH para reaccionar con los ácidos grasos libres

$$m_{NaOH,AGL} = \frac{\times 10^{-3} g KOH}{g aceite} \times \frac{1}{M_{KOH}} \times \frac{mol NaOH}{mol KOH} \times M_{NaOH} \times m_{aceite}$$

La cantidad de etanol por su parte debe calcularse a partir de la cantidad estequiométrica de aceite disponible en el sistema:

**Ecuación 12.** Cantidad de etanol a utilizar por ensayo

$$m_{EtOH} = \frac{m_{aceite}}{M_{aceite}} \times \frac{mol etanol}{mol aceite} \times M_{EtOH}$$

En donde, “m” representa la masa de cada compuesto, y “M” representa su masa molar.

La cantidad de etóxido se calcula utilizando la relación molar de la reacción estequiométrica y la masa molar del etóxido de sodio.

**Ecuación 13.** Formación de etóxido de sodio

$$m_{CH_3CH_2ONa} = \frac{m_{NaOH}}{M_{NaOH}} \times \frac{1 mol CH_3CH_2ONa}{1 mol NaOH} \times M_{CH_3CH_2ONa}$$

#### ii. Balance para el etanol consumido y en exceso

Durante la reacción, parte del etanol disponible se consume para reaccionar con el NaOH. La cantidad consumida se calcula considerando la misma relación molar que en la reacción.

**Ecuación 14.** Consumo de etanol en la formación de etóxido de sodio

$$m_{EtOH,con} = \frac{m_{NaOH}}{M_{NaOH}} \times \frac{1 mol EtOH}{1 mol NaOH} \times M_{EtOH}$$

El etanol que no se consume en la reacción permanece como exceso en el sistema. Su cantidad se determina como la diferencia entre la masa inicial de etanol y la masa consumida.

**Ecuación 15.** Etanol en exceso derivada de la formación del etóxido de sodio

$$m_{EtOH,exc,et} = m_{EtOH} - m_{EtOH,con}$$

Este exceso es importante porque, en etapas posteriores, ayuda a mejorar la conversión de triglicéridos a biodiésel y facilita la mezcla homogénea en el sistema (Atabani et al., 2012).

### iii. Balance para el agua formada

El agua es un subproducto inevitable de esta reacción. Su cantidad se calcula directamente a partir de la masa inicial de NaOH, utilizando la relación molar de la reacción:

**Ecuación 16.** Agua formada durante la reacción de formación del etóxido de sodio

$$m_{H_2O} = m_{NaOH} \times \frac{1 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } NaOH} \times M_{H_2O}$$

### b. Filtración del aceite usado de cocina

**Ecuación 17.** Balance de masa general simplificado para el filtrado del aceite

$$\textit{Entradas} = \textit{Salidas} + \textit{Pérdidas}$$

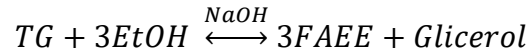
$$m_{\text{aceite} + \text{residuos}} = m_{\text{aceite filtrado}} + m_{\text{residuos retenidos}}$$

Donde las entradas corresponden a la suma del aceite usado y los residuos contenidos originalmente en el aceite. Las salidas comprenden el aceite filtrado y los residuos retenidos por el filtro. Además, las pérdidas reflejan cualquier material que no se haya contabilizado, como pequeñas cantidades de aceite que puedan quedar adheridas al filtro.

### c. Transesterificación

Consiste en la reacción entre triglicéridos (TG), presentes en los aceites, y un alcohol (en este caso etanol), en presencia de un catalizador (etóxido de sodio). Esta reacción genera ésteres de ácidos grasos (FAEE, biodiésel) y glicerol como productos principales, junto con subproductos como jabones cuando hay ácidos grasos libres (AGL) en el sistema (Knothe et al., 2005).

La reacción estequiométrica principal es la siguiente:



Dado que este es un proceso por lotes, el balance de masa sigue la ecuación general:

**Ecuación 18.** Balance de masa general simplificado para la transesterificación

$$Entradas = Salidas$$

$$m_{\text{aceite fil.}} + m_{\text{EtOH,exc,et}} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CH}_3\text{CH}_2\text{ONa}} = m_{\text{BD crudo}} + m_{\text{gli}} + m_{\text{EtOH,exc,tr}} + m_{\text{jabones}}$$

En donde:

- $m_{\text{aceite filtrado}}$  = masa de aceite después de la filtración (g)
- $m_{\text{EtOH,exc,et}}$  = masa de etanol en exceso después de la formación del etóxido (g)
- $m_{\text{H}_2\text{O}}$  = masa de agua (g)
- $m_{\text{CH}_3\text{CH}_2\text{ONa}}$  = masa de etóxido de sodio (g)
- $m_{\text{BDcrudo}}$  = masa de biodiésel crudo formado (g)
- $m_{\text{gli}}$  = masa de glicerina (g)
- $m_{\text{EtOH,exc,tr}}$  = masa de etanol en exceso después de la transesterificación (g)
- $m_{\text{jabones}}$  = masa de jabones (g)

En presencia de agua o AGL, puede ocurrir la saponificación, formando jabones y consumiendo el catalizador (etóxido de sodio) (Knothe et al., 2005). La reacción es:



#### i. Balance para los jabones formados

La cantidad de jabones se calcula considerando los AGL presentes en el aceite y su conversión estequiométrica.

**Ecuación 19.** Jabones formados durante la transesterificación

$$m_{\text{jabones}} = \frac{m_{\text{AGL}}}{M_{\text{AGL}}} \times \frac{1 \text{ mol jabones}}{1 \text{ mol AGL}} \times M_{\text{jabones}}$$

## ii. Balance para el biodiésel formado

El biodiésel es el producto deseado, formado directamente a partir del aceite menos las pérdidas por formación de jabones. Su cálculo es:

**Ecuación 20.** Biodiésel formado durante la transesterificación

$$m_{BD} = \left( \frac{m_{\text{aceite filtrado}}}{M_{\text{aceite filtrado}}} \times \frac{3 \text{ mol BD}}{1 \text{ mol aceite}} \times M_{BD} \right) - m_{\text{jabones}}$$

## iii. Balance para el glicerol formado

El glicerol se forma en proporción estequiométrica respecto al aceite consumido:

**Ecuación 21.** Glicerol formado durante la transesterificación

$$m_{\text{gli}} = \frac{m_{\text{aceite filtrado}}}{M_{\text{aceite filtrado}}} \times \frac{1 \text{ mol gli}}{1 \text{ mol aceite}} \times M_{\text{gli}}$$

## iv. Balance para el etanol en exceso

El etanol en exceso incluye tanto el etanol inicial no consumido como el generado en la saponificación. Se calcula de la misma manera que se hizo paso a paso en la formación del etóxido, como:

**Ecuación 22.** Etanol en exceso derivado de la transesterificación

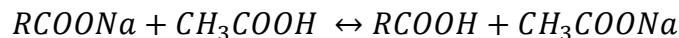
$$m_{\text{EtOH,exc,tr}} = m_{\text{EtOH,exc,et}} - m_{\text{EtOH,tr}} + m_{\text{EtOH,sap}}$$

Donde:

- $m_{\text{EtOH, tr.}} = \frac{m_{\text{aceite}}}{M_{\text{aceite}}} \times \frac{3 \text{ mol EtOH}}{1 \text{ mol aceite}} \times M_{\text{EtOH}}$
- $m_{\text{EtOH,sap}} = \frac{m_{\text{AGL}}}{M_{\text{AGL}}} \times \frac{1 \text{ mol EtOH}}{1 \text{ mol aceite}} \times M_{\text{EtOH}}$

## d. Neutralización

La reacción que tiene lugar se describe de la siguiente manera:



En esta reacción, los jabones reaccionan con el ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) para producir ácidos grasos libres ( $\text{RCOOH}$ ) y acetato de sodio ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ). Este proceso es crucial para garantizar que los jabones no interfieran con la calidad final del biodiésel (Lam et al., 2010).

El balance de masa para esta etapa se plantea como:

**Ecuación 23.** Balance de masa general simplificado de la neutralización

$$m_{BD \text{ crudo}} + m_{gli} + m_{EtOH,exc,tr} + m_{jabones} + m_{AA} = m_{BD \text{ crudo}} + m_{gli} + m_{AGL} + m_{CH_3COONa} + m_{EtOH,exc,tr} + m_{AA,exc}$$

En donde:

- $m_{BD \text{ crudo}}$  = masa de biodiésel crudo formado (g)
- $m_{gli}$  = masa de glicerina (g)
- $m_{EtOH,exc,tr}$  = masa de etanol en exceso después de la transesterificación (g)
- $m_{jabones}$  = masa de jabones (g)
- $m_{AA}$  = masa de ácido acético glacial agregado (g)
- $m_{AGL}$  = masa de ácidos grasos libres (g)
- $m_{CH_3COONa}$  = masa de acetato de sodio formado (g)
- $m_{AA,exc}$  = masa de ácido acético glacial en exceso (g)

#### i. Balance del ácido acético en exceso

El ácido acético estequiométrico por agregar se calcula como:

**Ecuación 24.** Ácido acético derivado de la neutralización

$$m_{AA} = m_{NaOH} * \frac{1}{M_{NaOH}} * \frac{1 \text{ mol AA}}{1 \text{ mol NaOH}} * M_{AA}$$

Sin embargo, se agregan 0.5 g =  $m_{AA,exc}$  más de exceso para garantizar la neutralización.

#### ii. Balance de ácidos grasos libres formados

La cantidad de ácidos grasos libres formados es directamente proporcional a la cantidad de jabones presentes, dado que cada mol de jabón genera un mol de ácido graso libre:

**Ecuación 25.** Ácidos grasos libres formados durante la neutralización

$$m_{AGL} = \frac{m_{jabones}}{M_{jabones}} \times \frac{1 \text{ mol AGL}}{1 \text{ mol jabones}} \times M_{AGL}$$

### iii. Balance de acetato de sodio formado

El acetato de sodio formado también es directamente proporcional a la cantidad de jabones presentes:

**Ecuación 26.** Acetato de sodio formado durante la neutralización

$$m_{CH_3COONa} = m_{jabones} \times \frac{1 \text{ mol } CH_3COONa}{1 \text{ mol jabones}} \times M_{CH_3COONa}$$

### e. Decantación

La decantación separa el biodiésel crudo de los residuos y subproductos. En este caso, las salidas incluyen tanto el biodiésel como los residuos (glicerol, ácido acético, y trazas de otros componentes) (Knothe et al., 2005).

**Ecuación 27.** Balance de masa general simplificado de la decantación

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

$$m_{BDcrudo} + m_{gli} + m_{AA,exc} + m_{CH_3COONa} + m_{EtOH,exc,tr} + m_{AGL} = m_{BDdecantado} + m_{residuos}$$

En donde:

- $m_{BDcrudo}$  = masa de biodiésel crudo formado (g)
- $m_{gli}$  = masa de glicerina (g)
- $m_{EtOH,exc,tr}$  = masa de etanol en exceso después de la transesterificación (g)
- $m_{AGL}$  = masa de ácidos grasos libres (g)
- $m_{CH_3COONa}$  = masa de acetato de sodio formado (g)
- $m_{AA,exc}$  = masa de ácido acético glacial en exceso (g)
- $m_{BDdecantado}$  = masa de biodiésel decantado – fase superior (g)
- $m_{residuos}$  = masa de la fase inferior (glicerina, etanol, AGL, acetato de sodio y ácido acético en exceso) (g)

### f. Formación del agente de lavado

El balance de masa para la formación del agente de lavado (mezcla de agua y cloruro de sodio) se puede expresar con base en la ecuación general de balance:

**Ecuación 28.** Balance de masa general simplificado de la formación del agente de lavado

$$\textit{Entradas} = \textit{Salidas}$$

$$m_{H_2O} + m_{NaCl} = m_{H_2O+NaCl}$$

En donde:

- $m_{H_2O}$  = masa de agua (g)
- $m_{NaCl}$  = masa de cloruro de sodio (g)
- $m_{H_2O+NaCl}$  = masa de la solución de cloruro de sodio (g)

### g. Lavado

El lavado separa las impurezas del biodiésel decantado mediante el uso de agua destilada con NaCl.

**Ecuación 29.** Balance de masa general simplificado del lavado

$$\textit{Entradas} = \textit{Salidas}$$

$$m_{BD_{decantado}} + m_{H_2O+NaCl} = m_{BD_{lavado}} + m_{H_2O,res}$$

En donde:

- $m_{BD_{decantado}}$  = masa de biodiésel decantado (g)
- $m_{H_2O+NaCl}$  = masa de la solución de cloruro de sodio (g)
- $m_{BD_{lavado}}$  = masa de biodiésel lavado (con trazas de agua y ácido acético) (g)
- $m_{H_2O, res}$  = masa de residuos líquidos (principalmente agua salina con impurezas disueltas) (g)

### h. Secado

En esta etapa, el biodiésel lavado se somete a un secado para eliminar trazas de agua y ácido acético.

**Ecuación 30.** Balance de masa general simplificado del secado

$$\textit{Entradas} = \textit{Salidas}$$

$$m_{BD_{lavado}} = m_{BD_{seco}} + m_{evap}$$

En donde:

- $m_{BDlavado}$  = masa de biodiésel lavado (con trazas de agua y ácido acético) (g)
- $m_{BDseco}$  = masa de biodiésel seco (g)
- $m_{H_2O,evap}$  = masa de agua evaporada (g)
- $m_{AA,evap}$  = masa de ácido acético glacial evaporado (g)

## J. Balances de energía teóricos

El balance de energía describe cómo se transforma y transfiere la energía en un sistema durante un proceso. El sistema bajo estudio es cerrado, lo que significa que no hay intercambio de masa con el entorno, pero sí puede ocurrir intercambio de energía en forma de calor y trabajo (Felder, 2005). La ecuación más general para el balance de energía en un sistema cerrado es:

**Ecuación 31.** Balance general de energía para un sistema cerrado

$$Q + W = \Delta U + \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} \quad (\text{Felder, 2005})$$

En este caso, Q representa el calor transferido al sistema, W el trabajo realizado por el sistema,  $\Delta U$  el cambio de energía interna,  $\Delta E_{kin}$  el cambio de energía cinética y  $\Delta E_{pot}$  el cambio de energía potencial. Esta ecuación general engloba todos los posibles cambios de energía que podrían ocurrir en un sistema (Felder, 2005). Sin embargo, es importante analizar cómo se puede simplificar para describir de manera más precisa el comportamiento energético de un sistema específico, como el del presente trabajo de producción de biodiésel a escala laboratorio.

En este contexto, el sistema opera en un laboratorio con cristalería donde los reactivos permanecen contenidos durante todo el proceso. Por ende, se puede tomar como suposición que no hay variación significativa en la velocidad de los reactivos o productos dentro del sistema, despreciando así el término de cambio de energía cinética ( $\Delta E_{kin} = 0$ ) (Bulla et al., 2014).

De manera similar, debido a la naturaleza estacionaria del sistema y la ausencia de cambios significativos en la altura de los componentes, el término de energía potencial también es insignificante, y se desprecia ( $\Delta E_{pot} = 0$ ) (Bulla et al., 2014).

El término  $W$ , que representa el trabajo, puede desglosarse en distintas contribuciones. En este caso, no se considera trabajo de expansión volumétrica, ya que el volumen del sistema se mantiene prácticamente constante y no ocurre una expansión significativa contra el ambiente (Bulla et al., 2014). Sin embargo, se incluye el trabajo mecánico realizado por el agitador magnético, que introduce energía al sistema para mantener la mezcla homogénea. Con esto, la ecuación de balance de energía queda reducida a:

**Ecuación 32.** Balance de energía sin consideración de energía cinética y potencial

$$Q + W_{agitador} = \Delta U$$

Dado que el sistema opera bajo condiciones de presión constante, el término  $Q$  puede asociarse directamente al cambio de entalpía del sistema ( $\Delta H$ ), ya que el calor intercambiado a presión constante es igual al cambio de entalpía:

**Ecuación 33.** Relación entre calor y entalpía en sistemas isobáricos

$$Q = \Delta H$$

Esto se debe a que, en sistemas isobáricos, la energía interna se relaciona con la entalpía mediante la expresión:

**Ecuación 34.** Definición de entalpía

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V$$

Sin embargo, como se mencionó,  $\Delta V$  es prácticamente nulo en este caso, por lo que:

**Ecuación 35.** Relación entre entalpía y energía interna en sistemas con volumen y presión constante

$$\Delta H \approx \Delta U$$

Finalmente, al sustituir esta relación en la ecuación de balance de energía, se obtiene:

**Ecuación 36.** Balance de energía simplificado, incluyendo suposiciones pertinentes

$$\Delta H = Q + W_{agitador}$$

En este punto, se puede destacar que el aporte de calor ( $Q$ ) proviene de la energía suministrada por la estufa para mantener la temperatura del sistema en las diferentes etapas

del proceso (formación del etóxido, transesterificación, preparación del agente de lavado y secado). Por otro lado,  $W_{\text{agitador}}$  corresponde al trabajo mecánico del agitador magnético, el cual depende de la potencia del agitador y del tiempo de operación.

**a. Formación del etóxido ( $Q_{\text{etóxido}}$ )**

Considerando la ecuación anterior, el balance de energía específico para este proceso es:

**Ecuación 37.** Balance de energía para la formación del etóxido

$$Q_{\text{etóxido}} = Q_{\text{mezcla}} + Q_{\text{reacción}} + Q_{\text{pérdidas}} + W_{\text{agitador}}$$

El aporte de calor de la mezcla  $Q_{\text{mezcla}}$  corresponde al calor necesario para elevar la temperatura del sistema desde la temperatura inicial  $T_{\text{inicial}}$  hasta la temperatura de operación final  $T_{\text{final}}$ .

**Ecuación 38.** Calor de mezcla para la formación del etóxido

$$Q_{\text{mezcla}} = m_{\text{EtOH}}C_{p,\text{EtOH}}\Delta T + m_{\text{NaOH}}C_{p,\text{NaOH}}\Delta T$$

En donde:

- $m_x$  = masa de etanol o hidróxido de sodio utilizada (g)
- $C_{p,x}$  = capacidad calorífica específica del etanol o hidróxido de sodio ( $\text{J/g}^\circ\text{C}$ )
- $\Delta T$  = Cambio de temperatura del sistema ( $^\circ\text{C}$ )

**Cuadro 11.** Capacidades caloríficas para los componentes de la formación del etóxido

Compuesto	Capacidad calorífica específica $C_p$ ( $\text{J/g}^\circ\text{C}$ )
Etanol	2.44
NaOH	1.20

(Perry et al., 2008)

Para el calor de reacción  $Q_{\text{reacción}}$ , se sabe que la formación de etóxido de sodio es una reacción exotérmica, por lo que libera energía al medio:

**Ecuación 39.** Calor de reacción para la formación del etóxido

$$Q_{\text{reacción}} = \Delta H_{\text{reacción}} \cdot n_{\text{NaOH}}$$

En donde:

- $\Delta H_{\text{reacción}}$  = entalpía molar la de la reacción (J/mol)
- $n_{\text{NaOH}}$  = moles de NaOH (mol)

La entalpía molar de la reacción puede calcularse a partir de las entalpías estándar de formación de los reactivos y productos involucrados, las cuales pueden consultarse en la literatura (Perry et al., 2008).

**Ecuación 40.** Entalpía molar de reacción a partir de las entalpías estándar de formación

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \sum \Delta H_f^\circ(\text{productos}) - \sum \Delta H_f^\circ(\text{reactivos})$$

**Cuadro 12.** Entalpías estándar de formación para los componentes de la formación del etóxido

Sustancia	Fórmula	Estado	$\Delta H^{\circ}f$ (kJ/mol)
Hidróxido de sodio	NaOH	Sólido	-425.6
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Líquido	-277.7
Etóxido de sodio	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ONa	Sólido	-413.4
Agua	H <sub>2</sub> O	Líquido	-285.5

(Borgogno, 2010; Perry et al., 2008)

Estos valores corresponden a las entalpías estándar de formación a 25 °C (298.15 K) y 1 atm de presión.

Como el sistema no está aislado, parte del calor se pierde hacia el ambiente ( $Q_{\text{pérdidas}}$ ). Esto se calcula considerando la eficiencia  $\eta$  del sistema de calentamiento, la cual está entre 0.80 y 0.90 para sistemas de laboratorio (Bulla et al., 2014) y, como el tiempo de calentamiento es significativo, se calcula a partir de la potencia de la estufa.

**Ecuación 41.** Pérdidas de calor para la formación del etóxido

$$Q_{\text{pérdidas}} = P_{\text{estufa}} * t * (1 - \eta)$$

Por último, el agitador magnético aplica trabajo al sistema, lo que también aporta energía ( $W_{\text{agitador}}$ ):

**Ecuación 42.** Trabajo realizado por el agitador magnético

$$W_{\text{agitador}} = P_{\text{agitador}} \cdot t$$

En donde:

- P = Potencia del agitador (W)
- t = tiempo de funcionamiento del agitador (s)

La potencia de agitación P requerida por un sistema generalmente se expresa como:

**Ecuación 43.** Potencia de agitación del agitador magnético

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5$$

En donde:

- P = potencia en vatios (W)
- $N_p$  = Número de potencia
- $\rho$  = densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
- N = velocidad de agitación (rps)
- D = Diámetro del recipiente o del vórtice generado (m)

El número de potencia,  $N_p$  depende del flujo, en donde  $N_p = 1.5$  para flujo laminar o de transición (si la velocidad es baja) y  $N_p = 0.3$  para flujo turbulento. Los agitadores magnéticos tienden a trabajar bajo flujo laminar o de transición.

#### **b. Formación del agente de lavado**

La formación del agente de lavado involucra la mezcla de agua destilada y cloruro de sodio (NaCl) y su calentamiento hasta 50 °C durante 15 minutos. Este proceso implica un aporte energético desde la estufa y un trabajo mecánico del agitador magnético para asegurar la disolución completa de la sal en el agua.

El balance de energía para este proceso es:

**Ecuación 44.** Balance de energía para la formación del agente de lavado

$$Q_{\text{lavado}} = Q_{\text{mezcla}} + Q_{\text{disolución}} + Q_{\text{pérdidas}} + W_{\text{agitador}}$$

Nuevamente, el aporte de calor de la mezcla  $Q_{\text{mezcla}}$  corresponde al calor necesario para elevar la temperatura del sistema desde la temperatura inicial  $T_{\text{inicial}}$  hasta la temperatura de operación final  $T_{\text{final}}$ .

**Ecuación 45.** Calor de mezcla para la formación del agente de lavado

$$Q_{\text{mezcla}} = m_{\text{agua}} C_{p,\text{agua}} \Delta T + m_{\text{NaCl}} C_{p,\text{NaCl}} \Delta T$$

En donde:

- $m_x$  = masa de agua o de cloruro de sodio (g)
- $C_{p,x}$  = capacidad calorífica específica del agua o de cloruro de sodio (J/g\*°C)
- $\Delta T$  = Cambio de temperatura del sistema (°C)

**Cuadro 13.** Capacidades caloríficas para los componentes de la formación del agente de lavado

Compuesto	Capacidad calorífica específica $C_p$ (J/g*°C)
Agua	4.18
NaCl	0.88

(Perry et al., 2008)

Para el calor de disolución de NaCl en agua  $Q_{\text{disolución}}$ , cabe mencionar que la entalpía de disolución molar estándar del cloruro de sodio es levemente endotérmica o casi neutra, con un valor de 3870 J/mol (Perry et al., 2008).

El calor asociado a la disolución se calcula como:

**Ecuación 46.** Calor de disolución para la formación del agente de lavado

$$Q_{\text{disolución}} = \Delta H_{\text{disolución}} \cdot n_{\text{NaCl}}$$

En donde:

- $\Delta H_{\text{disolución}}$  = entalpía molar de disolución (J/mol)
- $n_{\text{NaCl}}$  = moles de NaCl (mol)

Las pérdidas de calor al ambiente  $Q_{\text{pérdidas}}$  y el trabajo del agitador magnético  $W_{\text{agitador}}$ , se calculan de la misma manera que se demostró en la formación del etóxido de sodio, con las ecuaciones 38 y 39.

### c. Reacción de transesterificación ( $Q_{\text{reactor}}$ )

Para la etapa de transesterificación, el balance de energía específico es:

**Ecuación 47.** Balance de energía para la transesterificación

$$Q_{\text{reactor}} = Q_{\text{mezcla}} + Q_{\text{reacción}} + Q_{\text{pérdidas}} + W_{\text{agitador}}$$

El calor de mezcla  $Q_{mezcla}$  corresponde al calor necesario para elevar o mantener la temperatura de los componentes hasta 60 °C durante el proceso. Se calcula como:

**Ecuación 48.** Calor de mezcla para la transesterificación

$$Q_{mezcla} = \sum m_i C_{p,i} \Delta T_i$$

En donde:

- $m_i$  = masa de cada componente involucrado en la mezcla (g)
- $C_{p,i}$  = capacidad calorífica específica de cada componente (J/g\*°C)
- $\Delta T_i$  = Cambio de temperatura de cada componente (°C)

**Cuadro 14.** Capacidades caloríficas para los componentes de la transesterificación

Compuesto	Capacidad calorífica específica $C_p$ (J/g*°C)
Aceite (triglicéridos)	2.15 (promedio)
Etanol	2.44
Agua	4.18
Etóxido de sodio	1.20

(Perry et al., 2008; Knothe et al., 2005)

El calor de reacción  $Q_{reacción}$  puede calcularse de la misma manera que se demostró en la formación del etóxido (ver Ecuación 36), utilizando las entalpías estándar de formación de los reactivos y productos involucrados para calcular la entalpía molar de la reacción y multiplicarla por los moles del aceite.

**Cuadro 15.** Entalpías estándar de formación para los componentes de la transesterificación

Compuesto	Fórmula	$\Delta H^{\circ}f$ (kJ/mol)
Ácido oleico (modelo de TG)	$C_{18}H_{34}O_2$	-252 (aprox.)
Etanol	$C_2H_6O$	-277.69
Etóxido de sodio (NaOEt)	$C_2H_5ONa$	-413.39
Glicerol	$C_3H_8O_3$	-669.9
Etil éster de ácido oleico (biodiésel)	$C_{20}H_{38}O_2$	-402.5 (aprox.)

(Perry et al., 2008; Knothe et al., 2005)

Por último, las pérdidas de calor al ambiente  $Q_{pérdidas}$  y el trabajo del agitador magnético  $W_{agitador}$ , se calculan de la misma manera que se demostró en la formación del etóxido de sodio, con las Ecuaciones 41 y 42.

#### d. Secado ( $Q_{\text{secado}}$ )

El secado en el proceso de producción de biodiésel tiene como objetivo eliminar el agua y restos de ácido acético presentes en el biodiésel crudo. El sistema utilizado consta de un calentamiento mediante una estufa que opera a una temperatura de 120 °C durante 1 hora. Se debe tener en cuenta que la estufa aporta el calor necesario para evaporar los compuestos residuales y calentar el biodiésel. El balance de energía específico es:

**Ecuación 49.** Balance de energía para el secado

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{mezcla}} + Q_{\text{evaporación}} + Q_{\text{pérdidas}} + W_{\text{agitador}}$$

El calor de mezcla  $Q_{\text{mezcla}}$  corresponde al calor necesario para elevar o mantener la temperatura de los componentes.

**Ecuación 50.** Calor de mezcla para el secado

$$Q_{\text{mezcla}} = m_{\text{BDcrudo}} C_{p,\text{BD}} \Delta T + m_{\text{H}_2\text{O}} C_{p,\text{H}_2\text{O}} \Delta T + m_{\text{AA}} C_{p,\text{AA}} \Delta T$$

En donde:

- $m_x$  = masa de biodiésel crudo, agua o ácido acético (g)
- $C_{p,x}$  = capacidad calorífica específica del biodiésel, agua o ácido acético ( $\text{J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ )
- $\Delta T$  = Cambio de temperatura ( $^\circ\text{C}$ )

**Cuadro 16.** Capacidad calorífica para los componentes del secado

Compuesto	Capacidad calorífica específica $C_p$ ( $\text{J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ )
Biodiésel	2.10
Ácido acético	2.05
Agua	4.18

El calor de evaporación  $Q_{\text{evaporación}}$  corresponde al calor necesario para cambiar de fase el agua y el ácido acético.

**Ecuación 51.** Calor de evaporación para el secado

$$Q_{\text{evaporación}} = m_{\text{H}_2\text{O}} \lambda_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{AA}} \lambda_{\text{AA}}$$

En donde:

- $\lambda_x$  = calor latente de vaporización (kJ/kg)

**Cuadro 17.** Calor latente de vaporización para los componentes del secado

Compuesto	Calor latente de vaporización $L_v$ (kJ/kg)	Temperatura de referencia (°C)
Biodiésel	225 (aprox.)	300 – 350
Agua	2260	100
Ácido acético	390	118

Las pérdidas de calor al ambiente  $Q_{pérdidas}$  y el trabajo del agitador magnético  $W_{agitador}$ , se calculan de la misma manera que se demostró en la formación del etóxido de sodio, con las ecuaciones 41 y 42.

## **K. Diseño de experimentos**

El diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) es una herramienta estadística que permite planificar, realizar y analizar experimentos para evaluar cómo diferentes factores afectan una respuesta. Este enfoque es útil para optimizar procesos complejos, reducir el número de pruebas necesarias y construir modelos matemáticos precisos que representen el comportamiento del sistema (Anderson, 2016).

El DOE incluye diferentes tipos de configuraciones, dependiendo del objetivo del estudio y la naturaleza de las relaciones entre los factores. Algunos de los diseños más relevantes son los diseños factoriales, los factoriales fraccionados y los diseños de superficie de respuesta (Anderson, 2016).

Los diseños factoriales evalúan todas las combinaciones posibles de niveles de los factores y son útiles cuando se desea conocer tanto los efectos principales como las interacciones entre los factores. Estos diseños se utilizan principalmente cuando se desconoce si existen interacciones significativas y en las etapas iniciales del experimento, para explorar el espacio experimental. Entre sus ventajas destaca la capacidad de identificar interacciones entre factores y su implementación sencilla cuando el número de factores es reducido. Sin embargo, su principal desventaja es que el número de combinaciones crece exponencialmente al aumentar los factores, lo que implica un alto costo experimental.

Además, los diseños factoriales no son adecuados para modelar comportamientos no lineales (Anderson, 2016).

Los diseños factoriales fraccionados son una alternativa que utiliza solo una fracción de las combinaciones posibles de niveles de los factores, lo que permite reducir significativamente la cantidad de experimentos sin perder la capacidad de identificar efectos principales e interacciones clave. Este tipo de diseño se aplica cuando el número de factores es alto y se busca reducir el número de pruebas o en estudios preliminares donde se pretende identificar los factores más influyentes. Entre sus ventajas se encuentra la reducción del número de puntos experimentales y la posibilidad de descartar factores no significativos. Sin embargo, presentan la desventaja de sacrificar información sobre interacciones de orden superior y, en algunos casos, pueden subestimar efectos no lineales si el modelo subyacente es más complejo (Anderson, 2016).

Por otro lado, los diseños de superficies de respuesta (RSM) permiten modelar relaciones no lineales entre los factores y la respuesta mediante ecuaciones cuadráticas ajustadas a los datos experimentales, lo que los hace especialmente útiles cuando se espera que la respuesta del sistema tenga curvatura. Estos diseños se utilizan para optimizar procesos en función de múltiples variables y cuando los factores tienen un impacto no lineal en la respuesta. Las principales ventajas de los RSM radican en su capacidad de ajustar modelos cuadráticos completos, lo que permite identificar puntos óptimos dentro del espacio experimental y modelar curvaturas (Anderson, 2016). No obstante, requieren más puntos experimentales que los diseños factoriales fraccionados y su análisis es más complejo, por lo que es común apoyarse en software especializado, como Design Expert.

#### **a. Tipos de diseños de superficie de respuesta (RSM)**

Entre las configuraciones más comunes de los RSM destacan los diseños centrales compuestos (DCC), los diseños Box-Behnken (BBD) y los diseños de Doehlert (Myers et al., 2016).

Los diseños centrales compuestos (DCC) combinan puntos factoriales, axiales y centrales para ajustar modelos cuadráticos completos, lo que les permite

capturar la curvatura en la respuesta y explorar un amplio espacio experimental. Esta configuración es ideal para procesos con alta variabilidad, donde se esperan interacciones complejas entre los factores. Sin embargo, su principal desventaja es que requieren una mayor cantidad de puntos experimentales en comparación con otros diseños, lo que incrementa el costo y la complejidad del análisis (Myers et al., 2016).

Por otro lado, los diseños Box-Behnken (BBD) se caracterizan por no incluir puntos axiales, lo que evita combinaciones extremas de los factores. Esto reduce la cantidad de puntos experimentales y minimiza el riesgo de trabajar en condiciones extremas que podrían ser inviables o inseguras. No obstante, una de sus limitaciones es que no exploran los límites del espacio experimental, lo que puede ser un inconveniente cuando es relevante evaluar puntos cercanos a los límites de los factores (Myers et al., 2016).

Finalmente, los diseños de Doehlert son configuraciones optimizadas que buscan minimizar la cantidad de puntos experimentales manteniendo la precisión del modelo. Este tipo de diseño permite una exploración eficiente del espacio experimental con un menor número de experimentos. Sin embargo, son menos comunes y pueden ser más difíciles de interpretar visualmente, ya que sus puntos experimentales no están dispuestos en una cuadrícula regular como en otros diseños (Myers et al., 2016).

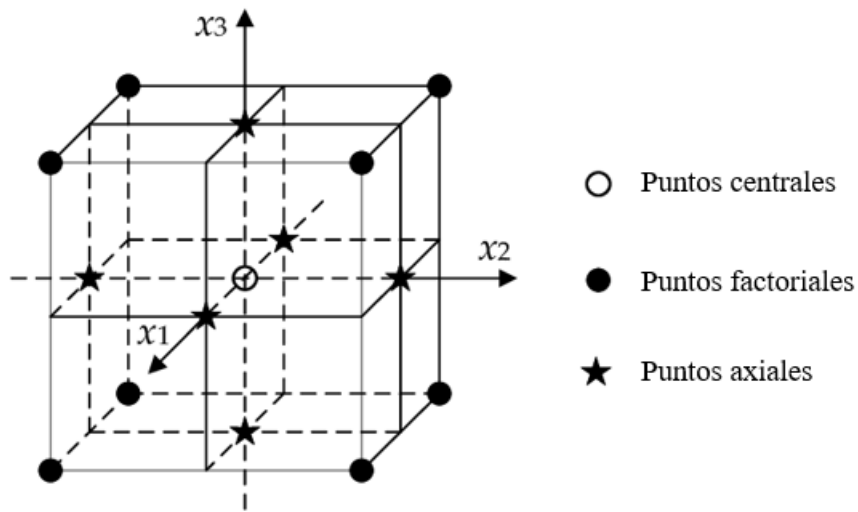
#### **b. Diseño central compuesto (DCC)**

Dentro de los diseños de superficies de respuesta (RSM), los diseños centrales compuestos (DCC) son ampliamente utilizados debido a su capacidad para ajustar modelos cuadráticos completos, lo que les permite capturar la curvatura en la respuesta y evaluar posibles interacciones no lineales (Montgomery, 2017).

Este diseño se caracteriza por incluir tres tipos de puntos experimentales:

- *Puntos factoriales*: representan las combinaciones extremas de los niveles de los factores dentro del rango experimental. Estos puntos permiten evaluar los efectos principales y las interacciones lineales entre los factores (Montgomery, 2017).
- *Puntos axiales*: se ubican fuera o en los límites del rango experimental, y su función principal es capturar la curvatura de la superficie de respuesta. Estos puntos ayudan a ajustar los coeficientes cuadráticos del modelo (Montgomery, 2017).
- *Puntos centrales*: están situados en el centro del espacio experimental y permiten evaluar la variabilidad inherente al sistema. La repetición de estos puntos mejora la precisión del análisis al proporcionar una medida del error experimental (Montgomery, 2017).

**Figura 21.** Puntos experimentales en un diseño central compuesto (DCC)



(Wang et al., 2018)

Alfa ( $\alpha$ ) es un parámetro que determina la distancia de los puntos axiales respecto al centro del espacio experimental en términos de unidades codificadas. En otras palabras,  $\alpha$  define qué tan lejos se encuentran los puntos axiales de los puntos centrales, y su valor puede ajustarse según el tipo de diseño y los objetivos del experimento (Montgomery, 2017).

El valor de  $\alpha$  influye en la capacidad del diseño para capturar la curvatura de la superficie de respuesta (Montgomery, 2017). Existen diferentes configuraciones según el valor de  $\alpha$ :

- *Rotacional (CCD-R)*: los puntos axiales están equidistantes del centro del espacio experimental, asegurando simetría en todas las direcciones. Esto proporciona una precisión uniforme en la predicción de la respuesta dentro de un radio determinado. El valor de  $\alpha$  en este caso se calcula usando  $k$ , que es el número de factores del experimento (Montgomery, 2017).

**Ecuación 52.** Parámetro alfa para un diseño rotacional

$$\alpha = (2^k)^{0.25}$$

- *Face-Centered (FCC)*: los puntos axiales se colocan en los bordes del rango experimental, es decir, el valor de  $\alpha$  se fija en 1 ( $\alpha = 1$ ). Esta configuración es ideal para situaciones en las que existen límites claros para los factores y no se desea excederlos (Montgomery, 2017).
- *Inscrito (CCD-I)*: los puntos axiales se ubican dentro del rango experimental. Esta configuración se utiliza cuando los valores extremos podrían ser inviables o potencialmente peligrosos, ya que evita que los puntos se desplacen más allá de los límites establecidos para los factores (Montgomery, 2017).

### c. Programa “Design Expert”

Design Expert es un programa especializado para el diseño de experimentos que permite planificar, analizar y optimizar experimentos de manera eficiente. Es utilizado en diversas áreas de investigación científica e industrial para generar modelos estadísticos precisos, interpretar resultados y representar visualmente las respuestas. Uno de sus principales enfoques es la implementación de Diseños de Superficies de Respuesta (RSM), como los Diseños Central Compuesto (DCC) en configuraciones como rotacional (CCD-R), face-centered (FCC) e inscrito (CCD-I) (Stat-Ease, Inc., 2022).

Una de las principales ventajas de Design Expert es su capacidad para generar automáticamente el diseño experimental. El usuario puede definir los factores de estudio, establecer sus niveles y seleccionar el tipo de diseño más adecuado según el objetivo del experimento. El software organiza los puntos experimentales en una matriz de diseño, lo que proporciona una estructura clara y ordenada del plan experimental. Asimismo, incluye ajustes para modelos lineales, cuadráticos y cúbicos (Stat-Ease, Inc., 2022).

**Figura 22.** Interfaz del software Design Expert (no disponible en español)

The screenshot shows the Design Expert software interface. On the left is a 'Navigation Pane' with a tree view containing sections like 'Design (Actual)', 'Information', 'Notes', 'Summary', 'Graph Columns', 'Evaluation', 'Analysis', 'Optimization', and 'Post Analysis'. Below the navigation pane is the 'Design Properties' section, currently showing 'Run 1' with 'Row Status' set to 'Normal' and a 'Comment' field. The main area of the interface is a data table with the following columns: Std, Block, Run, Factor 1 A:Time min., Factor 2 B:Temperature deg C, Factor 3 C:Catalyst %, Response 1 Conversion %, and Response 2 Activity. The table contains 20 rows of experimental data, grouped into two blocks (Day 1 and Day 2).

Std	Block	Run	Factor 1 A:Time min.	Factor 2 B:Temperature deg C	Factor 3 C:Catalyst %	Response 1 Conversion %	Response 2 Activity
10	Day 1	1	45	85	2.5		
9	Day 1	2	45	85	2.5		
6	Day 1	3	50	80	3		
12	Day 1	4	45	85	2.5		
3	Day 1	5	40	90	2		
1	Day 1	6	40	80	2		
2	Day 1	7	50	80	2		
7	Day 1	8	40	90	3		
5	Day 1	9	40	80	3		
11	Day 1	10	45	85	2.5		
8	Day 1	11	50	90	3		
4	Day 1	12	50	90	2		
20	Day 2	13	45	85	2.5		
15	Day 2	14	45	76.591	2.5		
13	Day 2	15	36.591	85	2.5		
16	Day 2	16	45	93.409	2.5		
18	Day 2	17	45	85	3.3409		
14	Day 2	18	53.409	85	2.5		
19	Day 2	19	45	85	2.5		
17	Day 2	20	45	85	1.6591		

(Stat-Ease, Inc., 2022)

Además, el programa incluye herramientas avanzadas para el análisis estadístico de los datos mediante el análisis de varianza (ANOVA). Esta metodología permite evaluar la significancia estadística de los efectos individuales de los factores y sus interacciones. En este contexto, los valores-p son indicadores fundamentales: un valor-p menor a 0.05 indica un efecto significativo, mientras que un valor-p mayor a 0.05 sugiere que el efecto no es significativo en el nivel de confianza establecido (Stat-Ease, Inc., 2022).

El ajuste del modelo se evalúa mediante coeficientes estadísticos, como el  $R^2$  ajustado y el  $R^2$  predicho. El  $R^2$  ajustado mide la proporción de la variabilidad

explicada por el modelo, considerando el número de términos incluidos, mientras que el  $R^2$  predicho evalúa la capacidad del modelo para predecir nuevos valores. Para garantizar un buen ajuste, la diferencia entre estos dos coeficientes debe ser menor a 0.2, ya que diferencias mayores indican que el modelo podría ser ineficaz para realizar predicciones precisas (Stat-Ease, Inc., 2022).

Otra funcionalidad destacada de Design Expert es la generación de gráficos tridimensionales de superficies de respuesta, los cuales permiten visualizar cómo varía la respuesta en función de los factores evaluados. Estos gráficos facilitan la interpretación de los resultados y ayudan a identificar las condiciones óptimas de operación (Stat-Ease, Inc., 2022).

Asimismo, el software ofrece un conjunto de herramientas de diagnóstico para evaluar la validez del modelo estadístico, verificando supuestos como la normalidad de los residuos y la homogeneidad de las varianzas (Stat-Ease, Inc., 2022).

## **L. Análisis estadístico e inferencial**

La estadística descriptiva, inferencial y el análisis de incertidumbre de medición son herramientas importantes para interpretar datos experimentales y evaluar tanto la precisión como la confiabilidad de los resultados (Orellana, 2001).

### **a. Media aritmética**

La media aritmética es una medida central que permite representar un conjunto de datos mediante un valor único que resume el comportamiento general de las observaciones (Orellana, 2001). Su ecuación se expresa como:

**Ecuación 53.** Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

En donde:

- $\bar{x}$  = media aritmética del conjunto de datos
- $n$  = número de observaciones

- $x_i$  = valores individuales de las observaciones

La media permite interpretar un valor promedio y evaluar tendencias generales. Sin embargo, su uso debe complementarse con otras medidas que consideren la dispersión de los datos, ya que valores atípicos pueden sesgar la interpretación (Orellana, 2001).

### **b. Desviación estándar**

La desviación estándar ( $\sigma$ ) es una medida de dispersión que indica cuánto se desvían, en promedio, los valores de un conjunto de datos respecto a la media aritmética (Orellana, 2001). Esta métrica permite evaluar la precisión de los datos. Su ecuación se expresa como:

**Ecuación 54.** Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

En donde:

- $\sigma$  = desviación estándar
- $\bar{x}$  = media aritmética del conjunto de datos
- $n$  = número de observaciones
- $x_i$  = valores individuales de las observaciones

### **c. Propagación de incertidumbres en operaciones aritméticas**

El análisis de incertidumbre en mediciones experimentales requiere evaluar cómo las incertidumbres individuales afectan al resultado final en operaciones de suma, resta, multiplicación y división.

#### **i. Incertidumbre en sumas y restas**

Cuando se realizan operaciones de suma y resta, la incertidumbre combinada ( $u_c$ ) se calcula sumando cuadráticamente las incertidumbres de las variables involucradas (Durazo, 2016):

**Ecuación 55.** Incertidumbre para operaciones de suma y resta

$$u_c = \sqrt{u_{x_1}^2 + u_{x_2}^2}$$

En donde:

- $u_c$  = incertidumbre combinada.
- $u_{x_1}$  y  $u_{x_2}$  = incertidumbres estándar de las mediciones  $x_1$  y  $x_2$ .

Esta ecuación indica que las incertidumbres se combinan de manera acumulativa, siendo más relevante cuanto mayor es la magnitud de los errores individuales (Durazo, 2016).

## ii. Incertidumbre en multiplicación y división

Para operaciones de multiplicación y división, la incertidumbre relativa ( $u_y/y$ ) se determina mediante (Durazo, 2016):

**Ecuación 56.** Incertidumbre para operaciones de multiplicación y división

$$\frac{u_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{u_{x_1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{x_2}}{x_2}\right)^2}$$

En donde:

- $y$  = resultado de la operación ( $x_1 * x_2$  o  $x_1/x_2$ )
- $u_{x_1}/x_1$  y  $u_{x_2}/x_2$  = incertidumbres relativas de  $x_1$  y  $x_2$ .

Esta ecuación resalta que, al trabajar con productos o cocientes, los errores se combinan de manera proporcional a las magnitudes relativas de las variables (Durazo, 2016).

## d. Coeficiente de variación

El coeficiente de variación (CV) mide la dispersión de un conjunto de datos en términos relativos respecto a la media, permitiendo comparar la variabilidad de distintos conjuntos de datos independientemente de sus unidades (Orellana, 2001). Su ecuación se expresa como:

**Ecuación 57.** Coeficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$$

En donde:

- CV = coeficiente de variación ( %)
- $\sigma$  = desviación estándar
- $\bar{x}$  = media aritmética del conjunto de datos

Un CV alto indica una mayor variabilidad relativa, mientras que un CV bajo refleja una menor dispersión en relación con la media (Orellana, 2001).

**e. Intervalos de confianza**

El intervalo de confianza (IC) al 95 % proporciona un rango dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero de la media, con un nivel de confianza del 95 % (Orellana, 2001). Este intervalo se calcula mediante:

**Ecuación 58.** Intervalo de confianza

$$IC = \bar{x} \pm t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

En donde:

- IC = Intervalo de confianza al 95 %
- $\bar{x}$  = media aritmética del conjunto de datos
- t = valor t de la distribución t-Student para un nivel de confianza del 95 % y grados de libertad  $n - 1$
- $\sigma$  = desviación estándar
- n = número de observaciones

El intervalo de confianza describe la precisión de la estimación de la media y se utiliza para evaluar la consistencia de los resultados experimentales. Un intervalo estrecho indica alta precisión, mientras que uno amplio sugiere mayor incertidumbre (Orellana, 2001).

**f. Prueba t de Student**

Las pruebas t son procedimientos estadísticos que permiten comparar las medias de dos conjuntos de datos y determinar si las diferencias observadas son

estadísticamente significativas o se deben al azar. Esta se basa en la distribución t de Student, que es adecuada para muestras pequeñas y tiene en cuenta la incertidumbre asociada a la estimación de la desviación estándar de la población a partir de la muestra.

Su interpretación debe complementarse con el análisis de los valores-p, los cuales indican el nivel de significancia estadística: para  $p < 0.05$  se rechaza  $H_0$ , indicando diferencias significativas, mientras que para  $p > 0.05$  no se puede rechazar  $H_0$ , indicando que las diferencias podrían ser atribuibles al azar (Orellana, 2001). Existen dos tipos principales de pruebas t.

### **i. Prueba T independiente**

Se utiliza para comparar las medias de dos grupos independientes, es decir, cuando los datos de un grupo no están relacionados con los del otro. Entre las suposiciones fundamentales se encuentra que los datos siguen una distribución normal, las varianzas de los grupos son iguales (suposición de homocedasticidad) y las muestras son aleatorias y representativas (Orellana, 2001). Su ecuación general es:

**Ecuación 59.** Prueba t independiente

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{s_p^2 \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

En donde:

- $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  = medias de los grupos 1 y 2
- $s_p$  = es la varianza combinada de las muestras
- $n_1$  y  $n_2$  = tamaños de las muestras

Sin embargo, también puede realizarse automáticamente en programas como Excel, usando la función “Prueba.T” y el tipo 2. La hipótesis nula ( $H_0$ ) plantea que las medias de ambos grupos son iguales, y la hipótesis alternativa ( $H_A$ ) sostiene que son diferentes (Orellana, 2001).

## ii. Prueba T pareada

Se utiliza cuando las muestras son dependientes, es decir, cuando cada par de mediciones proviene de la misma unidad experimental o cuando se evalúa la misma muestra en diferentes condiciones. Las suposiciones son que los datos de las diferencias entre pares siguen una distribución normal y las muestras están emparejadas y son comparables (Orellana, 2001). Su ecuación es:

**Ecuación 60.** Prueba T pareada

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}}$$

En donde:

- $d$  = media de las diferencias entre pares
- $s_d$  = desviación estándar de las diferencias
- $n$  = número de pares de datos

Sin embargo, también puede realizarse automáticamente en programas como Excel, usando la función “Prueba.T” y el tipo 1. La hipótesis nula ( $H_0$ ) sostiene que la media de las diferencias es igual a cero mientras que la hipótesis alternativa ( $H_A$ ) plantea que la media de las diferencias es distinta de cero.

## VI. METODOLOGÍA

### A. Caracterización del aceite usado de frituras

**Cuadro 18.** Listado de equipos para la caracterización del aceite usado de frituras

Cant.	Equipo	Marca y modelo	Rango de medición
1	Balanza de humedad	OHAUS MB120	T: 40 – 230 °C RH: 0.01 – 100 %
1	Refractómetro digital con baño térmico acoplado	ATAGO RX-5000a	nD: 1.32700 – 1.58000
1	Estufa con agitación magnética	VEVOR SH-3ABE	v = 0 – 2000 rpm T = 0 – 300 °C
1	Balanza analítica	OHAUS Pioneer	m = 0 – 0.220 kg
1	Balanza de mesa	OHAUS Valor	m = 0 – 3 kg
1	Medidor de calidad de aceite	PCE-FOT 10	T = 30 – 200 °C TPM = 0 – 100 %

**Cuadro 19.** Listado de reactivos para la caracterización de aceite usado de frituras

Cantidad	Reactivo
0.005 kg (5 g)	Hidróxido de potasio
0.02 L (20 mL)	Fenolftaleína
1 L	Etanol al 99 %
0.0025 kg (2.5 g)	Ftalato ácido de potasio
0.5 L (500 mL)	Acetona pura
1 L	Aceite usado de frituras

**Cuadro 20.** Listado de cristalería para la caracterización de aceite usado de frituras

Cantidad	Cristalería	Capacidad
1	Balón aforado	0.1 L (100 mL)
1	Bureta graduada	0.05 L (50 mL)
1	Pipeta graduada	0.01 L (10 mL)
3	Erlenmeyer	0.125 L (125 mL)
1	Pipeta Pasteur	0.003 L (3 mL)
1	Probeta	0.5 L (50 mL)
1	Picnómetro	0.025 L (25 mL)
1	Beaker	1 L
1	Beaker	0.6 L (600 mL)
3	Beaker	0.1 L (100 mL)
1	Viscosímetro de Ostwald	N/A
1	Termómetro de alcohol	150 °C

**Cuadro 21.** Listado de materiales para la caracterización de aceite usado de frituras

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>
1	Rollo de papel aluminio
1	Rollo de cinta adhesiva
1	Par de guantes de nitrilo
1	Espátula metálica
1	Caja de papel filtro
1	Soporte universal
1	Pinza doble para bureta
1	Agitador magnético
1	Embudo para filtración
1	Bulbo

**a. Filtración del aceite usado de frituras**

1. Colocar el embudo en el beaker de 1 L, asegurándose que esté bien centrado.
2. Doblar el papel filtro en forma de cono y colocarlo dentro del embudo, asegurándose que quede adherido a las paredes del embudo para evitar que el aceite pase por fuera.
3. Verter lentamente el aceite usado de fritura en el embudo con papel filtro, asegurándose de no sobrepasar la capacidad del embudo.
4. Dejar que el aceite pase por el filtro de manera continua. Si el flujo se detiene o es muy lento, revisar si los residuos están obstruyendo la entrada. Cambiar el papel filtro si es necesario.
5. Continuar la filtración hasta completar 0.6 L (600 mL) de aceite usado de frituras.
6. Retirar el embudo y desechar el papel filtro con los residuos sólidos en un recipiente adecuado.
7. Verificar que no haya residuos visibles en el beaker. De ser necesario, realizar una segunda filtración.

**b. Densidad del aceite usado de frituras**

1. Pesar en la balanza analítica el picnómetro vacío de 0.025 L (25 mL), junto con el tapón, y anotar su masa.
2. Agregar la muestra de aceite al picnómetro, hasta que el nivel llegue a la boquilla esmerilada.

3. Colocar el tapón del picnómetro y limpiar cualquier excedente de aceite que se haya salido.
4. Pesarse en la balanza analítica el picnómetro con aceite y anotar su masa.
5. Calcular la densidad del aceite por medio de la Ecuación 3 (ver Marco teórico).
6. Repetir los pasos 1-5 para obtener mediciones en triplicado.

**c. Número ácido (mg KOH/g aceite) y porcentaje de ácidos grasos libres (% AGL)**

1. Preparar 0.1 L (100 mL) de una solución 0.1 M de KOH en etanol, agregando  $6.773 \times 10^{-4}$  kg (0.6733 g) de KOH y disolviendo en etanol hasta 0.1 L (100 mL) en un balón aforado.
2. Agregar en un Erlenmeyer de 0.125 L (125 mL),  $1.1 \times 10^{-4}$  kg (0.1100 g) de ftalato ácido de potasio y disolver en 50 mL de agua destilada.
3. Agregar 3 gotas de fenolftaleína al Erlenmeyer anterior.
4. Verter 0.01 L (10 mL) de la solución 0.1 M de KOH a una bureta de 0.05 L (50 mL).
5. Titular el Erlenmeyer que contiene ftalato ácido de potasio y fenolftaleína hasta que este se torne de color rosado claro.
6. Anotar el volumen de solución de KOH utilizado y calcular la concentración real de la solución de KOH.
7. En otro Erlenmeyer, agregar 0.05 L (50 mL) de etanol y 3 gotas de fenolftaleína.
8. Titular el Erlenmeyer con la misma solución de KOH hasta que este se torne color rosado claro.
9. Anotar el volumen de solución de KOH utilizado para obtener el volumen del blanco.
10. En otro Erlenmeyer, agregar  $1.5 \times 10^{-3}$  L (1.5 mL) de la muestra de aceite y disolver en 0.05 L (50 mL) de etanol.
11. Agregar 3 gotas de fenolftaleína al Erlenmeyer anterior.
12. Titular el Erlenmeyer que contiene la muestra de aceite y etanol hasta que este se torne de color rosado claro.

13. Anotar el volumen de solución de KOH utilizado.
14. Repetir los pasos 10. 13 dos veces más para obtener triplicados de las titulaciones.
15. Calcular el número ácido de la muestra por medio de la Ecuación 2 (ver Marco teórico).
16. Calcular el porcentaje de ácidos grasos libres a partir del número ácido, por medio de la Ecuación 7 (ver Marco teórico).
17. Si el resultado de % AGL es menor a 2 %, es apto para su utilización directa en la producción de biodiésel con etanol, de lo contrario, es necesario considerar la esterificación ácida como pretratamiento adicional.

**d. Humedad del aceite usado de frituras**

1. Con un trozo de papel de aluminio, moldear una cajita de aproximadamente 0.025 m (2.5 cm) de alto y 0.05 m (5 cm) de ancho. Hacer esto de modo que el lado brillante del papel aluminio quede en el lado interior de la cajita.
2. Encender la balanza (primer botón, esquina inferior izquierda de la balanza) y seleccionar en la pantalla táctil “Biblio. Métodos”.
3. Seleccionar el método creado con el nombre “Aceites”, el cual está programado para determinar el porcentaje de humedad por un período de 2 minutos a 120 °C.
4. Seleccionar en la pantalla táctil “Cargar” (esquina inferior derecha) para empezar a utilizar el método.
5. Colocar la cajita de aluminio dentro de la balanza encima del plato de aluminio y cerrar la tapa de la balanza. Esperar a que tare.
6. Colocar una masa de  $1.0 \cdot 10^{-3}$  kg (1.00 g) de aceite y cerrar nuevamente la tapa de la balanza. Esta hará un sonido por unos segundos y empezará a secar si se realizó correctamente el procedimiento.
7. Una vez finalizado el tiempo de secado, anotar el porcentaje de humedad desplegado en la pantalla.
8. Para realizar otra medición, seleccionar el botón de tara (cuarto botón, esquina inferior derecha de la balanza) y levantar la tapa de la balanza.
9. Repetir los pasos 1 – 8 dos veces más para obtener triplicados.

**e. Viscosidad del aceite usado de frituras**

1. Asegurarse que el viscosímetro esté limpio antes de proceder a hacer la prueba, de no estarlo, lavar con acetona y secar completamente.
2. Encender el baño térmico y ajustar la temperatura a 40 °C. Esperar a que se establezca la temperatura.
3. Medir aproximadamente 0.015 L (15 mL) de muestra de aceite en una probeta.
4. Agregar con cuidado la muestra de aceite al tubo más ancho del viscosímetro e introducir el equipo en el soporte.
5. Una vez se haya estabilizado la temperatura del baño térmico introducir el soporte con el viscosímetro en el baño, asegurándose que quede en posición vertical, lo más firme y estable posible.
6. Esperar aproximadamente 10-15 minutos para permitir que el viscosímetro con la muestra llegue a la temperatura del baño térmico.
7. Con ayuda del bulbo, aplicar succión al tubo pequeño a modo que la muestra de aceite llegue más allá de la marca superior del viscosímetro.
8. Retirar el bulbo y permitir que la muestra baje hasta que el menisco esté justo sobre la marca superior del viscosímetro. En este punto, comenzar la toma de tiempo con un cronómetro.
9. Esperar hasta que el menisco llegue a la marca inferior del viscosímetro y detener la toma de tiempo.
10. Calcular la viscosidad cinemática de la muestra por medio de la Ecuación 4 (ver Marco teórico).
11. Repetir los pasos 1 – 10 dos veces más para obtener triplicados.

**f. Índice de refracción del aceite usado de frituras**

1. Encender el baño térmico y el refractómetro por la parte trasera del equipo.
2. Programar el baño térmico a 40 °C. En la pantalla del refractómetro, indicará la temperatura en la que se encuentra el lector.
3. Al haber llegado a la temperatura, limpiar con un Kimwipe el lente del refractómetro.

4. Con una Pipeta Pasteur, agregar 3 gotas de aceite en el lente y cerrarlo.
5. Esperar a que el aceite llegue a 40 °C y presionar “Start”.
6. Anotar la lectura del refractómetro.
7. Repetir los pasos 1 – 6 para obtener triplicados de la muestra.

**g. Material polar total (TPM) del aceite usado de frituras**

1. Colocar 0.4 L (400 mL) de aceite en un beaker de 0.6 L (600 mL).
2. Sobre una estufa, calentar la muestra de aceite a 40 °C y agitar a aproximadamente 250 rpm.
3. Seleccionar el botón de “On” para encender el dispositivo medidor de la calidad del aceite PCE-FOT-10.
4. Colocar el sensor del dispositivo en la muestra de aceite y esperar a que la lectura desplegada se estabilice.
5. Anotar el porcentaje de TPM que indica la pantalla.
6. Repetir los pasos 1 – 5 para obtener triplicados de la muestra.

**B. Diseño del experimento: Diseño Central Compuesto Face-Centered (FCC) en Design Expert**

1. Determinar los factores a estudiar, por ejemplo: cantidad de catalizador (% m/m), relación molar aceite:alcohol y tiempo de reacción (h).
2. Establecer la respuesta principal, por ejemplo: rendimiento de ésteres monoalquílicos (biodiésel).
3. Consultar la literatura y datos experimentales previos para definir los valores mínimos y máximos de cada factor. De no haber literatura o datos experimentales aplicables, hacer corridas experimentales previas para definir dichos límites, asegurándose que no comprometan la viabilidad de la reacción (por ejemplo: evitando la saponificación).
4. Abrir el software “Design Expert”, seleccionar “Diseño de Superficie de Respuesta (RSM)” y luego “Diseño Central Compuesto Face-Centered”.
5. Introducir los valores mínimos y máximos de cada factor y verificar que el software incluya los puntos factoriales, axiales y centrales.

6. Hacer clic en “Generar diseño” para visualizar la lista de puntos experimentales, asegurándose que los puntos axiales estén ubicados en los límites del rango experimental.
7. Incluir suficientes puntos centrales para evaluar la variabilidad.

### C. Producción de biodiésel con etanol y metanol

**Cuadro 22.** Listado de equipos para la producción de biodiésel

Cant.	Equipo	Marca y modelo	Rango de medición
2	Estufa con agitación magnética	VEVOR SH-3ABE	v = 0 – 2000 rpm T = 0 – 300 °C
1	Balanza analítica	OHAUS Pioneer PX224	m = 0 – 0.220 kg
1	Balanza de mesa	OHAUS Valor 3000 Xtreme	m = 0 – 3 kg
1	Deshumidificador pequeño	Eva Dry	Cobertura = 5 -20 m <sup>2</sup>
1	Sensor de humedad	Steren	RH = 10 – 99 %

**Cuadro 23.** Listado de reactivos para la producción de biodiésel

Cantidad	Reactivo
0.005 kg (5 g)	Hidróxido de sodio
1 L	Metanol al 99 %
1 L	Etanol al 99 %
0.05 kg (50 g)	Sílica gel
1 L	Aceite usado de frituras
0.05 L (50 mL)	Ácido acético glacial

**Cuadro 24.** Listado de cristalería para la producción de biodiésel

Cantidad	Cristalería	Capacidad
1	Erlenmeyer	0.125 L (125 mL)
1	Vidrio de reloj	N/A
1	Pipeta graduada	0.01 L (10 mL)
1	Matraz Kitasato	0.5 L (500 mL)
1	Embudo de decantación	0.5 L (500 mL)
1	Beaker	0.250 L (250 mL)
2	Beaker	0.1 L (100 mL)
1	Termómetro de alcohol	150 °C

**Cuadro 25.** Listado de materiales para la producción de biodiésel

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>
1	Rollo de papel aluminio
1	Rollo de cinta adhesiva
1	Par de guantes de nitrilo
1	Espátula metálica
1	Soporte universal
1	Soporte de anillo
2	Agitador magnético
1	Embudo para filtración
1	Bulbo
1	Tapón de hule con agujero
1	Manguera de hule (largo: 30 cm; diámetro 1 cm)
1	Recipiente de vidrio con tapadera

1. Previo a comenzar, colocar el deshumidificador en la cercanía del área de trabajo y encender la campana de extracción con la puerta del laboratorio cerrada. Esperar 30 minutos a que el sensor de humedad despliegue una humedad ambiente entre 50 – 55 %.
2. Seleccionar un punto experimental a realizar de la lista generada por el software Design Expert en la sección anterior.
3. Pesar en un Erlenmeyer de 0.125 L (125 mL) los gramos de alcohol indicados en el punto experimental seleccionado.
4. Pesar en un vidrio de reloj los gramos de NaOH indicados en el punto experimental seleccionado, asegurándose de usar guantes de nitrilo.
5. Agregar los gramos de NaOH al Erlenmeyer que contiene el alcohol.
6. Introducir el agitador magnético en el Erlenmeyer.
7. Cubrir la boquilla del Erlenmeyer con aluminio para evitar exposición a la humedad del ambiente y pérdidas por evaporación del alcohol.
8. Colocar el Erlenmeyer sobre una estufa y calentar a 50 °C por 30 minutos a 500 rpm o hasta que todo el NaOH se haya disuelto en el alcohol para formar el alcóxido de sodio.
9. En un recipiente de vidrio, abrir un agujero en la tapadera de 0.01 m de diámetro (3/8 de pulgada) y agregar 0.015 kg (15 g) de sílica gel.

10. Pesar 0.1 kg (100 g) de aceite usado de frituras previamente filtrado en un matraz Kitasato de 0.5 L (500 mL) y agregar un agitador magnético.
11. Colocar el matraz sobre otra estufa apagada y armar el sistema para la reacción: introducir en el vástago lateral del matraz Kitasato una sección de manguera de hule de 0.3 m (30 cm) de largo y 0.01 m de diámetro (3/8 de pulgada). Encajar el otro extremo de la manguera en el agujero de la tapadera del recipiente con sílica gel.
12. Introducir el termómetro de vidrio en un tapón de hule con agujero, asegurándose que quede fijo, y encajar el sistema tapón-termómetro en la boquilla del matraz Kitasato.
13. Una vez armado el sistema, encender la estufa y calentar el aceite usado de cocina a 60°C con agitación de 280 rpm.
14. Agregar lentamente el alcóxido de sodio del Erlenmeyer al matraz Kitasato por la boquilla superior, retirando el tapón-termómetro.
15. Colocar nuevamente el tapón-termómetro y cubrir con aluminio para evitar pérdidas por evaporación o entrada de humedad del ambiente.
16. Mantener la temperatura en 60 °C hasta que se cumpla el tiempo indicado en el punto experimental seleccionado.
17. Al finalizar el tiempo, apagar la estufa y la agitación y retirar el tapón-termómetro.
18. Agregar la cantidad estequiométrica en la Ecuación 23 (ver Marco teórico) + 0.5 g de ácido acético glacial al matraz Kitasato para detener y neutralizar la reacción.
19. Dejar reposar el matraz Kitasato por 15 minutos.
20. Verter lentamente el contenido del matraz a un embudo de decantación de 0.5 L (500 mL).
21. Dejar reposar mínimo 1 hora, hasta que se vea una clara separación de fases.
22. Decantar la fase inferior en un beaker de 0.1 L (100 mL).
23. En otro beaker de 0.1 L (100 mL) agregar 0.06 kg (60 g) de agua destilada y 0.006 kg (6 g) de NaCl.

24. Colocar sobre una estufa y calentar a 50 °C por 15 minutos, hasta que todo el cloruro de sodio se disuelva y así formar el agente de lavado.
25. Realizar 3 lavados de 0.02 L (20 mL) al embudo de decantación con el biodiésel crudo, dejando reposar 20 minutos entre lavados y decantar la fase inferior en un beaker de 0.1 L (100 mL).
26. Trasvasar el biodiésel crudo a un beaker de 0.25 L (250 mL).
27. Colocar sobre una estufa y calentar a 120 °C por 1 hora para eliminar trazas de agua y de ácido acético glacial.
28. Permitir que el beaker se enfríe y verter el producto en un recipiente de vidrio previamente pesado.
29. Determinar la masa final del recipiente con el biodiésel y calcular el rendimiento de la reacción por medio de la Ecuación 1 (ver Marco teórico).
30. Realizar nuevamente los pasos 1 – 28 hasta realizar todos los puntos experimentales con etanol y metanol.

#### **D. Caracterización del biodiésel producido**

1. Utilizar los equipos, reactivos, cristalería y materiales descritos en los Cuadros 16 – 19, exceptuando el medidor de calidad del aceite y agregando tiras indicadoras de pH.
2. Realizar las pruebas descritas en la sección A, subsecciones a – f, utilizando como analito el biodiésel producido tanto con metanol como con etanol en vez de la muestra de aceite.
3. Adicionalmente, realizar la prueba 3/27, midiendo 0.003 L (3 mL) del biodiésel y agregándolos a un tubo de ensayo.
4. Si el biodiésel fue producido con metanol, medir 0.027 L (27 mL) de metanol y si fue con etanol, medir 0.027 L (27 mL) de acetona.
5. Agregar el solvente al tubo de ensayo con los 0.003 L (3 mL) de biodiésel.
6. Mezclar y observar si hay completa disolución, de lo contrario, la reacción no se dio completamente.
7. Introducir una tira de pH en el recipiente de almacenamiento del biodiésel producido.

8. Asegurarse que la tira esté completamente en contacto con la muestra durante al menos 5 – 10 segundos para permitir una reacción adecuada.
9. Retirar la tira y observar el cambio de color en función de la escala de colores proporcionada por el fabricante.
10. Comparar el color resultante con la escala de referencia para determinar el pH de la muestra.

### **E. Modelo de optimización en Design Expert (DCC-FCC)**

1. Abrir el programa Design Expert y seleccionar la opción de abrir diseño previamente configurado con los puntos experimentales del DCC-FCC.
2. Ingresar los valores de rendimiento de biodiésel obtenidos experimentalmente para cada punto de la matriz de diseño.
3. Verificar que todos los valores estén correctamente asignados a sus respectivas corridas y confirmar que los factores, sus niveles y las corridas experimentales estén correctamente establecidos.
4. Seleccionar la opción “Start Analysis” y definir los modelos a evaluar (lineal, cuadrático, cúbico, etc.)
5. Confirmar los indicadores estadísticos en el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la calidad del modelo ajustado:  $R^2$  ajustado y predicho deben ser similares, con una diferencia menor a 0.2 y los valores-p de los términos del modelo deben ser menores a 0.05 para considerarse significativos.
6. En la sección de gráficos de diagnóstico, verificar que los residuos estén distribuidos aleatoriamente en el gráfico de residuos vs. valores predichos y verificar que los puntos estén alineados a una línea recta en el gráfico de normalidad (Normal Probability Plot).
7. Generar los gráficos de superficies de respuesta 3D y contornos 2D para observar cómo varía la respuesta en función de los factores.
8. Ajustar el rango de visualización para identificar la región de máximos rendimientos de biodiésel.
9. Utilizar el modelo matemático ajustado para calcular las condiciones de los factores que maximizan el rendimiento. Esto se realiza ingresando las condiciones de los factores en la opción de predicción de software.

## **F. Validación del modelo de optimización**

1. Identificar puntos dentro del rango del modelo que no hayan sido utilizados previamente en el ajuste del modelo para evaluar su capacidad predictiva.
2. Realizar corridas experimentales en las condiciones seleccionadas y registrar el rendimiento de biodiésel obtenido.
3. Utilizar el modelo generado en Design Expert para predecir el rendimiento esperado bajo las mismas condiciones experimentales.
4. Comparar los valores experimentales y predichos mediante el error porcentual.

## VII. RESULTADOS

**Cuadro 26.** Caracterización del aceite usado de frituras empleado para la producción de biodiésel

Análisis	Unidad	Valor $\pm$ DE	CV (%)	IC al 95 %	Rango teó.
Número ácido	mg KOH/g aceite	0.428 $\pm$ 0.036	5.6	[0.368; 0.487]	0.0. 4.0
Ácidos grasos libres	% (ácido oleico)	0.851 $\pm$ 0.036	5.6	[0.733; 0.969]	0.0. 2.0
Densidad	g/mL	0.926 $\pm$ 0.001	0.1	[0.924; 0.928]	0.860. 0.950
Viscosidad cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	43.59 $\pm$ 1.41	1.3	[42.16; 45.02]	35.0. 60.0
Índice de refracción a 40°C	nD	1.46772 $\pm$ 0.00001	0.003	[1.46759; 1.46784]	1.46000. 1.48000
Humedad	%/g aceite	0.17 $\pm$ 0.01	34.8	[0.02; 0.31]	0.0. 0.60
Materia polar total	%	14.6 $\pm$ 0.1	3.2	[13.4; 15.7]	0.0. 35.0

En el cuadro anterior se muestran los resultados del análisis fisicoquímico realizado al aceite usado de frituras, junto con sus unidades, desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), intervalos de confianza (IC) al 95 % y rangos de referencia provenientes de la literatura (ver Cuadro 6, Marco teórico).

**Cuadro 27.** Comparación de rendimientos de biodiésel con etanol y metanol

Criterio	Promedio	Desv. Est.	CV (%)	T-Pareada	T-Independiente
BD etanol	79.3 %	9.1 %	11.4	4.23E-09	2.13E-05
BD metanol	90.2 %	4.5 %	4.9		

En el cuadro anterior se muestran los resultados de los rendimientos promedio de biodiésel con etanol y metanol en las 20 corridas (puntos experimentales) realizadas. Se muestra la desviación estándar (Desv. Est.), el coeficiente de variación (CV) y las pruebas t (pareada e independiente). Valores-p menores a 0.05 indican que las diferencias observadas son estadísticamente significativas.

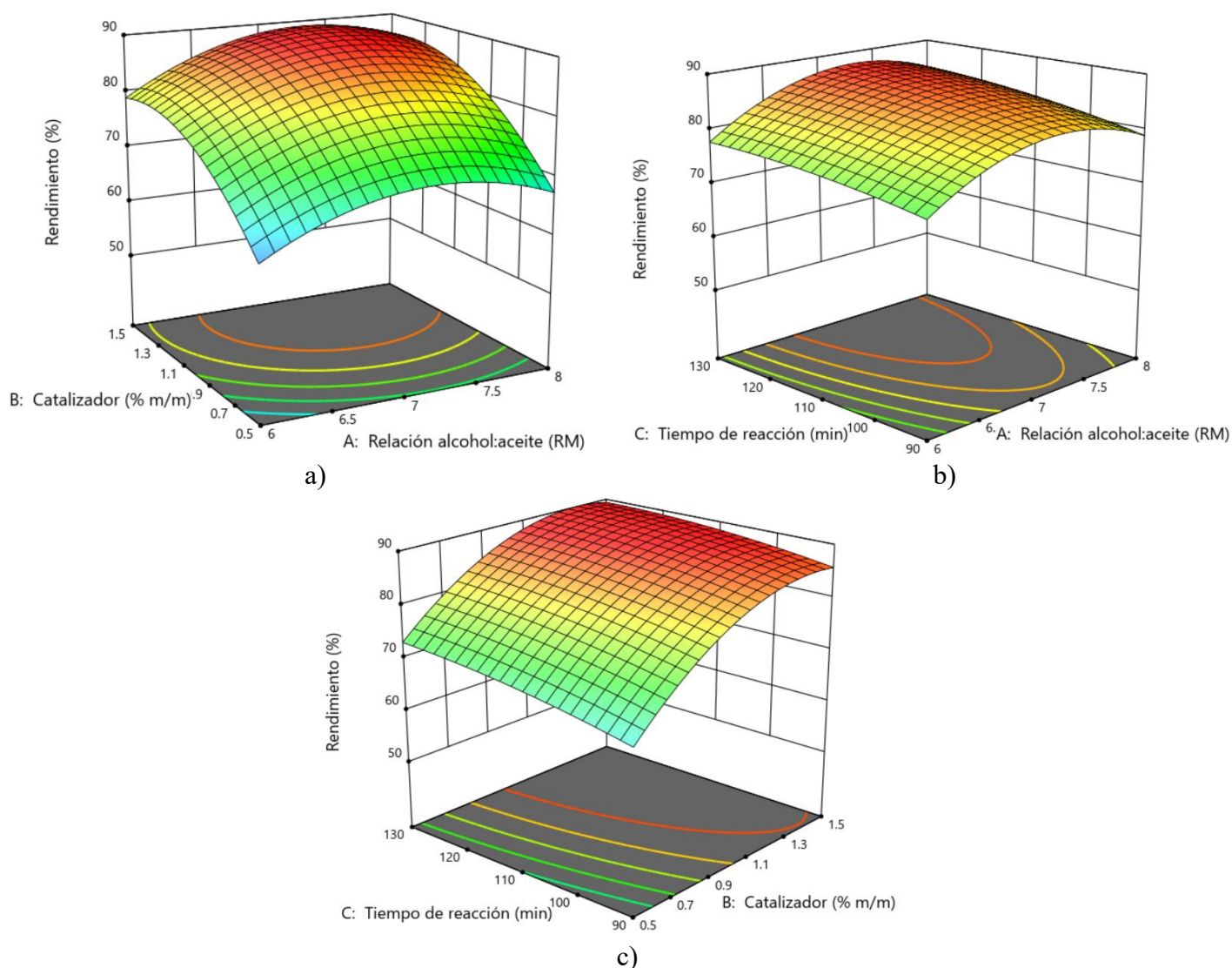
**Cuadro 28.** Modelo cuadrático propuesto para el rendimiento de biodiésel con etanol

Término	Factor	Coefficiente	Valor-p	Significancia (p < 0.1)
A	Relación alcohol:aceite (RM)	+ 82.88	< 0.0001	Muy significativo
B	Catalizador ( % m/m)	+ 61.51	< 0.0001	Muy significativo
C	Tiempo de reacción (min)	+ 0.53	< 0.0001	Muy significativo
AB	Interacción	+ 1.38	0.0274	Significativo
AC	Interacción	+ 0.02	0.0973	Significativo
BC	Interacción	-0.06	0.061	Significativo
A <sup>2</sup>	Término cuadrático	-6.00	< 0.0001	Muy significativo

B <sup>2</sup>	Término cuadrático	-23.78	< 0.0001	Muy significativo
C <sup>2</sup>	Término cuadrático	-0.0024	0.0642	Significativo
Intercepto	---	-289.73	---	---

En el cuadro anterior se muestra el modelo cuadrático propuesto que describe el efecto de los factores experimentales: relación molar alcohol:aceite (RM), concentración de catalizador (%m/m) y tiempo de reacción (min) sobre el rendimiento de biodiésel (%). La ecuación incluye los coeficientes de los términos lineales, interacciones y términos cuadráticos, junto con sus respectivos valores de significancia (valor-p). Se siguió un diseño central compuesto face-centered realizado en Design Expert.

**Figura 23.** Gráficas de superficie de respuesta para el rendimiento de biodiésel con etanol en función de los factores experimentales



La figura presenta tres gráficas de superficie de respuesta en Design Expert que ilustran el efecto de los factores experimentales sobre el rendimiento de biodiésel con etanol: a) relación molar alcohol:aceite (RM) vs concentración de catalizador (% m/m), b) relación

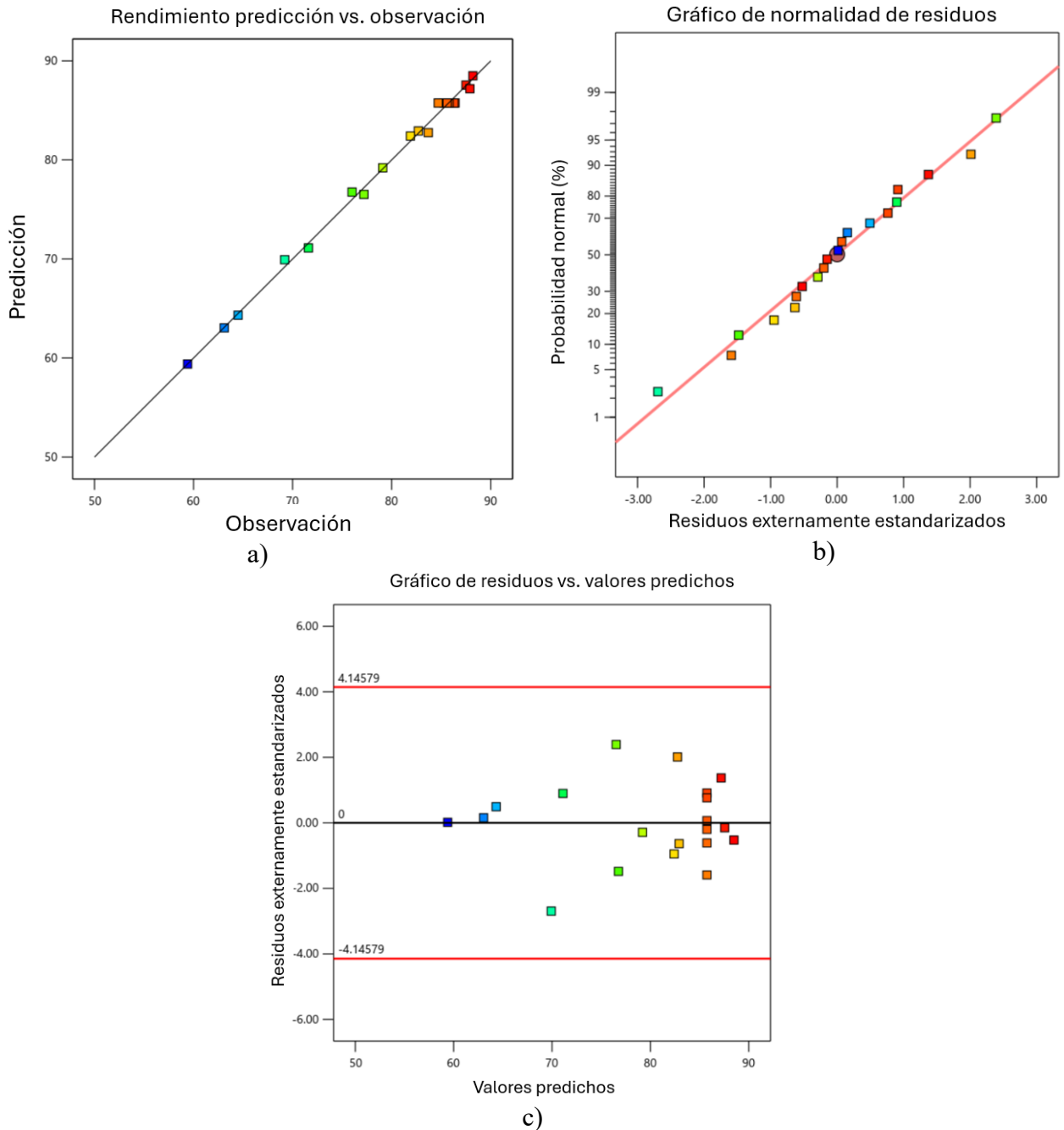
molar alcohol:aceite (RM) vs tiempo de reacción (min) y c) concentración de catalizador (% m/m) vs tiempo de reacción (min). Los colores reflejan los niveles de rendimiento, destacando las zonas rojas con valores cercanos al 90 % y las zonas verdes y amarillas con rendimientos más bajos.

**Cuadro 29.** Evaluación estadística del modelo cuadrático y punto óptimo

<b>Criterio estadístico</b>	<b>Valor</b>
<b>Ajuste del modelo</b>	
Media	79.3
Desviación estándar	0.75
CV (%)	0.95
R <sup>2</sup>	0.9964
R <sup>2</sup> Ajustado	0.9931
R <sup>2</sup> Predicho	0.9758
Relación señal a ruido	54.59
Falta de ajuste	0.267
Valor-p	< 0.0001
<b>Punto óptimo</b>	
Relación alcohol:aceite (RM)	7.2:1
Catalizador (% m/m)	1.29
Tiempo de reacción (min)	126
<b>Validación del punto óptimo</b>	
Media (predicha)	90.3
Media (observada)	90.7
Desviación estándar	0.75
Error estándar de predicción	0.59
Intervalo de confianza al 95 %	[88.97; 91.61]

El cuadro anterior resume los parámetros estadísticos del modelo cuadrático, mostrando el ajuste del modelo, las condiciones del punto óptimo y su validación experimental. Incluye métricas como R<sup>2</sup> ajustado, el coeficiente de variación (CV), señal a ruido y falta de ajuste, además de comparar el rendimiento predicho con el observado para evaluar la precisión y confiabilidad del modelo.

**Figura 24.** Diagnóstico gráfico del modelo cuadrático propuesto



La figura presenta los gráficos de diagnóstico del modelo cuadrático para evaluar su desempeño y cumplimiento de los supuestos estadísticos. El gráfico a) muestra la relación entre los valores predichos y los observados, evidenciando el nivel de ajuste del modelo; el gráfico b) verifica la normalidad de los residuos mediante la alineación de los puntos respecto a la línea diagonal; y el gráfico c) analiza la distribución de los residuos en función de los valores predichos para identificar posibles patrones.

**Cuadro 30.** Caracterización del biodiésel producido con etanol en el punto óptimo del modelo realizado

Análisis	Unidad	Valor ± DE	CV (%)	IC al 95 %	Rango teó.
Prueba 3/27	---	Positiva	---	---	---
pH	---	7	---	---	6.5. 7.5
Número ácido	mg KOH/g BD	0.118 ± 0.012	2.4	[0.111; 0.125]	< 0.5
Ácidos grasos libres	% (ácido oleico)	0.234 ± 0.012	2.4	[0.220; 0.248]	< 0.5
Densidad	g/mL	0.878 ± 0.001	0.3	[0.872; 0.884]	0.85. 0.89
Viscosidad cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	4.85 ± 0.71	3.0	[4.49; 5.22]	3.5. 5.5
Índice de refracción a 40°C	nD	1.45268 ± 0.00001	0.2	[1.445; 1.46036]	1.44700. 1.45800
Humedad	%/g BD	0.06 ± 0.01	25.0	[0.02; 0.1]	< 0.05

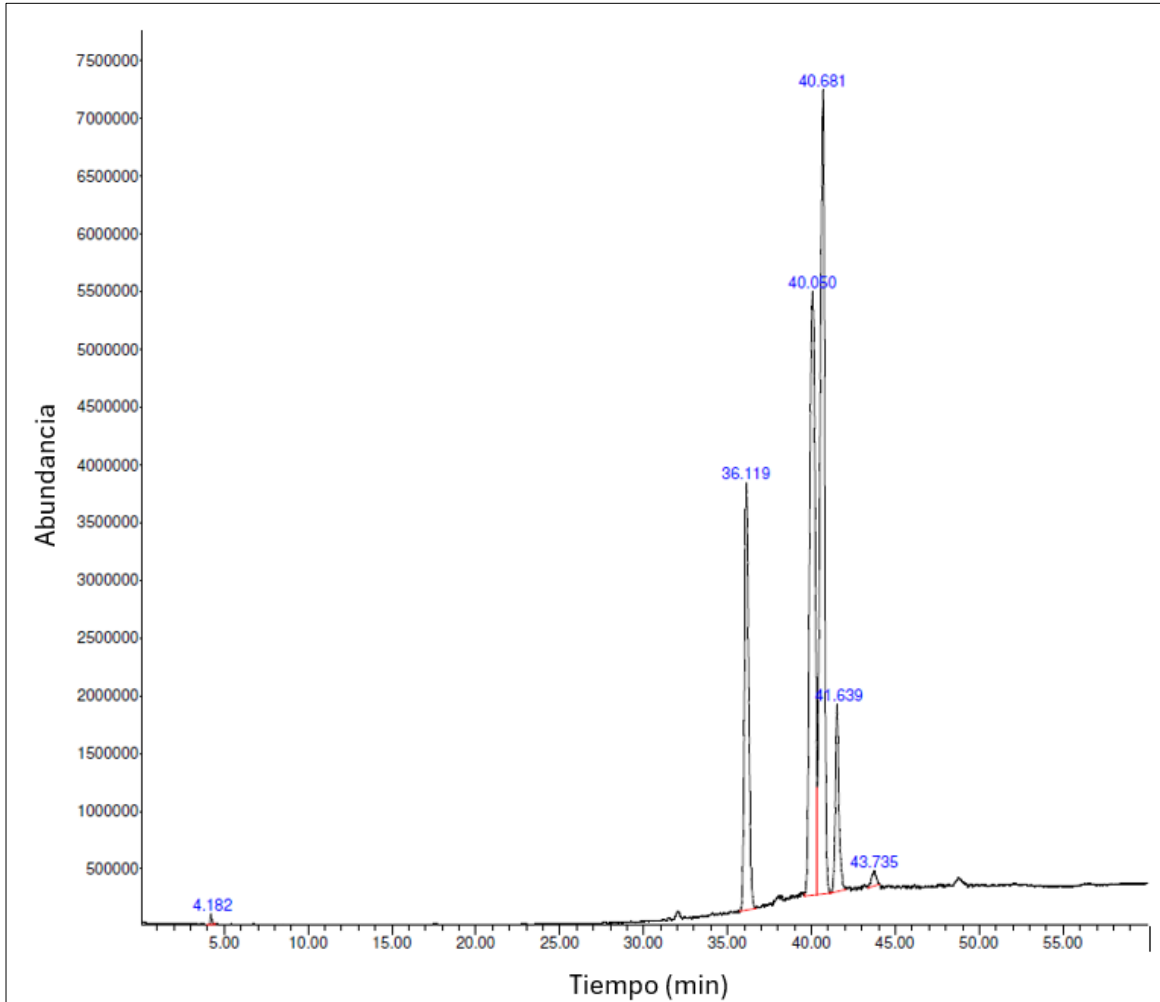
En el cuadro anterior se muestran los resultados del análisis fisicoquímico realizado al biodiésel producido con etanol en el punto óptimo del modelo realizado. Se observan las unidades, desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), intervalos de confianza (IC) al 95 % y rangos de referencia provenientes de la literatura (ver Cuadro 1, Marco teórico).

**Cuadro 31.** Caracterización del biodiésel producido con metanol según el punto experimental 3

Análisis	Unidad	Valor ± DE	CV (%)	IC al 95 %	ASTM D6751
Prueba 3/27	---	Positiva	---	---	---
pH	---	7	---	---	6.5. 7.5
Número ácido	mg KOH/g BD	0.066 ± 0.007	6.7	[0.055; 0.077]	< 0.5
Ácidos grasos libres	% (ácido oleico)	0.131 ± 0.007	6.7	[0.109; 0.153]	< 0.5
Densidad	g/mL	0.869 ± 0.001	0.3	[0.862; 0.876]	0.86. 0.90
Viscosidad cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2.87 ± 0.71	3.3	[2.64; 3.11]	1.9. 6.0
Índice de refracción a 40°C	nD	1.45047 ± 0.00001	0.1	[1.44789; 1.45304]	1.44500. 1.45500
Humedad	%/g BD	0.04 ± 0.01	3.5	[0.04; 0.05]	< 0.05

En el cuadro anterior se muestran los resultados del análisis fisicoquímico realizado al biodiésel producido con metanol según las indicaciones del punto 3 del diseño experimental, similares al punto óptimo del modelo. Se observan las unidades, desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), intervalos de confianza (IC) al 95 % y rangos de referencia provenientes de la norma ASTM D6751 para ésteres metílicos (ver Cuadro 1, Marco teórico).

**Figura 25.** Cromatograma y tabla de tiempos de retención del biodiésel con etanol producido en el punto óptimo del modelo



Compuesto	Tiempo (min)	Área
Heptano	4.181	0.15 %
Hexadecanoato de etilo (C16:0)	18.321	18.68 %
Oleato de etilo (C18:1)	22.482	34.94 %
Linoleato de etilo (C18:2)	24.312	38.49 %
Linolenato de etilo (C18:3)	26.517	7.00 %
Trazas de etoxilados de glicoles	15.487	0.74 %
Total FAEE's	---	99.11 %

El cromatograma presentado muestra los picos correspondientes a los diferentes compuestos presentes en el biodiésel con etanol producido en el punto óptimo del modelo cuadrático. La identificación de picos fue realizada comparando los tiempos de retención con estándares de ésteres etílicos. Este fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

## VIII. DISCUSIÓN

El aceite usado de frituras analizado proviene de la recolección realizada por la Municipalidad de Guatemala, siendo esta el principal proveedor debido al volumen significativo de aceite entregado semanalmente a la Universidad del Valle de Guatemala. Se analizaron 9 lotes de aceite recolectados en diferentes semanas, y se observó una variabilidad mínima entre ellos, con desviaciones estándar menores a 3 % en las propiedades fisicoquímicas entre lotes. Debido a esta baja variabilidad, se seleccionó un lote representativo para llevar a cabo las 20 corridas experimentales de producción de biodiésel con etanol y metanol respectivamente, evitando así que diferencias en la composición inicial del aceite influyan en los resultados del rendimiento.

Los datos presentados en el Cuadro 26 corresponden a este lote seleccionado. El número ácido fue de  $0.428 \pm 0.036$  mg KOH/g, correspondiente a un contenido de ácidos grasos libres (AGL) de  $0.851 \pm 0.036$  %. Estos valores, dentro de los límites establecidos según la literatura (0.0 – 4.0 mg KOH/g para el número ácido y 0.0 – 2.0 % para AGL) (Gupta et al., 2022), indican un aceite con un nivel controlado de degradación, adecuado para evitar la formación excesiva de jabones y facilitar la separación de fases durante el proceso de transesterificación (Bulla et al., 2014), por lo que no fue necesario implementar un pretratamiento químico como la esterificación ácida.

La densidad del aceite fue de  $0.926 \pm 0.001$  g/mL, y su viscosidad cinemática a 40 °C fue de  $43.59 \pm 1.41$  mm<sup>2</sup>/s, ambos dentro de los rangos aceptados (0.860 – 0.950 g/mL y 35.0 – 60.0 mm<sup>2</sup>/s, respectivamente) (Gupta et al., 2022). La densidad refleja la concentración de compuestos disueltos en el aceite y es un indicador indirecto del estado del material (Alfonso, 2013). Si bien el valor está cerca del límite superior, esto no implica un exceso de compuestos oxidados o polímeros, ya que permanece dentro de los márgenes establecidos en la literatura para aceites usados de frituras. De manera similar, el valor obtenido para la viscosidad indica que, pese al uso prolongado del aceite, su fluidez aún permite una buena mezcla con el alcohol durante la reacción de transesterificación, evitando problemas de agitación y transferencia de masa (Alfonso, 2013).

El índice de refracción fue de  $1.46772 \pm 0.00001$  nD con un rango teórico de 1.46000 – 1.48000 (Gupta et al., 2022), presenta un valor característico de aceites vegetales que han sido sometidos a procesos de fritura, pero sin alteraciones drásticas en su composición (Alfonso, 2013). Esto sugiere que los lípidos aún mantienen su estructura principal, lo que es favorable para obtener ésteres metílicos o etílicos de alta calidad durante la reacción.

El contenido de humedad fue de  $0.17 \pm 0.01$  %, muy por debajo del límite máximo permitido (0.60 %) (Gupta et al., 2022), lo que indica que el aceite fue secado de manera apropiada, evitando reacciones secundarias de hidrólisis que podrían elevar el contenido de AGL. La materia polar total fue de  $14.6 \pm 0.1$  %, un valor que evidencia la presencia de compuestos oxidados y productos de descomposición, pero que se mantiene muy por debajo del límite máximo (35.0 %) (Gupta et al., 2022), confirmando la estabilidad del aceite y su uso en la transesterificación.

La selección de las pruebas realizadas para la caracterización del aceite usado de frituras se basó en identificar los principales factores que pueden afectar la eficiencia de la transesterificación, como la presencia de ácidos grasos libres, la estabilidad estructural del aceite y la posible presencia de contaminantes que podrían interferir en la reacción. Aunque existen otras pruebas, como el índice de peróxidos, de yodo y de saponificación, su inclusión no era esencial en este contexto. El índice de peróxidos es relevante para aceites altamente oxidados, pero en este caso, la materia polar total ya reflejaba la presencia de compuestos oxidados. El índice de yodo es útil para evaluar el grado de insaturación de los aceites, pero la conversión a ésteres no se ve afectada directamente por este parámetro. Por otro lado, la información que aporta el índice de saponificación ya fue abordada con el número ácido y el contenido de ácidos grasos libres.

En conjunto, las pruebas aplicadas proporcionaron un análisis integral que permitió confirmar la estabilidad y calidad del aceite sin necesidad de ensayos adicionales. El contenido de humedad y los niveles de AGL indican que el aceite fue recolectado y manejado bajo condiciones adecuadas, como su almacenamiento en recipientes sellados para minimizar la exposición al aire y evitar la oxidación, la filtración previa para remover partículas sólidas y el control de la temperatura para prevenir reacciones no deseadas antes

de su uso en la transesterificación, reduciendo el riesgo de formación de compuestos no deseados.

Asimismo, los resultados obtenidos demuestran que el aceite analizado cumple con los criterios establecidos para ser utilizado como materia prima en la producción de biodiésel. La baja variabilidad de los datos, reflejada en coeficientes de variación inferiores al 6 % en la mayoría de los parámetros, refuerza tanto la fiabilidad de los métodos de análisis como la homogeneidad del material analizado.

De este modo, la estadística descriptiva de la caracterización del aceite usado de frituras permite no solo confirmar su viabilidad, sino también establecer un punto de referencia para monitorear la consistencia de futuros lotes recolectados. Esto garantiza la reproducibilidad del proceso y la calidad del biodiésel producido.

Se llevaron a cabo 20 corridas experimentales con etanol y 20 con metanol, estructuradas bajo un diseño central compuesto face-centered (DCC-FCC) para evaluar el impacto de factores clave en el rendimiento del biodiésel. Este tipo de diseño se eligió porque permite modelar efectos no lineales y cuadráticos, pues incluye puntos centrales y axiales, proporcionando datos precisos para ajustar a un modelo cuadrático completo. Esto es importante en procesos complejos como la transesterificación, donde la relación molar alcohol:aceite, la concentración de catalizador y el tiempo de reacción interactúan de manera no aditiva (Stat-Ease, Inc., 2022).

De esta manera, las 20 corridas realizadas con cada alcohol permitieron evaluar un amplio rango de condiciones de operación y establecer patrones de comportamiento del sistema (ver Figura 23), garantizando un análisis robusto y representativo de los rendimientos obtenidos.

En el Cuadro 27 se presentan los resultados del análisis comparativo de los rendimientos obtenidos durante las 20 corridas experimentales con etanol y metanol, donde se reportan medias de 79.3 % y 90.2 %, siendo el rendimiento en condiciones óptimas según la literatura de 87.0 % y 95.0 % (Alva, 2015), respectivamente. Además, se incluye la desviación estándar y el coeficiente de variación, con valores de 11.4 % para etanol y 4.9 % para metanol, lo que evidencia una mayor dispersión en los resultados obtenidos con

etanol. Para evaluar estadísticamente si las diferencias observadas son significativas, se realizaron pruebas t pareada e independiente.

La prueba t pareada se utilizó para comparar los rendimientos de las corridas emparejando los resultados obtenidos en condiciones similares de operación para cada tipo de alcohol, lo que permite evaluar si las diferencias entre etanol y metanol bajo las mismas condiciones son consistentes. Por otro lado, la prueba t independiente evalúa si los rendimientos promedios de ambos conjuntos de datos son significativamente distintos sin emparejar las corridas, considerando a cada grupo como independiente (Orellana, 2001). Ambas pruebas mostraron valores p inferiores a 0.05 ( $4.23E*10^{-9}$  para la prueba t pareada y  $2.13*10^{-5}$  para la t independiente), lo que indica con un alto grado de confianza estadística que los rendimientos obtenidos con metanol y etanol son diferentes y que esta diferencia es estadísticamente significativa.

Asimismo, por medio de la desviación estándar de 9.1 % y coeficiente de variación de 11.4 %, se observa que las corridas con etanol presentaron una mayor dispersión en comparación con las de metanol. Este comportamiento puede atribuirse a la formación de emulsiones, un fenómeno frecuente en la transesterificación con etanol debido a su alta polaridad y mayor afinidad por el agua (Danane et al., 2022). Las emulsiones complican la separación de fases entre el biodiésel y el glicerol, generando variaciones en la eficiencia del proceso. Por otro lado, el metanol, al tener baja polaridad y menor afinidad por el agua, favorece un proceso de separación de fases más eficiente, reduciendo la variabilidad de los resultados y favoreciendo un rendimiento más estable (Bulla et al., 2014).

Además, el etanol requiere un control más preciso de las condiciones de operación, ya que tiende a necesitar un tiempo de reacción más prolongado para lograr una conversión completa. Este incremento en el tiempo de reacción aumenta el riesgo de pérdidas por evaporación si no se implementan medidas adecuadas de contención (ver sección C, Metodología). Adicionalmente, fue necesario mantener la humedad relativa del laboratorio en un rango controlado de 50 a 55 % mediante el uso de desecantes y deshumidificadores, ya que niveles más altos de humedad, como los de Guatemala, pueden generar que tanto la reacción como los reactivos absorban agua. Esto incrementa la formación de emulsiones,

lo que complica la separación de fases entre el biodiésel y el glicerol, disminuyendo la eficiencia del proceso.

Para mitigar estos efectos, se utilizó ácido acético glacial para neutralizar los restos de catalizador y reducir la alcalinidad del medio. Este ácido fue seleccionado por ser una opción más adecuada frente a otros ácidos, como el clorhídrico y sulfúrico, debido a su pureza, ya que no introduce agua al sistema, lo que ayuda a evitar la formación de emulsiones adicionales. El ácido acético glacial se comercializa generalmente con una pureza del 99.5 %, mientras que el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico pueden encontrarse en concentraciones comerciales variables, desde el 30-37 % en el caso del clorhídrico hasta el 95-98 % para el sulfúrico. Esta diferencia de pureza es relevante, ya que los ácidos con menor concentración de soluto tienen una mayor cantidad de agua, lo que puede promover la formación de emulsiones no deseadas. Además, su punto de ebullición relativamente bajo (118 °C) (Lárez, 2017) facilita su eliminación durante el secado. Al ser un ácido débil, también minimiza el riesgo de afectar negativamente las propiedades del biodiésel durante el proceso de neutralización. Sin embargo, su costo es más elevado en comparación con los otros ácidos mencionados, como se detalla en el Cuadro 88 (ver Sección Costo de Reactivos), lo que representa un desafío económico para la producción a gran escala.

Asimismo, la adición de cloruro de sodio durante el lavado funcionó como un agente rompedor de emulsiones, desestabilizando las fases y facilitando la separación del biodiésel y el glicerol. Su elección se basó en su alta disponibilidad y bajo costo relativo a otros agentes desestabilizantes como el sulfato o fosfato de sodio (Meher et al., 2006). Estas medidas permitieron mejorar el proceso, reduciendo la formación de emulsiones y mejorando la calidad del biodiésel producido.

Aunque el etanol muestra un menor rendimiento y una mayor variabilidad, es importante considerar su viabilidad en términos de disponibilidad y sostenibilidad. Este análisis reafirma la necesidad de optimizar las condiciones de reacción al trabajar con etanol, como el tiempo de reacción y la relación molar alcohol:aceite, para mitigar los efectos negativos y mejorar la eficiencia global del proceso.

Por esta razón, se desarrolló un modelo cuadrático para describir y predecir el comportamiento del rendimiento de biodiésel en función de los principales factores

experimentales: la relación molar alcohol:aceite (RM), la concentración de catalizador y el tiempo de reacción. En el Cuadro 28, se presenta la ecuación que define el modelo obtenido, en la que cada coeficiente refleja el efecto de los términos lineales, cuadráticos e interacciones sobre el rendimiento.

La elección de estos tres factores responde a su influencia comprobada en la literatura sobre la eficiencia de la reacción de transesterificación, así como la preferencia por englobar aspectos tanto termodinámicos como cinéticos (Alva, 2015). La relación molar contribuye a desplazar el equilibrio hacia la formación de ésteres, aumentando la conversión de triglicéridos en biodiésel. Sin embargo, un exceso de alcohol puede diluir la mezcla y dificultar la separación de las fases. La concentración de catalizador influye directamente en la velocidad de la reacción, ya que una cantidad insuficiente podría resultar en conversiones incompletas, mientras que un exceso podría favorecer la formación de jabones y emulsiones. Por otro lado, el tiempo de reacción es crucial para asegurar una conversión completa sin favorecer la degradación térmica del producto ni incrementar las pérdidas por evaporación (Alva, 2015).

Asimismo, en la literatura se han estudiado otras combinaciones de variables que incluyen adicionalmente la temperatura de reacción, la velocidad de agitación y el tipo de agente de lavado, pues también influyen en la eficiencia del proceso (Danane et al., 2022). Sin embargo, la combinación de relación molar, concentración de catalizador y tiempo de reacción no ha sido ampliamente explorada en el contexto específico del uso de etanol en la producción de biodiésel, por lo que resultaba relevante en este estudio evaluar la interacción entre tres de los factores más determinantes del proceso.

Los términos incluidos en el modelo cuadrático muestran diferencias en su nivel de significancia estadística, evaluadas mediante un análisis de varianza (ANOVA). Este permite descomponer la variabilidad total en componentes atribuibles a los factores experimentales y al error aleatorio, estableciendo la relevancia de cada término mediante sus valores-p. Por ejemplo, los términos lineales asociados a la relación molar (A), la concentración de catalizador (B) y el tiempo de reacción (C) son altamente significativos, con valores-p inferiores a 0.0001, lo que indica que su influencia sobre el rendimiento es estadísticamente robusta.

Los términos cuadráticos  $A^2$ ,  $B^2$  y  $C^2$  también muestran significancia estadística con valores-p menores a 0.0001, lo que evidencia la curvatura en la respuesta del modelo. Este comportamiento sugiere que la relación entre los factores y el rendimiento no es lineal, sino que presenta un máximo en el punto óptimo identificado. En contraste, las interacciones entre los factores, como la combinación entre la relación molar y el catalizador (AB), presentan un nivel de significancia menor ( $p = 0.0274$ ), aunque todavía relevante al estar por debajo del umbral de 0.1. Esto indica que ciertos efectos combinados pueden ser importantes, pero su impacto es más sutil en comparación con los efectos individuales de los factores.

Para evaluar la calidad del modelo, se utilizaron distintos indicadores estadísticos. El Cuadro 29 muestra un  $R^2$  ajustado de 0.9931 y un  $R^2$  predicho de 0.9758, con una diferencia menor a 0.2, lo que indica que el modelo es preciso y no está sobre ajustado. El  $R^2$  ajustado mide qué tan bien el modelo se ajusta a los datos considerando la cantidad de términos incluidos, mientras que el  $R^2$  predicho evalúa su capacidad de hacer predicciones con datos nuevos (Stat-Ease, Inc., 2022). La proximidad entre ambos valores asegura que el modelo es generalizable y puede utilizarse para predecir el rendimiento en condiciones similares. Por otro lado, la relación señal a ruido fue de 54.6, un valor muy superior al mínimo recomendado de 4, lo que confirma que el modelo es robusto y capaz de navegar el espacio de diseño de manera precisa. Además, el valor-p de la falta de ajuste fue de 0.2669, por encima del umbral de 0.1, lo que respalda que no hay evidencia de un ajuste inadecuado del modelo (Stat-Ease, Inc., 2022).

Los gráficos de diagnóstico, presentados en la Figura 24, permiten validar visualmente los supuestos estadísticos del modelo. El gráfico a) muestra la relación entre los valores observados y los predichos, evidenciando puntos cercanos a la línea diagonal, lo que confirma un ajuste adecuado y una alta capacidad predictiva. El gráfico b) corresponde al análisis de normalidad de los residuos; la alineación de los puntos respecto a la línea diagonal indica que los residuos siguen una distribución normal, cumpliendo con los supuestos del análisis de varianza. El gráfico c) evalúa la homogeneidad de la varianza mediante la distribución de los residuos frente a los valores predichos; la ausencia de

patrones visibles refuerza la validez del modelo al demostrar que los errores son aleatorios y tienen varianza constante.

Asimismo, las gráficas de superficies de respuesta en 3D, representadas en la Figura 23 proporcionan una representación visual del comportamiento del rendimiento en función de los factores experimentales. La gráfica a) muestra cómo el rendimiento varía en función de la relación molar y la concentración de catalizador, manteniendo constante el tiempo de reacción. Se observa que el rendimiento aumenta a medida que ambos factores se incrementan, alcanzando valores máximos en una relación molar cercana a 7:1 y una concentración de catalizador de aproximadamente 1.2 %. A partir de este punto, el rendimiento comienza a disminuir, lo que puede atribuirse a la saturación de los sitios activos del catalizador y al exceso de alcohol, lo que puede diluir la mezcla y generar subproductos no deseados. La gráfica b) evalúa la interacción entre la relación molar y el tiempo de reacción, mostrando un aumento progresivo en el rendimiento a medida que se prolonga el tiempo de reacción hasta los 126 minutos. Sin embargo, tiempos superiores podrían aumentar las probabilidades de degradación térmica del biodiésel o incrementar las pérdidas por evaporación, sin un aumento significativo del rendimiento. Por otro lado, la gráfica c) muestra la relación entre la concentración de catalizador y el tiempo de reacción, destacando que el rendimiento se ve beneficiado por niveles de catalizador superiores al 1 %, pero sin superar el 1.5 %, para evitar la formación de jabones y emulsiones que puedan interferir en la separación de fases.

El modelo propone como condiciones óptimas una relación molar alcohol:aceite de 7.2:1, una concentración de catalizador de 1.2 % y un tiempo de reacción de 126 minutos, condiciones bajo las cuales se predice un rendimiento del 90.3 %. Para validar esta predicción, se realizaron tres corridas experimentales adicionales, obteniendo un rendimiento promedio de 89.7 %, con un margen de error de predicción de 0.7 %, lo que demuestra la precisión y confiabilidad del modelo cuadrático propuesto. El rendimiento obtenido con el modelo supera de manera significativa el promedio obtenido de las 20 corridas iniciales realizadas con etanol (79.3 %, ver Cuadro 27), reflejando un incremento notable en la eficiencia del proceso al implementar las condiciones óptimas propuestas por el modelo. Estos resultados resaltan la importancia de optimizar las condiciones de

operación al trabajar con etanol, un reactivo cuya complejidad requiere un mayor control de las variables críticas para mitigar la formación de emulsiones y garantizar un rendimiento estable.

Asimismo, los Cuadros 30 y 31 presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica del biodiésel producido con etanol en el punto óptimo propuesto por el modelo y con metanol en condiciones experimentales similares. En términos generales, ambos biodiésels cumplen con los límites establecidos por la norma ASTM D6751, lo que evidencia la viabilidad de ambos alcoholes como reactivos para la transesterificación.

Si bien la norma ASTM D6751 fue diseñada específicamente para biodiésel compuesto por ésteres metílicos, su aplicación en este estudio resulta válida debido a la ausencia de una normativa específica para ésteres etílicos y a la naturaleza de los análisis realizados. Es decir, en este estudio, la caracterización del biodiésel se centró en propiedades fisicoquímicas como densidad, viscosidad, contenido de humedad, número ácido y estabilidad oxidativa, parámetros que son relevantes independientemente del tipo de éster presente. Sin embargo, algunas propiedades dependen no solo de estos factores, sino también de la estructura química de los ésteres presentes en la mezcla. En particular, la viscosidad es una de las variables más afectadas por la naturaleza de los ésteres, ya que la presencia del grupo etilo en los ésteres etílicos incrementa la interacción intermolecular, aumentando la resistencia al flujo. Por esta razón, los valores de referencia para la viscosidad fueron adaptados a partir de datos reportados en la literatura, asegurando una evaluación más precisa del biodiésel producido con etanol (Larosa, 2005).

En este contexto, los parámetros de densidad y viscosidad presentan ligeras variaciones respecto a los valores establecidos para biodiésel con metanol, lo que se explica por las diferencias estructurales entre los ésteres metílicos y los ésteres etílicos. La viscosidad del biodiésel con etanol fue de  $4.85 \pm 0.71 \text{ mm}^2/\text{s}$ , un valor ligeramente superior al biodiésel con metanol de  $3.87 \pm 0.11 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Este resultado es consistente con la literatura ( $3.5 - 5.5 \text{ mm}^2/\text{s}$  para el etanol y  $1.9 - 6.0 \text{ mm}^2/\text{s}$  para el metanol) (ASTM International, 2024), ya que los ésteres etílicos suelen presentar viscosidades más altas debido a la presencia del grupo etílico, que incrementa la interacción intermolecular y la resistencia al

flujo. Sin embargo, ambos valores se encuentran dentro de los rangos aceptados para ésteres etílicos y aseguran una adecuada atomización y combustión en los motores diésel.

Por otro lado, el contenido de humedad también refleja diferencias relevantes. El biodiésel con etanol presentó un valor de  $0.06 \pm 0.01$  %, ligeramente superior al límite recomendado de 0.05 % (ASTM International, 2024), mientras que el biodiésel con metanol mostró un contenido de  $0.04 \pm 0.01$  %. Esta diferencia se atribuye a la afinidad del etanol por el agua, y evidencia que el secado de biodiésel con etanol requiere un control más estricto de las condiciones de operación para evitar la acumulación de humedad. Este factor es importante para la estabilidad del biodiésel, ya que un exceso de humedad puede generar la formación de emulsiones y favorecer la oxidación del producto durante su almacenamiento (Lam et al., 2010).

El número ácido del biodiésel producido con etanol fue de  $0.118 \pm 0.012$  mg KOH/g, mientras que el biodiésel con metanol presentó un valor de  $0.066 \pm 0.007$  mg KOH/g, ambos dentro del límite recomendado de 0.5 mg KOH/g (ASTM International, 2024). La mayor acidez observada en el biodiésel con etanol puede atribuirse a una mayor presencia de ácidos grasos libres (AGL) reflejada en un valor de  $0.234 \pm 0.012$  % frente al  $0.131 \pm 0.007$  % para metanol. Este comportamiento es consistente con la tendencia del etanol a formar emulsiones durante la reacción y el lavado, prolongando el contacto del biodiésel con trazas de agua y favoreciendo una hidrólisis parcial de los ésteres durante el secado. Esto resulta en un aumento de la concentración de ácidos grasos libres.

La prueba 3/27 confirmó la ausencia de triglicéridos residuales en ambos biodiésel, al disolverse completamente el biodiésel en el solvente. Cabe destacar que, mientras que esta prueba se realiza comúnmente con metanol como disolvente para evaluar ésteres metílicos, en este estudio se utilizó acetona como alternativa para evaluar los ésteres etílicos. La elección de acetona en lugar de hexano, como indica la literatura (Danane et al., 2022), se fundamentó en su menor toxicidad, mayor disponibilidad y menor costo, garantizando una evaluación precisa y segura de la conversión (NIOSH, 2020). Esta modificación metodológica resultó efectiva a pesar de no encontrarse en la literatura, ya que la prueba confirmó la pureza del biodiésel y la completa conversión de los triglicéridos iniciales.

Es importante señalar que se utilizó la misma relación de prueba para los ésteres metílicos y etílicos debido a que ambos tipos de biodiésel presentan solubilidad adecuada en su respectivo solvente (Basque Research, 2014). Los ésteres metílicos son completamente solubles en metanol, mientras que los ésteres etílicos muestran una solubilidad equivalente en acetona, lo que permite que la prueba se mantenga bajo las mismas condiciones de relación disolvente:biodiésel sin afectar su capacidad para detectar la presencia de triglicéridos residuales. De este modo, el mantenimiento de la misma relación asegura la comparabilidad entre ambas muestras y garantiza que los resultados reflejen de manera precisa la conversión de los triglicéridos en biodiésel, independientemente del alcohol utilizado en la transesterificación.

El análisis de pH, con un valor cercano a 7 para ambos biodiéseles, reafirma la efectividad del proceso de lavado y neutralización para eliminar los residuos alcalinos del catalizador. Un pH adecuado es fundamental para prevenir la degradación del biodiésel y asegurar su estabilidad durante el almacenamiento, evitando la formación de depósitos o reacciones de autooxidación.

La Figura 25 presenta el cromatograma correspondiente al biodiésel producido con etanol bajo las condiciones óptimas definidas por el modelo de superficie de respuesta. Los resultados obtenidos muestran un contenido total de ésteres etílicos de ácidos grasos del 99.11 %, superando el valor mínimo de 96.5 % establecido por la normativa ASTM D6751. Aunque esta normativa está diseñada para ésteres metílicos de ácidos grasos, se utilizó como referencia ante la ausencia de una norma específica para ésteres etílicos, ajustando la interpretación de los resultados en función de la literatura científica. En este caso, la cromatografía de gases utilizada permitió la identificación y cuantificación de los ésteres etílicos debido a que su comportamiento cromatográfico es similar al de los ésteres metílicos, con tiempos de retención ligeramente desplazados debido a la mayor masa molecular del grupo etilo. Este alto porcentaje de conversión evidencia una transformación eficiente de los triglicéridos en biodiésel y la minimización de subproductos residuales, como monoglicéridos y diglicéridos.

El análisis también revela una composición balanceada de los principales ésteres, destacándose el oleato de etilo (C18:1) con un 34.94 %, seguido del linoleato de etilo

(C18:2) con un 38.49 %, lo que otorga al biodiésel propiedades favorables en cuanto a estabilidad oxidativa y fluidez. La identificación de estos compuestos mediante cromatografía se realizó con estándares de referencia para ésteres etílicos, asegurando que la cuantificación refleje con precisión la composición del biodiésel producido. Estos resultados confirman la viabilidad de las condiciones óptimas establecidas por el modelo, tanto en términos de rendimiento como de calidad del producto final. Además, la baja presencia de impurezas (0.74 %) sugiere un proceso de purificación efectivo, donde la adición del agente de lavado y el control de la humedad desempeñaron un papel importante en la obtención de biodiésel con etanol limpio y de alta pureza.

Por otro lado, el análisis costo-beneficio realizado en este estudio permite comparar el uso de etanol y metanol en la producción de biodiésel, considerando aspectos económicos, técnicos, de seguridad y ambientales. Como se observa en el Cuadro 88, el metanol presenta un menor costo en comparación con el etanol, debido a su disponibilidad en el mercado internacional a precios competitivos. Por el contrario, el etanol, al ser producido localmente a partir de melaza, representa una opción más accesible para fomentar la economía circular y reducir la dependencia de las importaciones.

Desde una perspectiva económica, la producción de biodiésel utilizando etanol tiene un costo total superior en comparación con la producción con metanol, como se detalla en el Cuadro 89. La principal razón de esta diferencia radica en que el etanol es significativamente más costoso que el metanol, lo que incrementa el costo de los insumos necesarios para la reacción de transesterificación. Además, la reacción con etanol tiende a generar emulsiones, lo que dificulta la separación de fases y requiere el uso de reactivos adicionales, como ácido acético glacial y cloruro de sodio, aumentando aún más los costos de producción. Otro factor relevante en esta diferencia es el consumo energético, ya que el proceso con etanol requiere un mayor tiempo de reacción y, por ende, calentamiento en comparación con el metanol, lo que se traduce en un mayor gasto en electricidad y un costo operativo más alto.

Desde el punto de vista técnico, el metanol presenta una mayor eficiencia en la reacción de transesterificación, debido a su alta reactividad y menor peso molecular, lo que facilita una conversión más rápida y una mejor separación de fases. Como resultado, la

producción de biodiésel con metanol requiere menos insumos auxiliares y menos tiempo de procesamiento, lo que contribuye a reducir los costos operativos. Sin embargo, esta ventaja técnica se ve contrarrestada por los riesgos asociados a su uso, ya que el metanol es altamente tóxico y puede ser absorbido por la piel o inhalado, representando un riesgo significativo para la salud si no se emplean las medidas de seguridad adecuadas. En contraste, el etanol es menos tóxico y menos inflamable, lo que lo convierte en una opción más segura para su manipulación en entornos de producción.

El impacto ambiental es otro factor clave en la selección del reactivo adecuado para la producción de biodiésel. Como se muestra en el Cuadro 90, el etanol presenta ventajas en términos de sostenibilidad, ya que es un biocombustible renovable que puede obtenerse a partir de biomasa, como la caña de azúcar o el maíz. Por el contrario, el metanol se produce mayormente a partir de fuentes fósiles, lo que implica una mayor huella de carbono en su producción. En este sentido, el uso de etanol en la producción de biodiésel puede representar una estrategia para reducir el impacto ambiental del proceso y mejorar su sostenibilidad a largo plazo.

A pesar de sus beneficios en términos de seguridad y sostenibilidad, el análisis costo-beneficio indica que el etanol solo sería una opción económicamente viable si se redujeran sus costos mediante estrategias específicas. Una de ellas sería la compra de etanol a través de convenios directos con productores locales para obtener precios más competitivos, reduciendo así el costo del insumo principal. Otra alternativa sería la implementación de sistemas de recuperación y reutilización de reactivos en el proceso de producción, disminuyendo el consumo de insumos como el ácido acético y el cloruro de sodio. Asimismo, se podrían explorar métodos de purificación menos costosos o estrategias de producción que permitan reducir el tiempo de reacción y, por ende, el consumo energético. Finalmente, el acceso a incentivos fiscales o subsidios que promuevan el uso de etanol en lugar del metanol podría contribuir significativamente a mejorar la viabilidad económica del proceso, permitiendo que los beneficios ambientales y de seguridad compensen su mayor costo.

Por ende, el análisis costo-beneficio evidencia que la elección entre etanol y metanol para la producción de biodiésel depende de un equilibrio entre costo, eficiencia técnica y

beneficios ambientales. Mientras que el metanol se destaca como la opción más rentable y eficiente debido a su menor costo y facilidad de separación de fases, el etanol representa una alternativa más sostenible y segura, cuyo potencial dependerá de la implementación de estrategias que permitan reducir sus costos sin comprometer sus ventajas ambientales y de seguridad.

## IX. CONCLUSIONES

- Se determinó que el aceite recolectado por la Municipalidad de Guatemala presenta características consistentes para la producción de biodiésel. Los análisis de nueve lotes mostraron una baja variabilidad, con desviaciones estándar inferiores al 3 % para la mayoría de los parámetros. El aceite seleccionado presentó valores dentro de los límites establecidos, destacándose un número ácido de  $0.428 \pm 0.036$  mg KOH/g y un contenido de ácidos grasos libres (AGL) de  $0.851 \pm 0.036$  %, lo que indica un nivel controlado de degradación. La densidad y viscosidad también se mantuvieron en rangos adecuados, evidenciando la viabilidad del material como materia prima sin necesidad de pretratamiento.
- Ambos biodiésels cumplieron con los estándares de calidad de la norma ASTM D6751, adaptada en el caso del biodiésel con etanol por sus características particulares. Se observó que el biodiésel con etanol presentó una mayor viscosidad ( $4.85 \pm 0.71$  mm<sup>2</sup>/s frente a  $3.87 \pm 0.11$  mm<sup>2</sup>/s con metanol) y un contenido de humedad ligeramente superior ( $0.06 \pm 0.01$  % frente a  $0.04 \pm 0.01$  %). El análisis de número ácido reflejó un valor de  $0.118 \pm 0.012$  mg KOH/g para el biodiésel con etanol, superior al de metanol ( $0.066 \pm 0.007$  mg KOH/g), consistente con la tendencia del etanol a formar emulsiones y a retener humedad durante el proceso.
- Los rendimientos promedio de biodiésel obtenidos en las 20 corridas experimentales fueron de 79.3 % para etanol y 90.2 % para metanol, confirmando una mayor eficiencia del metanol en la transesterificación. Las pruebas t realizadas mostraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos procesos, con valores de p inferiores a 0.05 en las pruebas pareada e independiente, lo que confirma que las diferencias en los rendimientos son consistentes y significativas. Esto evidencia la necesidad de optimizar las condiciones operativas al trabajar con etanol para reducir la variabilidad y mejorar los rendimientos obtenidos.

- El modelo cuadrático desarrollado predijo un rendimiento óptimo del 90.3 % con etanol bajo condiciones ajustadas de relación molar (7.2:1), concentración de catalizador (1.2 %) y tiempo de reacción (126 minutos). La validación experimental mostró un rendimiento promedio de 89.7 %, con un margen de error del 0.7 %, demostrando la precisión y confiabilidad del modelo. Además, el uso de ácido acético glacial y cloruro de sodio como agente rompedor de emulsiones mejoró la separación de fases y redujo la formación de jabones. La implementación de un control de humedad en el laboratorio (50 -55 %) también resultó clave para evitar la absorción de agua por el etanol y reducir la formación de emulsiones. La prueba 3/27, adaptada con acetona como solvente en lugar de hexano o metanol, confirmó la ausencia de triglicéridos residuales y evidenció la pureza del biodiésel con un contenido de ésteres etílicos del 99.11 %.

## X. RECOMENDACIONES

- Incorporar un sistema de recuperación de etanol complementario al proceso para evitar pérdidas por evaporación. De esta manera, el etanol recuperado puede reutilizarse en futuras corridas experimentales, mejorando su uso y reduciendo costos.
- Utilizar aceites usados de frituras más degradados, con un número ácido superior a 4 mg KOH/g y un contenido de AGL mayor al 2 % para evaluar la necesidad de un pretratamiento mediante esterificación antes de la transesterificación. Esto permite definir la viabilidad del proceso con diferentes calidades de materia prima y ampliar el rango de aceites aprovechables para la producción de biodiésel.
- Evaluar el uso de diferentes catalizadores homogéneos ácidos, heterogéneos y enzimáticos para mejorar la reacción de transesterificación con etanol. Estos catalizadores requieren mayores tiempos de reacción, pero ofrecen ventajas como una separación más sencilla de fases o posibilidad de reutilización, pudiendo reducir costos o simplificar el proceso global.
- Escalar el proceso en un reactor continuo a nivel de laboratorio para evaluar el comportamiento del sistema en operaciones prolongadas y con mayores volúmenes de producción. Esto incluye la evaluación de la estabilidad de las condiciones óptimas del modelo, la reproducibilidad de los rendimientos y la eficiencia del consumo de reactivo.
- Realizar un estudio sobre las condiciones óptimas de almacenamiento para el biodiésel producido con etanol, evaluando el uso de recipientes herméticos, desecantes y establecer tiempos máximos antes de su uso, para que conserve sus propiedades fisicoquímicas dentro de los estándares requeridos durante su vida útil.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Internacional de Energía IEA. (2021). *Key World Energy Statistics 2021*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>
- Agencia Internacional de Energía IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*. Paris: CC BY 4.0 (reporte); CC BY NC SA 4.0 (Anexo A). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Alaiz, R. A. (2018). *¿Qué son los triglicéridos?* <https://clinidiabet.com/es/infodiabetes/cardiodiabetes/15.htm>
- Alfonso, J. A. (2013). *Obtención de biodiésel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio*. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/349/1/Tesis%20Juan%20Antonio%20Alfonso%20Alvarez.pdf>
- Alva, M. (2015). *Estudio comparativo de los biodiesel, obtenidos a partir de metanol y etanol y su adaptación a escala piloto*. Universidad Nacional de Trujillo, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química. Trujillo: Repositorio UNT. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/1833>
- Anderson, M. J. (2016). *DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation*. CRC Press.
- Arnol, F. (2020). *Producción de biodiesel: Reacción de transesterificación*. <https://slideplayer.es/slide/16108724/>
- ASTM International. (2024). *Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels (ASTM D6751)*. <https://www.astm.org/standards/d6751>
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M., Masjuki, H. H. y Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070-2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>
- Atadashi, I. (17 de marzo de 2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>
- Baccaro, J. R. (2007). *Evaluación de rendimiento de biodiesel elaborado a partir de aceite de palma africana (elaeis guineensis) y etanol anhidro de caña de azúcar (saccharum officinarum)*. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Zamorano: Repositorio Zamorano.

<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/f2b73ee4-3232-41f2-a8e7-2508331e9116/content>

- Basha, S. A., Gopal, K. R. y Jebaraj, S. (2009). A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6), 1628-1634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.031>
- Basque Research. (2014). *Ethanol and heterogeneous catalysts for biodiesel production*. <https://www.sciencedaily.com/releases/2014/11/141112084246.htm>
- Bombón, H. (2021). Evaluación de la degradación de aceites vegetales durante el proceso de fritura. *Revista de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 15(2), 123-130. <https://doi.org/10.1234/rcta.v15i2.5678>
- Borgogno, F. (2010). *Compendio de propiedades - Tabla de Entalpía de Formación, Energía Libre de Gibbs y Entropía de Formación de Compuestos Inorgánicos*. <https://drjvazque.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/03/tabla-termoquimica-4.pdf>
- BP. (2022). *Statistical Review of World Energy*. 70th Edition. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html>
- Bustán, L. (2022). *Obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal reciclado mediante transesterificación aplicando NaOH o KOH como catalizadores*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/f268ef93-6ff9-4eed-9f3d-eadb2e8c7989>
- Bulla, E., Guerrero, C. y Sierra, F. (2014, diciembre 1). Producción de biodiésel por etanolisis utilizando aceites de fritura de hoteles y su uso en calderas pirotubulares. *Iteckne*, 12(1), 44-53. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-17982015000100006&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-17982015000100006&script=sci_abstract&tlng=es)
- Chiu, H.-H. y Kuo, C.-H. (2019). Gas chromatography-mass spectrometry-based analytical strategies for fatty acid analysis in biological samples. *Journal of Food and Drug Analysis*, 28(1). <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2019.10.003>
- CNEE. (2024). *Compendio Estadístico del Sector Eléctrico de Guatemala*. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. [https://www.cnee.gob.gt/xhtml/informacion/Docs/Compendio\\_Estadistico\\_2024.pdf](https://www.cnee.gob.gt/xhtml/informacion/Docs/Compendio_Estadistico_2024.pdf)
- Danane, F., Bessah, R. y Alloune, R. (2022). Experimental optimization of Waste Cooking Oil ethanolysis for biodiesel production using Response Surface Methodology (RSM). *Science and Technology for Energy Transition*, 77(14), 10. <https://doi.org/10.2516/stet/2022014>
- Deguate. (2015). *Aceites y grasas en Guatemala*. <https://deguate.com.gt/guatemala/alimentos-y-bebidas/aceites-y-grasas.php>

- Demirbas, A. (2009). *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Springer Science and Business Media.
- Dey, S., Reang, N., Das, P. y Deb, M. (2021). A comprehensive study on prospects of economy, environment, and efficiency of palm oil biodiesel as a renewable fuel. *Journal of Cleaner Production*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620350253>
- Durazo, R. (2016). *Propagación del error*. <http://rdurazo.ens.uabc.mx/educacion/labfis/sesion2.pdf>
- Encinar, J. M., González, J. F. y Rodríguez-Reinares, A. (2007). Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. *Fuel Processing Technology*, 88(7), 513-522. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.002>
- ESHE. (2021). *¿Qué son los triglicéridos y por qué son tan importantes?* <https://www.esheformacion.com/blog/52/que-son-los-trigliceridos-y-por-que-son-tan-importantes>
- European Committee for Standardization. (2018). *Automotive Fuels - Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for Diesel Engines - Requirements and Test Methods (EN 14214)*. <https://www.crownoil.co.uk/fuel-specifications/bs-14214/>
- Farobie, O. y Yukihiko, M. (14 de mayo de 2015). A comparative study of biodiesel production using methanol, ethanol, and tert-butyl methyl ether (MTBE) under supercritical conditions. *Biosource Technology*, 191, 306 - 311. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.102>
- Felder, R. M. (2005). *Elementary Principles of Chemical Processes* (3 ed.). Wiley.
- Fundación Mapfre. (2010). *Evaluación de la contaminación del aire por combustión de biodiésel*. <https://app.mapfre.com/ccm/content/documentos/fundacion/prevma/proyecto/evaluacion-contaminacion-del-aire-por-combustion-biodiesel-2010.pdf>
- Gnanaprakasam, A., Sivakumar, V., Surendhar, A., Thirumarimurugan, M. y Kannadasan, T. (2013, abril 22). Recent Strategy of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil and Process Influencing Parameters: A Review. *Journal of Energy*, 15(2), 10. <https://doi.org/10.1155/2013/926392>
- Gupta, A., Das, N. y Kumar, Z. (2022). Investigation of physico-chemical properties of edible oils during frying with special reference to in vitro lipid peroxidation as TBARS. *Journal of Current Research in Food Science*, 3(2), 117-119. [www.foodresearchjournal.com](http://www.foodresearchjournal.com)
- Helwani, Z., Othman, M. R., Aziz, N., Kim, J. y Fernando, W. J. (2009). Solid heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides with methanol: A

- review. *Applied Catalysis A: General*, 363(2), 1-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.05.021>
- IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report: Climate Change 2021*.  
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IRENA. (2021). *Renewable energy statistics 2021: Waste cooking oil as a biodiesel feedstock*. <https://www.irena.org/>
- IRENA. (2022). *Renewable Energy Statistics*. (International Renewable Energy Agency)
- Jesús, L. B. (2011). *Plan estratégico de producción para consumo propio en una industria azucarera guatemalteca*.  
<https://www.repositorio.usac.edu.gt/5282/1/BYRON%20DE%20JES%C3%9AS%20L%C3%93PEZ%20MALDONADO.pdf>
- Karki, S., Sanjel, N., Poudel, J., Choi, J. H. y Oh, S. C. (2017). Supercritical Transesterification of Waste Vegetable Oil: Characteristic Comparison of Ethanol and Methanol as Solvents. *Applied Sciences*, 7(6), 13.  
<https://doi.org/10.3390/app7060632>
- Knothe, G., Van Gerpen, J. y Krahl, J. (2005). *The Biodiesel Handbook*. Champaign, IL: AOCS Press.
- La Torre. (2023). *Aceites vegetales disponibles en supermercados La Torre*.  
<https://www.latorre.com.gt/abarrotes/aceites/aceite-vegetal>
- Lam, M. K., Lee, K. T. y Mohamed, A. R. (2010). Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. *Biotechnology Advances*, 28(4), 500-518.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.03.002>
- Lapuerta, M., Armas, O. y Rodríguez-Fernández, J. (2008). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2), 198-223. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.07.001>
- Lárez, C. (2017). *Determinación del índice de saponificación en aceite de maíz usando una lipasa de procedencia nacional*.  
[https://www.researchgate.net/publication/320622547\\_Determinacion\\_del\\_indice\\_de\\_saponificacion\\_en\\_aceite\\_de\\_maiz\\_usando\\_una\\_lipasa\\_de\\_procedencia\\_nacional](https://www.researchgate.net/publication/320622547_Determinacion_del_indice_de_saponificacion_en_aceite_de_maiz_usando_una_lipasa_de_procedencia_nacional)
- Larosa, R. (2005). Situación actual del biodiesel. *Dialnet*, 421, 97-104.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1124997>
- Liu, H.-S. (2017). A novel strategy of biodiesel production from wet microalgae by direct saponification–esterification conversion (DSEC). *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 83(1). <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.12.001>

- Marchetti, J. M., Miguel, V. U. y Errazu, A. F. (2007). Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1300-1311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.006>
- Martin, A. (2021). *A Step Forward for "Green" Methanol and Its Potential to Deliver Deep GHG Reductions in Maritime Shipping*. <https://theicct.org/a-step-forward-for-green-methanol-and-its-potential-to-deliver-deep-ghg-reductions-in-maritime-shipping%E2%80%AF/>
- Meher, L. C., Vidya Sagar, D. y Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248 - 268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- MEM. (2023). *Informe de Monitoreo y Evaluación del Subsector Eléctrico Nacional 2023*. Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2024/03/Informe-de-Monitoreo-y-Evaluacion-de-la-Operacion-del-Subsector-Elctrico-Nacional-2023-Revista.pdf>
- Ministerio de Economía de Guatemala. (2021). *Infografía: Grasas y aceites comestibles en Guatemala*. <https://negociosgt.gob.gt/wp-content/uploads/estudios/Inteligencia/infografia/Infografia%20Mercados%20Guatemala%20Aceites%20y%20Grasas.pdf>
- Monika, T., Banga, S. y Pathak, V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. *Energy Nexus*, 10, 129-149. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100209>
- Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (Novena ed.). Wiley.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. y Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (Segunda ed.). Wiley.
- NIOSH. (2020). *Methanol: Systemic Agent*. [https://www.cdc.gov/niosh/ershdb/emergencyresponsecard\\_29750029.html#:~:text=Ingestion%20of%20methanol%20may%20cause,consciousness%20including%20coma%2C%20and%20seizure.](https://www.cdc.gov/niosh/ershdb/emergencyresponsecard_29750029.html#:~:text=Ingestion%20of%20methanol%20may%20cause,consciousness%20including%20coma%2C%20and%20seizure.)
- OHAUS. (2024). *MB120 - Moisture Analyzer*. <https://mx.ohaus.com/es-mx/mb120-2>
- Orellana, L. (2001). *Estadística descriptiva - Introducción*. [https://www.dm.uba.ar/materias/estadistica\\_Q/2011/1/modulo%20descriptiva.pdf](https://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/modulo%20descriptiva.pdf)
- Perry, R. H., Green, D. W. y Maloney, J. O. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Octava ed.). McGraw-Hill Education.
- Pisarello, L. (2010). *Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes*. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/291>

- Ruiz, P. (2017). *Esterificación*.  
<https://dieteticaynutricionweb.wordpress.com/2017/07/25/esterificacion/>
- Sajid, Z., Khan, F. y Zhang, Y. (2016). Biodiesel production from waste cooking oil: An environmental perspective. *Renewable Energy*, 90, 437-445.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.085>
- Serna-Saldivar, S. O. (2022). *Snack Foods: Processing, Innovation, and Nutritional Aspects*. Boca Ratón: CRC Press.  
<https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9781003129066/snack-foods-sergio-serna-saldivar>
- Sharif, A., Salleh, A., Nasrulhaq, A. y Somasundram, C. (2010, mayo 26). Biodiesel production from waste soybean oil biomass as renewable energy and environmental recycled process. *African Journal of Biotechnology*, 9(27), 4233-4240.  
<https://doi.org/ISSN 1684-5315>
- Silva, C. C., Ribeiro, N. F., Souza, M. M. y Aranda, D. A. (2010). Biodiesel production from soybean oil and methanol using hydrotalcites as catalyst. *Fuel Processing Technology*, 91(2), 205-210. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.09.019>
- Sosa, B. (2021). *La producción de biodiésel: una alternativa viable de reciclaje y una oportunidad de aprendizaje*. <https://noticias.uvg.edu.gt/produccion-de-biodiesel/>
- Sparkman, O. D., Penton, Z. E. y Kitson, F. G. (2011). *Gas Chromatography and Mass Spectrometry: A Practical Guide*. Elsevier.  
<https://www.sciencedirect.com/book/9780123736284/gas-chromatography-and-mass-spectrometry>
- Stat-Ease, Inc. (2022). *Design-Expert® Software User's Guide*.  
<https://www.statease.com/docs/v23.1/>
- Statista. (2023). *Distribución porcentual del suministro mundial de energía primaria en 2023, según la fuente*. <https://es.statista.com/estadisticas/600585/suministro-de-energia-primaria-a-nivel-mundial-por-fuente/>
- Trejo-Zárraga, F., Hernández-Loyo, F. d., Chavarría-Hernández, J. C. y Sotelo-Boyás, R. (2018). Kinetics of transesterification processes for biodiesel production. *InTechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75927>
- Verma, P. (2016). Comparative analysis of effect of methanol and ethanol on Karanja biodiesel production and its optimisation. *The Science and Technology of Fuel and Energy*, 180, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.035>
- Walmart Guatemala. (2023). *Aceites de cocina en Walmart Guatemala*.  
<https://www.walmart.com.gt/abarrotes/aceites-de-cocina>

- Wang, W., Cheng, Y. y Tan, G. (2018). Design Optimization of SBS-Modified Asphalt Mixture Reinforced with Eco-Friendly Basalt Fiber Based on Response Surface Methodology. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma11081311>.
- Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z. y Sopian, K. (2013). Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.016>
- Zhang, Y., Dubé, M. A., McLean, D. D. y Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, 89(1), 1- 16. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00040-3)

## XII. ANEXOS

### A. Datos originales

**Cuadro 32.** Pesajes del picnómetro y aceite para la determinación de la densidad

Lote	Masa pic. vacío $\pm 0.001$ g			Masa pic. lleno $\pm 0.001$ g		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
1	19.908	19.908	19.908	42.787	42.779	42.782
2	29.960	30.100	30.105	51.620	51.640	51.645
3	19.290	19.290	19.290	42.497	42.512	42.502
4	19.394	19.394	19.394	42.449	42.433	42.436
5	19.288	19.288	19.288	42.514	42.508	42.510
6	19.230	19.230	19.230	42.300	42.450	42.354
7	19.310	19.348	19.323	42.477	42.469	42.476
8	19.230	19.240	19.230	42.490	42.470	42.484
9	19.220	19.230	19.230	42.510	42.470	42.490

En el cuadro anterior se presentan las mediciones realizadas con el picnómetro, tanto vacío como lleno con aceite de fritura usado, registrado todo en triplicado. Se tomó una muestra de aceite por lote recibido en la universidad. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 33.** Masa de ftalato ácido de potasio y volumen empleado de KOH para la estandarización de la solución de KOH 0.1 M (pruebas aceite usado de frituras)

Lote	Masa KHP $\pm 0.0001$ g	Volumen KOH $\pm 0.1$ mL
1	0.1837	9.0
2	0.1100	8.0
3	0.1100	8.0
4	0.1100	8.0
5	0.1883	9.0
6	0.1883	9.0
7	0.1883	9.0
8	0.1840	9.2
9	0.1840	9.2

En el cuadro anterior se muestran las masas y volúmenes correspondientes de ftalato ácido de potasio y KOH para la estandarización de una solución de KOH 0.1 M usada en la prueba de número ácido del aceite usado de frituras. Se tomó una muestra de aceite por lote recibido en la universidad. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 34.** Mediciones de volumen de KOH y aceite para la determinación del número ácido (mg KOH/g aceite)

Lote	Vol. KOH blanco ± 0.1 mL	Vol. Aceite ± 0.1 mL	Vol. KOH ± 0.1 mL		
			No.1	No.2	No.3
1	0.1	1.5	0.2	0.2	0.2
2	0.1	1.5	0.3	0.3	0.2
3	0.1	1.5	0.2	0.3	0.2
4	0.1	1.5	0.3	0.3	0.4
5	0.1	1.5	0.2	0.2	0.2
6	0.1	1.5	0.2	0.2	0.2
7	0.1	1.5	0.2	0.2	0.2
8	0.1	1.5	0.3	0.3	0.2
9	0.1	1.5	0.3	0.2	0.3

En el cuadro anterior se muestran los volúmenes de KOH para el blanco, volumen de aceite y volumen de KOH empleados en la valoración ácido – base. Se tomó una muestra de aceite por lote recibido en la universidad. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 35.** Mediciones de tiempo en el viscosímetro de Ostwald para el aceite usado de frituras

Lote	Tiempo ± 1 s		
	No.1	No.2	No.3
1	373	390	380
2	422	440	450
3	403	397	366
4	369	393	436
5	337	334	320
6	353	339	368
7	449	455	461
8	429	475	440
9	401	375	438

En el cuadro anterior se muestran los distintos tiempos en segundos del aceite usado de frituras en el viscosímetro de Ostwald, registrado todo en triplicado. Se tomó una muestra de aceite por lote recibido en la universidad. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 36.** Índice de refracción a 40 °C del aceite usado de frituras

Lote	Índice de refracción nD ± 0.00001		
	No.1	No.2	No.3
1	1.46696	1.46696	1.46698
2	1.46763	1.46779	1.46779
3	1.46678	1.46717	1.46681
4	1.46698	1.46687	1.46691
5	1.46728	1.46749	1.46749
6	1.46755	1.46751	1.46755
7	1.46766	1.46775	1.46774
8	1.46659	1.46677	1.46683
9	1.46623	1.46627	1.46646

En el cuadro anterior se muestran los distintos índices de refracción del aceite usado de frituras, registrado todo en triplicado, utilizando un refractómetro digital ATAGO RX-5000a con baño térmico acoplado. Se tomó una muestra de aceite por lote recibido en la universidad. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 37.** Masa de aceite y porcentaje de humedad desplegado por la balanza de humedad

Lote	No.1		No.2		No.3	
	Masa ± 0.001 g	Humedad ± 0.01 %	Masa ± 0.001 g	Humedad ± 0.01 %	Masa ± 0.001 g	Humedad ± 0.01 %
1	1.006	0.30	1.001	0.20	1.005	0.50
2	1.006	0.30	1.003	0.30	1.003	0.30
3	1.000	0.50	1.004	0.30	1.002	0.30
4	1.003	0.50	1.000	0.40	1.043	0.48
5	1.001	0.10	1.002	0.20	1.002	0.20
6	0.998	0.10	0.998	0.20	0.999	0.10
7	1.008	0.20	1.007	0.10	1.001	0.30
8	1.007	0.30	1.003	0.30	1.008	0.30
9	1.010	0.10	1.012	0.20	1.006	0.40

En el cuadro anterior se muestran las distintas masas de aceite y porcentaje de humedad que presentaron los lotes de aceite usado de frituras, registrado todo en triplicado mediante la balanza OHAUS MB120. Se tomó una muestra de aceite por lote recibido en la universidad. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 38.** Temperatura y materia polar total del aceite usado de frituras

Lote	No.1		No.2		No.3	
	Temp. $\pm$ 0.1 °C	TPM $\pm$ 0.1 %	Temp. $\pm$ 0.1 °C	TPM $\pm$ 0.1 %	Temp. $\pm$ 0.1 °C	TPM $\pm$ 0.1 %
1	35.0	13.7	39.5	13.6	42.0	13.6
2	43.0	21.9	41.0	22.1	40.0	22.3
3	65.0	10.5	54.0	11.1	53.0	12
4	38.0	15.5	40.0	15.3	39.0	15.7
5	50.0	12.4	53.0	13.9	47.5	13.7
6	52.0	14.4	50.0	14.9	46.0	15.1
7	38.0	15.1	42.0	14.4	41.5	14.2
8	37.0	13.1	37.5	13.1	37.0	13.7
9	35.0	15.0	37.5	14.3	39.5	14.5

En el cuadro anterior se muestran las distintas temperaturas en °C y el porcentaje de materia polar total que presentaba el aceite usado de frituras, todo registrado en triplicado. Se tomó una muestra de aceite por lote recibido en la universidad. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 39.** Pesajes del picnómetro y biodiésel con etanol para la determinación de la densidad

PE	Masa pic. vacío $\pm$ 0.001 g			Masa pic. lleno $\pm$ 0.001 g		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
1	19.290	19.292	19.288	40.990	41.215	41.205
2	19.396	19.398	19.390	41.270	41.360	41.380
3	19.284	19.288	19.282	41.120	41.240	41.230
4	19.232	19.236	19.230	40.860	40.985	41.000
5	19.312	19.316	19.310	41.000	41.120	41.140
6	19.244	19.248	19.240	40.860	40.990	40.980
7	19.226	19.230	19.224	40.790	41.020	41.010
8	19.288	19.284	19.283	40.830	41.010	41.020
9	19.290	19.294	19.292	41.000	41.080	41.095
10	19.910	19.912	19.908	41.475	41.585	41.580
11	19.290	19.291	19.288	41.110	41.205	41.220
12	19.244	19.248	19.246	41.020	41.130	41.125
13	19.284	19.280	19.281	40.900	41.015	41.030
14	19.292	19.290	19.288	41.050	41.140	41.145
15	19.900	19.898	19.902	40.870	42.092	42.075
16	19.294	19.291	19.289	40.800	40.910	40.920
17	19.236	19.232	19.230	40.910	41.015	41.025
18	19.244	19.248	19.246	40.990	41.100	41.110
19	19.908	19.904	19.910	41.280	41.370	41.375
20	19.284	19.286	19.280	41.100	41.210	41.220

En el cuadro anterior se presentan las mediciones realizadas con el picnómetro, tanto vacío como lleno de biodiésel con etanol, registrado todo en triplicado. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 40.** Masa de ftalato ácido de potasio y volumen de KOH empleado para la estandarización de la solución de KOH 0.1 M (pruebas BD con etanol)

PE	Masa KHP $\pm 0.0001$ g	Volumen KOH $\pm 0.1$ mL
1	0.1837	9.0
2	0.1100	8.0
3	0.1100	8.0
4	0.1100	8.0
5	0.1883	9.0
6	0.1883	9.0
7	0.1883	9.0
8	0.1840	9.2
9	0.1840	9.2
10	0.1835	9.1
11	0.1835	9.1
12	0.1835	9.1
13	0.1835	9.1
14	0.1106	5.3
15	0.1106	5.3
16	0.1106	5.3
17	0.1123	5.7
18	0.1123	5.7
19	0.1123	5.7
20	0.1123	5.7

En el cuadro anterior se muestran las masas y volúmenes correspondientes de ftalato ácido de potasio y KOH para la estandarización de una solución de KOH 0.1 M usada en la prueba de número ácido del biodiésel con etanol. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 41.** Mediciones de volumen de KOH y biodiésel con etanol para la determinación del número ácido (mg KOH/g BD)

PE	Vol. KOH blanco $\pm 0.1$ mL	Vol. BD $\pm 0.1$ mL	Vol. KOH $\pm 0.1$ mL		
			No.1	No.2	No.3
1	0.1	1.5	0.17	0.18	0.17
2	0.1	1.5	0.14	0.14	0.14
3	0.1	1.5	0.18	0.18	0.19
4	0.1	1.5	0.13	0.14	0.13
5	0.1	1.5	0.15	0.14	0.15
6	0.1	1.5	0.19	0.19	0.20

7	0.1	1.5	0.17	0.18	0.18
8	0.1	1.5	0.20	0.19	0.20
9	0.1	1.5	0.19	0.19	0.19
10	0.1	1.5	0.14	0.14	0.13
11	0.1	1.5	0.20	0.21	0.19
12	0.1	1.5	0.18	0.19	0.18
13	0.1	1.5	0.13	0.12	0.13
14	0.1	1.5	0.18	0.17	0.16
15	0.1	1.5	0.19	0.18	0.18
16	0.1	1.5	0.17	0.16	0.16
17	0.1	1.5	0.15	0.14	0.14
18	0.1	1.5	0.16	0.15	0.16
19	0.1	1.5	0.14	0.12	0.13
20	0.1	1.5	0.14	0.14	0.13

En el cuadro anterior se muestran los volúmenes de KOH para el blanco, volumen de biodiésel con etanol y volumen de KOH empleados en la valoración ácido – base. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 42.** Mediciones de tiempo en el viscosímetro de Ostwald para el biodiésel con etanol

PE	Tiempo $\pm$ 1 s		
	No.1	No.2	No.3
1	43	50	46
2	52	51	49
3	47	51	53
4	43	50	50
5	46	51	49
6	46	51	49
7	44	47	52
8	51	47	45
9	49	48	46
10	46	46	52
11	50	45	45
12	46	47	48
13	53	48	47
14	43	43	51
15	51	51	45
16	49	44	47
17	49	43	49
18	50	52	53
19	47	43	45
20	46	50	43

En el cuadro anterior se muestran los distintos tiempos en segundos del biodiésel con etanol en el viscosímetro de Oswald, registrado todo en triplicado. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 43.** Índice de refracción a 40 °C del biodiésel con etanol

PE	Índice de refracción nD ± 0.00001		
	No.1	No.2	No.3
1	1.45251	1.45252	1.45787
2	1.45524	1.45072	1.45208
3	1.45405	1.45490	1.45708
4	1.45025	1.44926	1.45168
5	1.44833	1.45009	1.44718
6	1.44751	1.45359	1.45100
7	1.44951	1.45212	1.45798
8	1.44776	1.45382	1.44724
9	1.44947	1.44855	1.45174
10	1.44727	1.44741	1.44883
11	1.45444	1.44794	1.44836
12	1.44967	1.45772	1.44946
13	1.45306	1.45486	1.45757
14	1.45498	1.45300	1.45595
15	1.44963	1.45350	1.45197
16	1.45267	1.44786	1.45607
17	1.45262	1.45800	1.44924
18	1.44774	1.44764	1.45331
19	1.45188	1.45025	1.44993
20	1.45254	1.45747	1.45173

En el cuadro anterior se muestran los distintos índices de refracción del biodiésel con etanol, registrado todo en triplicado, utilizando un refractómetro digital ATAGO RX-5000a con baño térmico acoplado. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 44.** Masa de biodiésel con etanol y porcentaje de humedad desplegado por la balanza de humedad

PE	No.1		No.2		No.3	
	Masa ± 0.001 g	Humedad ± 0.01 %	Masa ± 0.001 g	Humedad ± 0.01 %	Masa ± 0.001 g	Humedad ± 0.01 %
1	0.999	0.07	0.998	0.09	1.009	0.10
2	0.998	0.06	1.001	0.06	0.999	0.06
3	0.999	0.01	0.998	0.05	1.000	0.10
4	1.003	0.13	1.005	0.06	1.007	0.14

5	0.999	0.13	1.000	0.12	1.008	0.12
6	1.004	0.05	1.002	0.07	1.010	0.07
7	1.004	0.01	1.001	0.07	1.004	0.12
8	1.001	0.12	1.005	0.06	1.000	0.14
9	1.006	0.14	1.000	0.09	1.004	0.11
10	1.009	0.08	1.010	0.11	1.010	0.03
11	1.001	0.06	0.999	0.02	1.009	0.14
12	1.010	0.09	1.007	0.10	1.006	0.06
13	1.009	0.04	1.008	0.11	1.010	0.10
14	0.999	0.05	1.002	0.01	1.000	0.04
15	1.010	0.04	1.007	0.04	1.006	0.12
16	1.005	0.06	1.005	0.02	1.005	0.15
17	1.010	0.10	1.010	0.05	1.008	0.13
18	1.008	0.13	1.009	0.13	1.003	0.10
19	1.009	0.11	0.999	0.05	0.998	0.05
20	1.001	0.15	1.001	0.13	1.006	0.12

En el cuadro anterior se muestran las distintas masas de biodiésel con etanol y porcentaje de humedad, registrado todo en triplicado mediante la balanza OHAUS MB120. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 45.** Mediciones de pH y prueba 3/27 para el biodiésel con etanol

PE	pH	3/27
1	7.0	Positiva
2	7.0	Positiva
3	7.0	Positiva
4	7.0	Positiva
5	7.0	Positiva
6	7.0	Positiva
7	7.0	Positiva
8	7.0	Positiva
9	7.0	Positiva
10	7.0	Positiva
11	7.0	Positiva
12	7.0	Positiva
13	7.0	Positiva
14	7.0	Positiva
15	7.0	Positiva
16	7.0	Positiva
17	7.0	Positiva
18	7.0	Positiva
19	7.0	Positiva
20	7.0	Positiva

En el cuadro anterior se muestran los distintos valores de pH y el resultado de la prueba de 3/27 para el biodiésel con etanol. Las mediciones de pH fueron realizadas con tiras indicadoras y el solvente empleado en la prueba 3/27 fue acetona. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 46.** Pesajes del picnómetro y biodiésel con metanol para la determinación de la densidad

PE	Masa pic. vacío $\pm 0.001$ g			Masa pic. lleno $\pm 0.001$ g		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
1	19.340	19.274	19.241	40.845	41.018	41.631
2	19.307	19.294	19.275	41.020	40.951	41.372
3	19.274	19.212	19.247	41.644	41.734	41.543
4	19.208	19.284	19.222	40.811	41.178	41.009
5	19.272	19.302	19.327	41.485	41.888	40.641
6	19.232	19.309	19.218	41.811	41.240	40.702
7	19.307	19.298	19.205	41.040	40.872	41.852
8	19.250	19.214	19.267	41.293	40.983	41.707
9	19.309	19.300	19.242	41.569	41.325	41.352
10	19.258	19.254	19.319	40.960	40.612	41.299
11	19.288	19.341	19.319	41.607	41.132	41.394
12	19.246	19.245	19.212	40.845	40.805	41.189
13	19.323	19.242	19.324	41.776	40.723	40.662
14	19.252	19.239	19.261	41.798	40.692	40.847
15	19.349	19.274	19.254	41.067	40.612	41.331
16	19.241	19.213	19.211	41.418	41.132	41.686
17	19.262	19.213	19.248	41.047	41.167	40.761
18	19.236	19.207	19.346	40.888	41.742	41.365
19	19.286	19.301	19.270	40.659	41.620	40.816
20	19.329	19.307	19.213	41.076	41.664	41.270

En el cuadro anterior se presentan las mediciones realizadas con el picnómetro, tanto vacío como lleno de biodiésel con metanol, registrado todo en triplicado. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 47.** Masa de ftalato acido de potasio y volumen de KOH empleado para la estandarización de la solución de KOH 0.1 M (pruebas BD con metanol)

PE	Masa KHP $\pm 0.0001$ g	Volumen KOH $\pm 0.1$ mL
1	0.1837	9.0
2	0.1100	8.0
3	0.1100	8.0
4	0.1100	8.0
5	0.1883	9.0

6	0.1883	9.0
7	0.1883	9.0
8	0.1840	9.2
9	0.1840	9.2
10	0.1835	9.1
11	0.1835	9.1
12	0.1835	9.1
13	0.1835	9.1
14	0.1106	5.3
15	0.1106	5.3
16	0.1106	5.3
17	0.1123	5.7
18	0.1123	5.7
19	0.1123	5.7
20	0.1123	5.7

En el cuadro anterior se muestran las masas y volúmenes correspondientes de ftalato ácido de potasio y KOH para la estandarización de una solución de KOH 0.1 M usada en la prueba de número ácido del biodiésel con metanol. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 48.** Mediciones de volumen de KOH y biodiésel con metanol para la determinación del número ácido (mg KOH/g BD)

PE	Vol. KOH blanco ± 0.1 mL	Vol. BD ± 0.1 mL	Vol. KOH ± 0.1 mL		
			No.1	No.2	No.3
1	0.1	1.5	0.11	0.11	0.12
2	0.1	1.5	0.12	0.12	0.13
3	0.1	1.5	0.18	0.17	0.17
4	0.1	1.5	0.15	0.15	0.17
5	0.1	1.5	0.12	0.13	0.13
6	0.1	1.5	0.15	0.17	0.17
7	0.1	1.5	0.12	0.12	0.11
8	0.1	1.5	0.15	0.14	0.14
9	0.1	1.5	0.14	0.14	0.13
10	0.1	1.5	0.13	0.11	0.11
11	0.1	1.5	0.16	0.16	0.15
12	0.1	1.5	0.11	0.11	0.12
13	0.1	1.5	0.11	0.11	0.13
14	0.1	1.5	0.13	0.13	0.11
15	0.1	1.5	0.11	0.11	0.12
16	0.1	1.5	0.15	0.16	0.17
17	0.1	1.5	0.14	0.13	0.11
18	0.1	1.5	0.14	0.16	0.16

19	0.1	1.5	0.16	0.16	0.18
20	0.1	1.5	0.15	0.14	0.16

En el cuadro anterior se muestran los volúmenes de KOH para el blanco, volumen de biodiésel con metanol y volumen de KOH empleados en la valoración ácido – base. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 49.** Mediciones de tiempo en el viscosímetro de Ostwald para el biodiésel con metanol

PE	Tiempo $\pm 1$ s		
	No.1	No.2	No.3
1	33	27	26
2	30	32	29
3	35	30	30
4	29	31	29
5	34	32	34
6	26	35	30
7	30	28	34
8	29	27	33
9	25	33	31
10	26	28	28
11	26	26	25
12	27	34	27
13	25	25	35
14	25	29	28
15	30	34	35
16	35	29	33
17	30	33	27
18	30	28	29
19	33	27	33
20	27	34	26

En el cuadro anterior se muestran los distintos tiempos en segundos del biodiésel con metanol en el viscosímetro de Ostwald, registrado todo en triplicado. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 50.** Índice de refracción a 40 °C del biodiésel con metanol

PE	Índice de refracción $n_D \pm 0.00001$		
	No.1	No.2	No.3
1	1.45073	1.45269	1.45229
2	1.45260	1.44838	1.45042
3	1.44561	1.45412	1.44868
4	1.45122	1.44578	1.45035

5	1.45041	1.44905	1.45363
6	1.44846	1.44995	1.45358
7	1.45037	1.44878	1.45437
8	1.44926	1.44542	1.44579
9	1.44941	1.44585	1.44980
10	1.45015	1.44557	1.44500
11	1.44786	1.44648	1.44753
12	1.44812	1.44675	1.45282
13	1.45232	1.44794	1.44951
14	1.44845	1.45158	1.44816
15	1.45325	1.44531	1.44652
16	1.44630	1.44633	1.45382
17	1.45259	1.44683	1.45335
18	1.44973	1.45342	1.44934
19	1.44586	1.44661	1.44949
20	1.44914	1.45278	1.45482

En el cuadro anterior se muestran los distintos índices de refracción del biodiésel con etanol, registrado todo en triplicado, utilizando un refractómetro digital ATAGO RX-5000a con baño térmico acoplado. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 51.** Masa de biodiésel con metanol y porcentaje de humedad desplegado por la balanza de humedad

PE	No.1		No.2		No.3	
	Masa $\pm$ 0.001 g	Humedad $\pm$ 0.01 %	Masa $\pm$ 0.001 g	Humedad $\pm$ 0.01 %	Masa $\pm$ 0.001 g	Humedad $\pm$ 0.01 %
1	0.999	0.05	0.998	0.07	0.999	0.10
2	1.001	0.04	0.999	0.05	1.001	0.04
3	1.003	0.03	1.004	0.05	1.006	0.06
4	1.007	0.09	1.008	0.11	1.006	0.05
5	0.998	0.11	1.005	0.08	1.006	0.11
6	1.005	0.01	1.005	0.02	0.998	0.03
7	1.002	0.10	1.004	0.04	0.999	0.10
8	1.007	0.05	1.010	0.07	0.998	0.05
9	1.003	0.03	1.005	0.06	0.999	0.08
10	1.009	0.04	1.010	0.11	1.007	0.05
11	1.008	0.07	1.004	0.02	1.005	0.02
12	0.999	0.10	0.999	0.10	1.006	0.09
13	1.004	0.09	1.004	0.02	1.008	0.07
14	1.010	0.04	1.008	0.07	0.998	0.07
15	1.007	0.09	1.010	0.05	1.000	0.04
16	1.007	0.08	1.010	0.11	1.001	0.11

17	1.005	0.05	1.010	0.07	1.010	0.06
18	1.004	0.04	1.009	0.04	1.000	0.09
19	1.003	0.06	1.009	0.08	1.010	0.02
20	1.010	0.02	1.000	0.09	1.003	0.02

En el cuadro anterior se muestran las distintas masas de biodiésel con metanol y porcentaje de humedad, registrado todo en triplicado mediante la balanza OHAUS MB120. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 52.** Mediciones de pH y prueba 3/27 para el biodiésel con metanol

PE	pH	3/27
1	7.0	Positiva
2	7.0	Positiva
3	7.0	Positiva
4	7.0	Positiva
5	7.0	Positiva
6	7.0	Positiva
7	7.0	Positiva
8	7.0	Positiva
9	7.0	Positiva
10	7.0	Positiva
11	7.0	Positiva
12	7.0	Positiva
13	7.0	Positiva
14	7.0	Positiva
15	7.0	Positiva
16	7.0	Positiva
17	7.0	Positiva
18	7.0	Positiva
19	7.0	Positiva
20	7.0	Positiva

En el cuadro anterior se muestran los distintos valores de pH y el resultado de la prueba de 3/27 para el biodiésel con metanol. Las mediciones de pH fueron realizadas con tiras indicadoras y el solvente empleado en la prueba 3/27 fue metanol. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 53.** Diseño experimental y niveles de factores para la producción de biodiésel con etanol y metanol

PE	Tipo de punto	Factor A	Factor B	Factor C
		Alcohol : aceite (RM)	Catalizador ( % m/m)	Tiempo reacción (min)
1	Factorial	+1 ; (8:1)	+1 ; (1.5)	-1 ; (90)

2	Factorial	-1 ; (6:1)	-1 ; (0.5)	+1 ; (130)
3	Central	0 ; (7:1)	0 ; (1.0)	0 ; (110)
4	Factorial	-1 ; (6:1)	-1 ; (0.5)	-1 ; (90)
5	Axial	0 ; (7:1)	-1 ; (0.5)	0 ; (110)
6	Central	0 ; (7:1)	0 ; (1.0)	0 ; (110)
7	Central	0 ; (7:1)	0 ; (1.0)	0 ; (110)
8	Central	0 ; (7:1)	0 ; (1.0)	0 ; (110)
9	Factorial	-1 ; (6:1)	+1 ; (1.5)	+1 ; (130)
10	Factorial	+1 ; (8:1)	+1 ; (1.5)	+1 ; (130)
11	Axial	0 ; (7:1)	0 ; (1.0)	+1 ; (130)
12	Factorial	+1 ; (8:1)	-1 ; (0.5)	-1 ; (90)
13	Axial	-1 ; (6:1)	0 ; (1.0)	0 ; (110)
14	Axial	0 ; (7:1)	0 ; (1.0)	-1 ; (90)
15	Axial	+1 ; (8:1)	0 ; (1.0)	0 ; (110)
16	Axial	0 ; (7:1)	+1 ; (1.5)	0 ; (110)
17	Factorial	-1 ; (6:1)	+1 ; (1.5)	-1 ; (90)
18	Central	0 ; (7:1)	0 ; (1.0)	0 ; (110)
19	Central	0 ; (7:1)	0 ; (1.0)	0 ; (110)
20	Factorial	+1 ; (8:1)	-1 ; (0.5)	+1 ; (130)

En el cuadro anterior se muestran las 20 combinaciones de puntos experimentales (PE), que incluyen puntos factoriales centrales y axiales, con los niveles codificados (-1, 0, 1) y reales de los factores de estudio: relación molar alcohol:aceite (6:1. 8:1), concentración de catalizador (0.5. 1.5 %) y tiempo de reacción (90. 130min). Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental, empleando el programa Design Expert.

**Cuadro 54.** Masas reales utilizadas para la producción de biodiésel con etanol

PE	Masa (g) $\pm$ 0.1g							
	Aceite	Etanol	NaOH total	H <sub>2</sub> O	NaCl	Ácido acético	BD EtOH	Glicerina EtOH
1	100.2	42.2	1.525	60.1	6.1	3.0	82.7	14.0
2	100.3	31.7	0.523	59.9	5.9	1.4	64.5	12.3
3	100.0	36.8	1.027	60.1	5.9	2.2	85.3	12.8
4	100.4	31.5	0.526	59.9	6.0	1.5	59.4	12.3
5	100.4	36.8	0.523	60.0	5.9	1.6	71.6	12.6
6	100.3	36.8	1.025	60.1	6.0	2.2	85.8	12.8
7	100.2	36.8	1.025	59.9	6.1	2.2	86.4	13.2
8	100.0	36.8	1.028	60.0	6.0	2.9	84.7	13.6
9	100.1	31.6	1.524	60.1	5.9	3.1	79.1	13.8
10	100.2	41.9	1.528	59.9	5.9	2.2	87.5	12.9
11	100.2	37.0	1.024	60.1	6.1	2.0	87.9	12.9
12	100.4	42.1	0.525	59.9	6.1	1.5	63.1	12.4
13	100.4	31.5	1.023	60.0	6.0	2.1	76.0	13.4
14	100.3	37.0	1.024	60.0	6.2	2.2	81.9	13.4
15	100.2	42.1	1.027	59.9	5.9	2.2	83.7	13.1

16	100.3	36.8	1.523	59.9	5.9	2.8	88.2	13.7
17	100.0	31.5	1.524	60.2	6.1	3.2	77.2	14.0
18	100.0	36.8	1.027	60.1	5.9	2.3	85.6	13.1
19	100.0	36.8	1.024	60.0	6.0	2.3	86.3	12.8
20	100.2	42.1	0.524	60.0	6.0	1.3	69.2	12.4

En el cuadro anterior se muestran las mediciones de las masas utilizadas en cada punto experimental (PE) durante el proceso de producción de biodiésel con etanol. Incluye las cantidades de aceite usado de frituras, etanol, hidróxido de sodio, agua, cloruro de sodio, ácido acético, así como el biodiésel y glicerina obtenidos. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 55.** Masas reales utilizadas para la producción de biodiésel con metanol

PE	Masa (g) $\pm$ 0.1g							
	Aceite	Metanol	NaOH total	H <sub>2</sub> O	NaCl	Ácido acético	BD MetOH	Glicerina MetOH
1	100.1	29.3	1.524	60.1	6.0	2.8	90.5	13.8
2	100.1	22.0	0.523	60.0	5.9	1.5	84.1	11.9
3	100.1	25.6	1.027	60.0	6.2	2.0	93.0	12.5
4	100.0	22.1	0.524	60.0	6.2	1.3	79.8	12.4
5	100.1	25.7	0.526	59.9	6.1	1.5	85.7	11.5
6	100.0	25.7	1.023	60.0	6.0	2.3	94.0	12.7
7	100.3	25.7	1.024	60.1	5.9	2.2	93.8	12.8
8	100.1	25.6	1.027	59.9	6.1	3.1	92.9	13.4
9	100.0	21.9	1.525	59.9	5.9	3.2	91.0	13.5
10	100.0	29.4	1.523	60.0	6.2	2.2	95.0	11.6
11	100.3	25.7	1.024	60.0	5.9	2.2	94.7	11.4
12	100.0	29.3	0.523	60.0	6.2	1.6	82.5	12.2
13	100.3	21.9	1.024	60.1	6.2	2.3	88.4	13.1
14	100.1	25.6	1.025	59.9	6.0	2.2	91.5	13.5
15	100.1	29.2	1.028	59.9	6.0	2.1	92.2	12.9
16	100.1	25.8	1.524	59.9	5.9	2.9	94.5	13.2
17	100.3	21.9	1.528	59.9	6.1	3.0	86.7	14.9
18	100.3	25.6	1.025	60.1	6.2	2.2	93.1	13.0
19	100.0	25.7	1.027	59.9	6.1	2.2	93.6	12.5
20	100.0	29.2	0.525	60.0	5.9	1.4	87.9	12.5

En el cuadro anterior se muestran las mediciones de las masas utilizadas en cada punto experimental (PE) durante el proceso de producción de biodiésel con metanol. Incluye las cantidades de aceite usado de frituras, metanol, hidróxido de sodio, agua, cloruro de sodio, ácido acético, así como el biodiésel y glicerina obtenidos. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Cuadro 56.** Masas reales utilizadas para la producción de biodiésel con etanol en el punto óptimo del modelo

Corrida	Masa (g) $\pm 0.1g$							
	Aceite	Etanol	NaOH total	H <sub>2</sub> O	NaCl	Ácido acético	BD EtOH	Glicerina EtOH
1	100.1	37.8	1.315	60.0	6.1	2.5	90.0	13.1
2	100.1	37.7	1.314	59.9	5.9	2.4	91.3	13.5
3	100.0	37.8	1.313	60.0	6.0	2.4	90.8	13.2

En el cuadro anterior se muestran las mediciones de las masas utilizadas en las tres corridas de producción de biodiésel con etanol en el punto óptimo del modelo propuesto. Incluye las cantidades de aceite usado de frituras, etanol, hidróxido de sodio, agua, cloruro de sodio, ácido acético, así como el biodiésel y glicerina obtenidos. Mediciones realizadas en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

## B. Cálculos de muestra

**Cálculo 1** – Densidad del lote 1 de aceite usado de frituras en g/mL

$$\rho = \frac{(42.787 - 19.908)g}{25ml} = 0.915 \frac{g}{ml}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la densidad de lote 1 de aceite usado de frituras a partir de los pesajes del picnómetro de 25mL tanto vacío como lleno. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para la densidad del biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 4.

**Cálculo 2.** Molaridad real de la solución de KOH

$$C_{KOH} = \frac{0.1837g \text{ KHP}}{204.22 \frac{g}{mol} \text{ KHP} \times \frac{1 \text{ mol KHP}}{1 \text{ mol KOH}} \times (9 \times 10^{-3} L \text{ KOH})} = 0.1 \frac{mol}{L} \text{ KOH}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la molaridad real de la solución de KOH mediante una estandarización con ftalato ácido de potasio (KHP). La solución se utilizó para determinar el número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras. Se utilizó el mismo cálculo para las soluciones de los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 3.

**Cálculo 3.** Número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras en mg KOH /g

$$\text{Número ácido} = \frac{56.1 \frac{g}{mol} \text{ KOH} \times (0.2 - 0.1) mL \times 0.1 \frac{mol}{L} \text{ KOH}}{1.5 mL \text{ aceite} \times 0.915 \frac{g}{mL} \text{ aceite}} = 0.41 \frac{mg \text{ KOH}}{g \text{ aceite}}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el número ácido de lote 1 de aceite usado de frituras en mg KOH/g a partir de una valoración ácido-base. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 2.

**Cálculo 4.** Porcentaje de ácidos grasos libres del lote 1 de aceite usado de frituras

$$\% AGL = \frac{0.41 \frac{mg KOH}{g aceite} \times 561}{282.5 \frac{g}{mol} AGL} = 0.81 \% AGL$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el porcentaje de ácidos grasos libres de lote 1 de aceite usado de frituras a partir del número ácido determinado anteriormente. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 8.

**Cálculo 5.** Viscosidad cinemática del lote 1 de aceite usado de frituras en  $mm^2/s$

$$\mu = 0.0958 \frac{mm^2}{s^2} \times 373 s = 35.73 \frac{mm^2}{s}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la viscosidad cinemática de lote 1 de aceite usado de frituras en  $mm^2/s$  empleando un viscosímetro de Ostwald. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 5.

**Cálculo 6.** Masa de NaOH adicional para reaccionar con los ácidos grasos libres

$$m_{NaOH,AGL} = \frac{0.428 \times 10^{-3} g KOH}{1 g aceite} \times \frac{1 mol KOH}{56.11 g KOH} \times \frac{1 mol NaOH}{1 mol KOH} \times \frac{39.997 g NaOH}{1 mol NaOH} \times 100 g aceite$$

$$= 0.023 g NaOH$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa de NaOH adicional del punto experimental 1 necesaria para reaccionar con los ácidos grasos libres presentes en el aceite usado de frituras. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 11.

**Cálculo 7.** Masa de etanol para la formación del etóxido de sodio en el punto experimental 1

$$m_{EtOH} = 100 g aceite \times \frac{1 mol aceite}{877 g aceite} \times \frac{8 mol EtOH}{1 mol aceite} \times \frac{46.07 g EtOH}{1 mol EtOH}$$

$$= 42.0 g EtOH$$

El cálculo anterior se realizó para determinar masa de etanol del punto experimental 1 necesaria para reaccionar la formación del etóxido de sodio y el exceso de etanol para el equilibrio de la reacción. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 12.

**Cálculo 8.** Masa de etóxido de sodio formada en el punto experimental 1

$$m_{CH_3CH_2ONa} = 1.5 g NaOH \times \frac{1 mol NaOH}{39.997 g NaOH} \times \frac{1 mol CH_3CH_2ONa}{1 mol NaOH} \times \frac{68.05 g CH_3CH_2ONa}{1 mol CH_3CH_2ONa}$$

$$= 2.6 \text{ g } CH_3CH_2ONa$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de etóxido de sodio formada en el punto experimental 1, para el balance de masa. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 13.

**Cálculo 9.** Masa de etanol en exceso del etóxido de sodio en el punto experimental 1

$$m_{EtOH,exc,et.} = 42.0 \text{ g } EtOH - \left( 1.5 \text{ g } NaOH \times \frac{1 \text{ mol } NaOH}{39.997 \text{ g } NaOH} \times \frac{1 \text{ mol } EtOH}{1 \text{ mol } NaOH} \times \frac{46.07 \text{ g } EtOH}{1 \text{ mol } EtOH} \right)$$

$$= 40.3 \text{ g } EtOH$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de etanol en exceso en el punto experimental 1, después de la formación del etóxido de sodio. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 14 y 15.

**Cálculo 10.** Masa de agua formada en el punto experimental 1

$$m_{H_2O} = 1.5 \text{ g } NaOH \times \frac{1 \text{ mol } NaOH}{39.997 \text{ g } NaOH} \times \frac{1 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } NaOH} \times \frac{18.01 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} = 0.68 \text{ g } H_2O$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de agua formada durante la formación del etóxido de sodio en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 16.

**Cálculo 11.** Balance de masa de la formación del etóxido de sodio del punto experimental 1

$$42.0 \text{ g } EtOH + 1.5 \text{ g } NaOH = 2.4 \text{ g } CH_3CH_2ONa + 40.3 \text{ g } EtOH, exc + 0.68 \text{ g } H_2O$$

$$43.5 \text{ g} = 43.5 \text{ g}$$

El cálculo anterior se realizó para corroborar el balance de masa de la formación de etóxido de sodio en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 10.

**Cálculo 12.** Balance de masa de la filtración del aceite usado de frituras en el punto experimental 1

$$100.5 \text{ g } aceite + residuos = 100 \text{ g } aceite filtrado + 10.5 \text{ g } residuos$$

$$100.5 \text{ g} = 100.5 \text{ g}$$

El cálculo anterior se realizó para corroborar el balance de masa de la filtración de aceite usado de frituras en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 17.

**Cálculo 13.** Masa de jabones formada en el punto experimental 1

$$m_{jabones} = \left( 0.851 \text{ g AGL} \times \frac{1 \text{ mol AGL}}{282.5 \text{ g AGL}} \times \frac{1 \text{ mol jabones}}{1 \text{ mol AGL}} \times \frac{304.5 \text{ g jabones}}{1 \text{ mol jabones}} \right) + 0.7 \text{ g jabones}$$

$$= 1.6 \text{ g jabones}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de jabones formados durante la transesterificación en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 19.

**Cálculo 14.** Masa de biodiésel formado en el punto experimental 1

$$m_{BD} = \left( 100 \text{ g aceite} \times \frac{1 \text{ mol aceite}}{877 \text{ g aceite}} \times \frac{3 \text{ mol BD}}{1 \text{ mol aceite}} \times \frac{292.2 \text{ g BD}}{1 \text{ mol BD}} \right) - 1.4 \text{ g jabones}$$

$$= 98.4 \text{ g BD}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de biodiésel formado durante la transesterificación en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 20.

**Cálculo 15.** Masa de glicerina formada en el punto experimental 1

$$m_{gli} = \left( \frac{100 \text{ g aceite}}{877 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ aceite}} \times \frac{1 \text{ mol gli}}{1 \text{ mol aceite}} \times \frac{92.1 \text{ g gli}}{1 \text{ mol gli}} \right) = 10.5 \text{ g gli}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de glicerina formada durante la transesterificación en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 21.

**Cálculo 16.** Masa de etanol en exceso de la transesterificación en el punto experimental 1

$$m_{EtOH,exc,tr} = 40.3 \text{ g} - \left( \frac{100 \text{ g aceite}}{877 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ aceite}} \times \frac{3 \text{ mol EtOH}}{1 \text{ mol aceite}} \times \frac{46.07 \text{ g EtOH}}{1 \text{ mol EtOH}} \right)$$

$$+ \left( \frac{0.851 \text{ g AGL}}{282.5 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ AGL}} \times \frac{1 \text{ mol EtOH}}{1 \text{ mol aceite}} \times \frac{46.07 \text{ g EtOH}}{1 \text{ mol EtOH}} \right) = 32.3 \text{ g EtOH}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de etanol en exceso durante la transesterificación en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 22.

**Cálculo 17.** Balance de masa de la transesterificación en el punto experimental 1

$$\begin{aligned} 100 \text{ g aceite} + 2.6 \text{ g } CH_3CH_2ONa + 40.3 \text{ g EtOH, exc} + 0.7 \text{ g } H_2O \\ = 1.6 \text{ g jabones} + 32.3 \text{ g EtOH} + 98.4 \text{ g BD} + 10.5 \text{ g gli} \\ 143.5 \text{ g} = 143.5 \text{ g} \end{aligned}$$

El cálculo anterior se realizó para corroborar el balance de masa de la transesterificación en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 18.

**Cálculo 18.** Masa de ácido acético glacial agregado en el punto experimental 1

$$m_{AA} = \left( \frac{1.5 \text{ g NaOH}}{39.997 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ NaOH}} \times \frac{1 \text{ mol AA}}{1 \text{ mol NaOH}} \times \frac{60.1 \text{ g AA}}{1 \text{ mol AA}} \right) + 0.5 \text{ g AA} = 2.8 \text{ g AA}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica y el exceso de ácido acético glacial agregado durante la neutralización en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 24.

**Cálculo 19.** Masa de ácidos grasos libres formados en el punto experimental 1

$$m_{AGL} = \frac{1.6 \text{ g jabones}}{304.5 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ jabones}} \times \frac{1 \text{ mol AGL}}{1 \text{ mol jabones}} \times \frac{282.5 \text{ g AGL}}{1 \text{ mol AGL}} = 1.5 \text{ g AGL}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de ácidos grasos libres formados durante la transesterificación en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 25.

**Cálculo 20.** Masa de acetato de sodio formado en el punto experimental 1

$$\begin{aligned} m_{CH_3COONa} &= \frac{1.6 \text{ g jabones}}{304.5 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ jabones}} \times \frac{1 \text{ mol } CH_3COONa}{1 \text{ mol jabones}} \times \frac{82.03 \text{ g } CH_3COONa}{1 \text{ mol } CH_3COONa} \\ &= 0.43 \text{ g } CH_3COONa \end{aligned}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la masa estequiométrica de acetato de sodio formado durante la transesterificación en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 26.

**Cálculo 21.** Balance de masa de la neutralización del punto experimental 1

$$\begin{aligned} 1.6 \text{ g jabones} + 32.3 \text{ g EtOH} + 10.5 \text{ g gli} + 98.4 \text{ g BD} + 2.8 \text{ g AA} \\ = 1.5 \text{ g AGL} + 32.3 \text{ g EtOH} + 98.4 \text{ g BD} + 10.5 \text{ g gli} + 2.5 \text{ g AA} + 0.43 \text{ g } CH_3CH_2COONa \\ 145.6 \text{ g} = 145.6 \text{ g} \end{aligned}$$

El cálculo anterior se realizó para corroborar el balance de masa de la neutralización en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 23.

**Cálculo 22.** Balance de masa de la decantación del punto experimental 1

$$1.5 \text{ g AGL} + 32.3 \text{ g EtOH} + 98.4 \text{ g BD} + 10.5 \text{ g gli} + 2.5 \text{ g AA} + 0.43 \text{ g CH}_3\text{COONa} \\ = 90.4 \text{ BD dec.} + 55.4 \text{ g residuos}$$

$$145.4 \text{ g} = 145.4 \text{ g}$$

El cálculo anterior se realizó para corroborar el balance de masa de la decantación en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 27.

**Cálculo 23.** Balance de masa del agente de lavado del punto experimental 1

$$60.0 \text{ g H}_2\text{O} + 6 \text{ g NaCl} = 66 \text{ g sol. NaCl}$$

$$66.0 \text{ g} = 66.0 \text{ g}$$

El cálculo anterior se realizó para corroborar el balance de masa de la formación del agente de lavado en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 28.

**Cálculo 24.** Balance de masa del lavado del punto experimental 1

$$66.0 \text{ g sol NaCl} + 90.4 \text{ g BD} = 85.4 \text{ g BD} + 71.0 \text{ g residuos}$$

$$156.4 \text{ g} = 156.4 \text{ g}$$

El cálculo anterior se realizó para corroborar el balance de masa del lavado en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 29.

**Cálculo 25.** Balance de masa del secado en el punto experimental 1

$$85.4 \text{ g BD}_{\text{lavado}} = 82.7 \text{ g BD}_{\text{seco}} + 2.7 \text{ g evaporado}$$

$$85.4 \text{ g} = 85.4 \text{ g}$$

El cálculo anterior se realizó para corroborar el balance de masa del secado en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 28.

**Cálculo 26.** Calor de mezcla del etóxido de sodio en el punto experimental 1

$$Q_{\text{mezcla}} = 42 \text{ g} \times 2.44 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} \times (50 - 25)^\circ\text{C} + 1.50 \text{ g} \times 1.2 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} \times (50 - 25)^\circ\text{C} = 2,408.4 \text{ J}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el calor de mezcla de la formación de etóxido de sodio en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para la transesterificación, la formación del agente de lavado y el secado, por medio de la Ecuación 38.

**Cálculo 27.** Entalpía molar de la reacción de formación del etóxido de sodio en el punto experimental 1

$$\begin{aligned}\Delta H_{reacción} &= \left(-413.4 \frac{kJ}{mol} - 285.5 \frac{kJ}{mol}\right) - \left(-425.6 \frac{kJ}{mol} - 277.7 \frac{kJ}{mol}\right) \times \frac{1000 J}{1 kJ} \\ &= -4,400 \frac{J}{mol}\end{aligned}$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el calor de mezcla de la formación de etóxido de sodio en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para la transesterificación, por medio de la Ecuación 40.

**Cálculo 28.** Calor de la reacción de etóxido de sodio en el punto experimental 1

$$Q_{reacción} = -4,400 \frac{J}{mol} \times \frac{1.5 g NaOH}{39.997 \frac{g}{mol} NaOH} = -165.0 J$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el calor de la reacción de formación de etóxido de sodio en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para la transesterificación, por medio de la Ecuación 38.

**Cálculo 29.** Pérdidas de calor al ambiente durante la formación de etóxido de sodio en el punto experimental 1

$$Q_{pérdidas} = 500 W \times 180 s \times (1 - 0.85) = 2,250 J$$

El cálculo anterior se realizó para determinar las pérdidas de calor durante la formación de etóxido de sodio en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para la transesterificación, la formación del agente de lavado y el secado, por medio de la Ecuación 41.

**Cálculo 30.** Potencia del agitador mecánico

$$P_{agitador} = 1.5 \times 915 \frac{kg}{m^3} \times \left(\frac{280 rpm}{60 s}\right)^3 \times (0.05 m)^5 = 0.044 W$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la potencia del agitador mecánico utilizado durante todas las corridas experimentales. Se utilizó el mismo cálculo para la transesterificación, la formación del agente de lavado y el secado, por medio de la Ecuación 43.

**Cálculo 31.** Trabajo mecánico del agitador mecánico en el punto experimental 1

$$W_{agitador} = 0.044 W \times 1800 s = 78.5 J$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el trabajo del agitador mecánico utilizado durante todas las corridas experimentales. Se utilizó el mismo cálculo para la transesterificación, la formación del agente de lavado y el secado, por medio de la Ecuación 42.

**Cálculo 32.** Calor total necesario para la formación del etóxido de sodio en el punto experimental 1

$$Q_{\text{etóxido}} = 2,408.4 J - 165.0 J + 2,250 J + 78.5 J = 4,771.9 J$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el calor total necesario para la formación del etóxido de sodio en el punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para la transesterificación, la formación del agente de lavado y el secado, por medio de la Ecuación 37.

**Cálculo 33.** Calor de evaporación del secado en el punto experimental 1

$$Q_{\text{evap}} = 1.3 \text{ g } H_2O \times 2,260 \frac{J}{g} + 1.4 \text{ g } AA \times 390 \frac{J}{g} = 3,577.5 J$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el calor de evaporación del secado en el punto experimental 1, por medio de la Ecuación 51.

**Cálculo 34.** Rendimiento de biodiésel producido con etanol en el punto experimental 1

$$Y = \frac{82.7 \text{ g } BD}{100 \text{ g } \text{aceite}} \times 100 \% = 82.7 \%$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el rendimiento de biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 1. Se utilizó el mismo cálculo para los demás puntos experimentales de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 1.

### C. Datos calculados

**Cuadro 57.** Densidad del aceite usado de frituras

Lote	Densidad (g/mL)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.915	0.001	0.915	0.001	0.915	0.001	0.915	0.001
2	0.866	0.001	0.862	0.001	0.862	0.001	0.863	0.001
3	0.928	0.001	0.929	0.001	0.928	0.001	0.929	0.001
4	0.922	0.001	0.922	0.001	0.922	0.001	0.922	0.001
5	0.929	0.001	0.929	0.001	0.929	0.001	0.929	0.001
6	0.923	0.001	0.929	0.001	0.925	0.001	0.926	0.001
7	0.927	0.001	0.925	0.001	0.926	0.001	0.926	0.001
8	0.930	0.001	0.929	0.001	0.930	0.001	0.930	0.001
9	0.932	0.001	0.930	0.001	0.930	0.001	0.931	0.001

En el cuadro anterior se muestran los distintos valores de densidad de los lotes de aceite usado de frituras recibidos, junto a su respectiva incertidumbre, registrado todo en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 32 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 1, 37 y 38.

**Cuadro 58.** Molaridad estandarizada de la solución de KOH a emplear para la determinación del número ácido del aceite usado de frituras

Lote	Molaridad sol. KOH (M)	Incertidumbre (M)
1	0.100	0.001
2	0.067	0.001
3	0.067	0.001
4	0.067	0.001
5	0.102	0.001
6	0.102	0.001
7	0.102	0.001
8	0.098	0.001
9	0.098	0.001

En el cuadro anterior se muestran las distintas molaridades estandarizadas de solución de KOH empleadas para la determinación del número de ácido de los lotes aceite usado de frituras junto a sus incertidumbres. Se emplearon los datos del Cuadro 33 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 2, 37 y 38.

**Cuadro 59.** Número ácido del aceite usado de frituras

Lote	Número ácido (mg KOH/g aceite)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.409	0.034	0.409	0.034	0.409	0.034	0.409	0.034
2	0.584	0.044	0.584	0.044	0.292	0.025	0.486	0.038
3	0.271	0.023	0.542	0.041	0.271	0.023	0.362	0.029
4	0.546	0.041	0.546	0.041	0.820	0.059	0.637	0.047
5	0.206	0.020	0.413	0.035	0.413	0.035	0.344	0.030
6	0.414	0.035	0.414	0.035	0.414	0.035	0.414	0.035
7	0.414	0.035	0.414	0.035	0.455	0.038	0.428	0.036
8	0.788	0.059	0.788	0.059	0.394	0.033	0.657	0.051
9	0.787	0.059	0.394	0.033	0.787	0.059	0.656	0.051

En el cuadro anterior se muestra el número ácido de los distintos lotes de aceite usado de frituras, junto con su incertidumbre, todo registrado en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 34 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 3, 37 y 38.

**Cuadro 60.** Porcentaje de ácidos grasos libres del aceite usado de frituras

Lote	Ácidos grasos libres (%AGL)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.81	0.034	0.813	0.034	0.813	0.034	0.813	0.034
2	1.16	0.044	1.161	0.044	0.580	0.025	0.967	0.038
3	0.54	0.023	1.079	0.041	0.540	0.023	0.719	0.029
4	1.09	0.041	1.087	0.041	1.631	0.059	1.268	0.047
5	0.41	0.020	0.821	0.035	0.821	0.035	0.684	0.030
6	0.82	0.035	0.824	0.035	0.824	0.035	0.824	0.035
7	0.82	0.035	0.823	0.035	0.823	0.035	0.823	0.035
8	1.57	0.059	1.567	0.059	0.784	0.033	1.306	0.051
9	1.57	0.059	0.783	0.033	1.566	0.059	1.305	0.051

En el cuadro anterior se puede observar los porcentajes de ácidos grasos libres de los distintos lotes de aceite usado de frituras junto con su incertidumbre, todo registrado en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 34 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 4, 37 y 38.

**Cuadro 61.** Viscosidad cinemática del aceite usado de frituras empleando un viscosímetro de Ostwald

Lote	Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	35.73	1.41	37.36	1.41	36.40	1.41	36.50	1.41
2	40.43	1.41	42.15	1.41	43.11	1.41	41.90	1.41
3	38.61	1.41	38.03	1.41	35.06	1.41	37.23	1.41
4	35.35	1.41	37.65	1.41	41.77	1.41	38.26	1.41
5	32.28	1.41	32.00	1.41	30.66	1.41	31.65	1.41
6	33.82	1.41	32.48	1.41	35.25	1.41	33.85	1.41
7	43.01	1.41	43.59	1.41	44.16	1.41	43.59	1.41
8	41.10	1.41	45.51	1.41	42.15	1.41	42.92	1.41
9	38.42	1.41	35.93	1.41	41.96	1.41	38.77	1.41

En el cuadro anterior se puede observar los distintos valores de viscosidad cinemática para el aceite usado de frituras, todo registrado en triplicado mediante un viscosímetro de Ostwald. Se emplearon los datos del Cuadro 35 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 5, 37 y 38.

**Cuadro 62.** Índice de refracción promedio del aceite usado de frituras

Lote	Índice de refracción nD	
	Promedio	Incert.
1	1.46697	0.00001
2	1.46774	0.00001
3	1.46692	0.00001
4	1.46692	0.00001

5	1.46742	0.00001
6	1.46754	0.00001
7	1.46772	0.00001
8	1.46673	0.00001
9	1.46632	0.00001

En el cuadro anterior se puede observar los valores promedio del índice de refracción de junto con su incertidumbre para el aceite usado de frituras. Se emplearon los datos del Cuadro 36 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 35, 37 y 38.

**Cuadro 63.** Humedad por gramo de aceite usado de frituras

Lote	Humedad ( %/g aceite)	
	Promedio	Incert.
1	0.33	0.01
2	0.30	0.01
3	0.37	0.01
4	0.45	0.01
5	0.17	0.02
6	0.13	0.01
7	0.20	0.01
8	0.30	0.01
9	0.23	0.02

En el cuadro anterior se puede observar la humedad por gramo de aceite usado de fritura promedio junto a la incertidumbre de cada una de las mediciones. Se emplearon los datos del Cuadro 37 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 35, 37 y 38.

**Cuadro 64.** Materia polar total promedio del aceite usado de frituras

Lote	TPM ( %)	
	Promedio	Incert.
1	13.6	0.1
2	22.1	0.1
3	11.2	0.1
4	15.5	0.1
5	13.3	0.1
6	14.8	0.1
7	14.6	0.1
8	13.3	0.1
9	14.6	0.1

En el cuadro anterior se puede observar la materia polar promedio del aceite usado de fritura promedio junto a la incertidumbre de cada una de las mediciones. Se emplearon los datos del Cuadro 38 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 35, 37 y 38.

**Cuadro 65.** Densidad del biodiésel con etanol

PE	Densidad (g/mL)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.868	0.001	0.877	0.001	0.877	0.001	0.874	0.001
2	0.875	0.001	0.878	0.001	0.880	0.001	0.878	0.001
3	0.873	0.001	0.878	0.001	0.878	0.001	0.876	0.001
4	0.865	0.001	0.870	0.001	0.871	0.001	0.869	0.001
5	0.868	0.001	0.872	0.001	0.873	0.001	0.871	0.001
6	0.865	0.001	0.870	0.001	0.870	0.001	0.868	0.001
7	0.863	0.001	0.872	0.001	0.871	0.001	0.869	0.001
8	0.862	0.001	0.869	0.001	0.869	0.001	0.867	0.001
9	0.868	0.001	0.871	0.001	0.872	0.001	0.871	0.001
10	0.863	0.001	0.867	0.001	0.867	0.001	0.865	0.001
11	0.873	0.001	0.877	0.001	0.877	0.001	0.876	0.001
12	0.871	0.001	0.875	0.001	0.875	0.001	0.874	0.001
13	0.865	0.001	0.869	0.001	0.870	0.001	0.868	0.001
14	0.870	0.001	0.874	0.001	0.874	0.001	0.873	0.001
15	0.839	0.001	0.888	0.001	0.887	0.001	0.871	0.001
16	0.860	0.001	0.865	0.001	0.865	0.001	0.863	0.001
17	0.867	0.001	0.871	0.001	0.872	0.001	0.870	0.001
18	0.870	0.001	0.874	0.001	0.875	0.001	0.873	0.001
19	0.855	0.001	0.859	0.001	0.859	0.001	0.857	0.001
20	0.873	0.001	0.877	0.001	0.878	0.001	0.876	0.001

En el cuadro anterior se muestran los distintos valores de densidad de los lotes biodiésel con etanol, junto a su respectiva incertidumbre, registrado todo en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 39 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 1, 37 y 38.

**Cuadro 66.** Molaridad estandarizada de la solución de KOH a emplear para la determinación del número ácido del biodiésel con etanol

PE	Molaridad sol. KOH (M)	Incertidumbre (M)
1	0.100	0.001
2	0.067	0.001
3	0.067	0.001
4	0.067	0.001
5	0.102	0.001
6	0.102	0.001
7	0.102	0.001
8	0.098	0.001
9	0.098	0.001
10	0.099	0.001
11	0.099	0.001

12	0.099	0.001
13	0.099	0.001
14	0.102	0.001
15	0.102	0.002
16	0.102	0.002
17	0.096	0.002
18	0.096	0.002
19	0.096	0.002
20	0.096	0.002

En el cuadro anterior se muestran las distintas molaridades estandarizadas de solución de KOH empleadas para la determinación del número de ácido de biodiésel con etanol junto a sus incertidumbres. Se emplearon los datos del Cuadro 40 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 2, 37 y 38.

**Cuadro 67.** Número ácido del biodiésel con etanol

PE	Número ácido (mg KOH/g biodiésel)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.299	0.027	0.342	0.030	0.299	0.027	0.314	0.028
2	0.118	0.012	0.121	0.012	0.115	0.011	0.118	0.012
3	0.230	0.020	0.230	0.020	0.259	0.022	0.239	0.021
4	0.087	0.009	0.116	0.011	0.087	0.009	0.097	0.010
5	0.220	0.021	0.176	0.017	0.220	0.021	0.205	0.020
6	0.397	0.034	0.397	0.034	0.442	0.037	0.412	0.035
7	0.309	0.028	0.353	0.031	0.353	0.031	0.338	0.030
8	0.423	0.036	0.380	0.033	0.423	0.036	0.409	0.035
9	0.379	0.032	0.379	0.032	0.379	0.032	0.379	0.032
10	0.171	0.017	0.171	0.017	0.128	0.013	0.156	0.016
11	0.422	0.035	0.464	0.038	0.380	0.033	0.422	0.035
12	0.338	0.030	0.380	0.033	0.338	0.030	0.352	0.031
13	0.128	0.013	0.085	0.009	0.128	0.013	0.113	0.012
14	0.350	0.031	0.307	0.027	0.263	0.024	0.307	0.027
15	0.395	0.034	0.351	0.031	0.351	0.031	0.366	0.032
16	0.310	0.028	0.266	0.025	0.266	0.025	0.280	0.026
17	0.207	0.020	0.166	0.017	0.166	0.017	0.180	0.018
18	0.248	0.023	0.207	0.020	0.248	0.023	0.234	0.022
19	0.168	0.017	0.084	0.009	0.126	0.013	0.126	0.013
20	0.165	0.016	0.165	0.016	0.124	0.013	0.151	0.015

En el cuadro anterior se muestra el número ácido del biodiésel con etanol, junto con su incertidumbre, todo registrado en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 41 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 3, 37 y 38.

**Cuadro 68.** Porcentaje de ácidos grasos libres del biodiésel con etanol

PE	Ácidos grasos libres (%AGL)							
	No. 1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.60	0.027	0.681	0.030	0.596	0.027	0.624	0.028
2	0.23	0.012	0.240	0.012	0.228	0.011	0.234	0.012
3	0.46	0.020	0.457	0.020	0.514	0.022	0.476	0.021
4	0.17	0.009	0.231	0.011	0.173	0.009	0.192	0.010
5	0.44	0.021	0.350	0.017	0.438	0.021	0.408	0.020
6	0.79	0.034	0.790	0.034	0.878	0.037	0.820	0.035
7	0.61	0.028	0.702	0.031	0.702	0.031	0.673	0.030
8	0.84	0.036	0.757	0.033	0.841	0.036	0.813	0.035
9	0.75	0.032	0.753	0.032	0.753	0.032	0.753	0.032
10	0.34	0.017	0.340	0.017	0.255	0.013	0.311	0.016
11	0.84	0.035	0.923	0.038	0.755	0.033	0.839	0.035
12	0.67	0.030	0.757	0.033	0.673	0.030	0.701	0.031
13	0.25	0.013	0.169	0.009	0.254	0.013	0.226	0.012
14	0.70	0.031	0.610	0.027	0.523	0.024	0.610	0.027
15	0.79	0.034	0.698	0.031	0.698	0.031	0.727	0.032
16	0.62	0.028	0.528	0.025	0.528	0.025	0.558	0.026
17	0.41	0.020	0.330	0.017	0.330	0.017	0.358	0.018
18	0.49	0.023	0.411	0.020	0.493	0.023	0.466	0.022
19	0.33	0.017	0.167	0.009	0.251	0.013	0.251	0.013
20	0.33	0.016	0.328	0.016	0.246	0.013	0.301	0.015

En el cuadro anterior se puede observar los porcentajes de ácidos grasos libres de las muestras de biodiésel con etanol junto con su incertidumbre, todo registrado en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 41 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 4, 37 y 38.

**Cuadro 69.** Viscosidad cinemática del biodiésel con etanol empleando un viscosímetro de Ostwald

PE	Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	4.12	0.71	4.79	0.71	4.41	0.71	4.44	0.71
2	4.98	0.71	4.89	0.71	4.69	0.71	4.85	0.71
3	4.50	0.71	4.89	0.71	5.08	0.71	4.82	0.71
4	4.12	0.71	4.79	0.71	4.79	0.71	4.57	0.71
5	4.41	0.71	4.89	0.71	4.69	0.71	4.66	0.71
6	4.41	0.71	4.89	0.71	4.69	0.71	4.66	0.71
7	4.22	0.71	4.50	0.71	4.98	0.71	4.57	0.71
8	4.89	0.71	4.50	0.71	4.31	0.71	4.57	0.71
9	4.69	0.71	4.60	0.71	4.41	0.71	4.57	0.71

10	4.41	0.71	4.41	0.71	4.98	0.71	4.60	0.71
11	4.79	0.71	4.31	0.71	4.31	0.71	4.47	0.71
12	4.41	0.71	4.50	0.71	4.60	0.71	4.50	0.71
13	5.08	0.71	4.60	0.71	4.50	0.71	4.73	0.71
14	4.12	0.71	4.12	0.71	4.89	0.71	4.37	0.71
15	4.89	0.71	4.89	0.71	4.31	0.71	4.69	0.71
16	4.69	0.71	4.22	0.71	4.50	0.71	4.47	0.71
17	4.69	0.71	4.12	0.71	4.69	0.71	4.50	0.71
18	4.79	0.71	4.98	0.71	5.08	0.71	4.95	0.71
19	4.50	0.71	4.12	0.71	4.31	0.71	4.31	0.71
20	4.41	0.71	4.79	0.71	4.12	0.71	4.44	0.71

En el cuadro anterior se puede observar los distintos valores de viscosidad cinemática para el biodiésel con etanol, todo registrado en triplicado mediante un viscosímetro de Ostwald. Se emplearon los datos del Cuadro 42 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 5, 37 y 38.

**Cuadro 70.** Índice de refracción promedio del biodiésel con etanol

PE	Índice de refracción nD	
	Promedio	Incert.
1	1.45430	0.00001
2	1.45268	0.00001
3	1.45534	0.00001
4	1.45040	0.00001
5	1.44853	0.00001
6	1.45070	0.00001
7	1.45320	0.00001
8	1.44961	0.00001
9	1.44992	0.00001
10	1.44784	0.00001
11	1.45025	0.00001
12	1.45228	0.00001
13	1.45516	0.00001
14	1.45464	0.00001
15	1.45170	0.00001
16	1.45220	0.00001
17	1.45329	0.00001
18	1.44956	0.00001
19	1.45069	0.00001
20	1.45391	0.00001

En el cuadro anterior se puede observar los valores promedio del índice de refracción de junto con su incertidumbre para el biodiésel con etanol. Se emplearon los datos del Cuadro 43 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 35, 37 y 38.

**Cuadro 71.** Humedad por gramo del biodiésel con etanol

PE	Humedad ( %/g BD)	
	Promedio	Incert.
1	0.09	0.01
2	0.06	0.01
3	0.05	0.05
4	0.11	0.01
5	0.12	0.01
6	0.06	0.01
7	0.07	0.07
8	0.11	0.01
9	0.11	0.01
10	0.07	0.01
11	0.07	0.01
12	0.08	0.01
13	0.08	0.02
14	0.03	0.01
15	0.07	0.02
16	0.08	0.01
17	0.09	0.01
18	0.12	0.01
19	0.07	0.01
20	0.13	0.01

En el cuadro anterior se puede observar la humedad por gramo de aceite usado de fritura promedio junto a la incertidumbre de cada una de las mediciones. Se emplearon los datos del Cuadro 44 para la obtención de los valores y se hizo uso del Cálculo 35.

**Cuadro 72.** Densidad del biodiésel con metanol

PE	Densidad (g/mL)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.860	0.001	0.870	0.001	0.896	0.001	0.875	0.001
2	0.869	0.001	0.866	0.001	0.872	0.001	0.869	0.001
3	0.895	0.001	0.901	0.001	0.892	0.001	0.896	0.001
4	0.864	0.001	0.876	0.001	0.871	0.001	0.870	0.001
5	0.889	0.001	0.903	0.001	0.853	0.001	0.882	0.001
6	0.903	0.001	0.877	0.001	0.859	0.001	0.880	0.001
7	0.869	0.001	0.863	0.001	0.906	0.001	0.879	0.001
8	0.882	0.001	0.871	0.001	0.898	0.001	0.883	0.001
9	0.890	0.001	0.881	0.001	0.884	0.001	0.885	0.001
10	0.868	0.001	0.854	0.001	0.879	0.001	0.867	0.001
11	0.893	0.001	0.872	0.001	0.883	0.001	0.882	0.001
12	0.864	0.001	0.862	0.001	0.879	0.001	0.868	0.001

13	0.898	0.001	0.859	0.001	0.854	0.001	0.870	0.001
14	0.902	0.001	0.858	0.001	0.863	0.001	0.874	0.001
15	0.869	0.001	0.854	0.001	0.883	0.001	0.868	0.001
16	0.887	0.001	0.877	0.001	0.899	0.001	0.888	0.001
17	0.871	0.001	0.878	0.001	0.861	0.001	0.870	0.001
18	0.866	0.001	0.901	0.001	0.881	0.001	0.883	0.001
19	0.855	0.001	0.893	0.001	0.862	0.001	0.870	0.001
20	0.870	0.001	0.894	0.001	0.882	0.001	0.882	0.001

En el cuadro anterior se muestran los distintos valores de densidad del biodiésel con metanol, junto a su respectiva incertidumbre, registrado todo en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 46 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 1, 37 y 38.

**Cuadro 73.** Molaridad estandarizada de la solución de KOH a emplear para la determinación del número ácido del biodiésel con metanol

PE	Molaridad sol. KOH (M)	Incertidumbre (M)
1	0.100	0.001
2	0.067	0.001
3	0.067	0.001
4	0.067	0.001
5	0.102	0.001
6	0.102	0.001
7	0.102	0.001
8	0.098	0.001
9	0.098	0.001
10	0.099	0.001
11	0.099	0.001
12	0.099	0.001
13	0.099	0.001
14	0.102	0.001
15	0.102	0.002
16	0.102	0.002
17	0.096	0.002
18	0.096	0.002
19	0.096	0.002
20	0.096	0.002

En el cuadro anterior se muestran las distintas molaridades estandarizadas de solución de KOH empleadas para la determinación del número de ácido del biodiésel con metanol junto a sus incertidumbres. Se emplearon los datos del Cuadro 47 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 2, 37 y 38.

**Cuadro 74.** Número ácido del biodiésel con metanol

PE	Número ácido (mg KOH/g biodiésel)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.043	0.005	0.043	0.005	0.085	0.009	0.057	0.006
2	0.061	0.006	0.067	0.007	0.070	0.007	0.066	0.007
3	0.225	0.020	0.197	0.018	0.197	0.018	0.206	0.018
4	0.145	0.014	0.145	0.014	0.203	0.018	0.164	0.015
5	0.087	0.009	0.130	0.013	0.130	0.013	0.116	0.012
6	0.218	0.021	0.305	0.027	0.305	0.027	0.276	0.025
7	0.087	0.009	0.087	0.009	0.044	0.005	0.073	0.008
8	0.207	0.020	0.166	0.016	0.166	0.016	0.180	0.017
9	0.166	0.016	0.166	0.016	0.124	0.013	0.152	0.015
10	0.128	0.013	0.043	0.005	0.043	0.005	0.071	0.008
11	0.251	0.023	0.251	0.023	0.209	0.020	0.237	0.022
12	0.043	0.005	0.043	0.005	0.085	0.009	0.057	0.006
13	0.042	0.005	0.042	0.005	0.127	0.013	0.071	0.008
14	0.131	0.013	0.131	0.013	0.044	0.005	0.102	0.011
15	0.044	0.005	0.044	0.005	0.088	0.010	0.059	0.007
16	0.215	0.021	0.258	0.024	0.301	0.027	0.258	0.024
17	0.166	0.017	0.124	0.013	0.041	0.005	0.111	0.011
18	0.164	0.016	0.245	0.023	0.245	0.023	0.218	0.021
19	0.249	0.023	0.249	0.023	0.332	0.029	0.277	0.025
20	0.205	0.020	0.164	0.016	0.245	0.023	0.205	0.020

En el cuadro anterior se muestra el número ácido de los distintos lotes de aceite usado de frituras, junto con su incertidumbre, todo registrado en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 48 para la obtención de los valores y se hizo uso los Cálculos 3, 37 y 38.

**Cuadro 75.** Porcentaje de ácidos grasos libres del biodiésel con metanol

PE	Ácidos grasos libres ( %AGL)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	0.08	0.005	0.085	0.005	0.170	0.009	0.113	0.006
2	0.12	0.006	0.133	0.007	0.138	0.007	0.131	0.007
3	0.45	0.020	0.391	0.018	0.391	0.018	0.410	0.018
4	0.29	0.014	0.288	0.014	0.403	0.018	0.326	0.015
5	0.17	0.009	0.259	0.013	0.259	0.013	0.231	0.012
6	0.43	0.021	0.606	0.027	0.606	0.027	0.549	0.025
7	0.17	0.009	0.173	0.009	0.087	0.005	0.144	0.008
8	0.41	0.020	0.330	0.016	0.330	0.016	0.357	0.017
9	0.33	0.016	0.329	0.016	0.247	0.013	0.302	0.015
10	0.25	0.013	0.085	0.005	0.085	0.005	0.141	0.008
11	0.50	0.023	0.500	0.023	0.416	0.020	0.472	0.022
12	0.08	0.005	0.085	0.005	0.169	0.009	0.113	0.006

13	0.08	0.005	0.084	0.005	0.253	0.013	0.141	0.008
14	0.26	0.013	0.261	0.013	0.087	0.005	0.203	0.011
15	0.09	0.005	0.088	0.005	0.175	0.010	0.117	0.007
16	0.43	0.021	0.514	0.024	0.600	0.027	0.514	0.024
17	0.33	0.017	0.248	0.013	0.083	0.005	0.220	0.011
18	0.33	0.016	0.488	0.023	0.488	0.023	0.434	0.021
19	0.50	0.023	0.495	0.023	0.660	0.029	0.550	0.025
20	0.41	0.020	0.326	0.016	0.488	0.023	0.407	0.020

En el cuadro anterior se puede observar los porcentajes de ácidos grasos libres del biodiésel con metanol junto con su incertidumbre, todo registrado en triplicado. Se emplearon los datos del Cuadro 48 para la obtención de los valores y se hizo uso los Cálculos 4, 37 y 38.

**Cuadro 76.** Viscosidad cinemática del biodiésel con metanol empleando un viscosímetro de Ostwald

PE	Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)							
	No.1	Incert.	No.2	Incert.	No.3	Incert.	Promedio	Incert.
1	3.16	0.71	2.59	0.71	2.49	0.71	2.75	0.71
2	2.87	0.71	2.97	0.71	2.78	0.71	2.87	0.71
3	3.35	0.71	2.87	0.71	2.87	0.71	3.03	0.71
4	2.78	0.71	2.97	0.71	2.78	0.71	2.84	0.71
5	3.26	0.71	3.07	0.71	3.26	0.71	3.19	0.71
6	2.49	0.71	3.35	0.71	2.87	0.71	2.91	0.71
7	2.87	0.71	2.68	0.71	3.26	0.71	2.94	0.71
8	2.78	0.71	2.59	0.71	3.16	0.71	2.84	0.71
9	2.40	0.71	3.16	0.71	2.97	0.71	2.84	0.71
10	2.49	0.71	2.68	0.71	2.68	0.71	2.62	0.71
11	2.49	0.71	2.49	0.71	2.40	0.71	2.46	0.71
12	2.59	0.71	3.26	0.71	2.59	0.71	2.81	0.71
13	2.40	0.71	2.40	0.71	3.35	0.71	2.71	0.71
14	2.40	0.71	2.78	0.71	2.68	0.71	2.62	0.71
15	2.87	0.71	3.26	0.71	3.35	0.71	3.16	0.71
16	3.35	0.71	2.78	0.71	3.16	0.71	3.10	0.71
17	2.87	0.71	3.16	0.71	2.59	0.71	2.87	0.71
18	2.87	0.71	2.68	0.71	2.78	0.71	2.78	0.71
19	3.16	0.71	2.59	0.71	3.16	0.71	2.97	0.71
20	2.59	0.71	3.26	0.71	2.49	0.71	2.78	0.71

En el Cuadro anterior se puede observar los distintos valores de viscosidad cinemática para el biodiésel con metanol, todo registrado en triplicado mediante un viscosímetro de Ostwald. Se emplearon los datos del Cuadro 48 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 5, 37 y 38.

**Cuadro 77.** Índice de refracción promedio del biodiésel con metanol

PE	Índice de refracción nD	
	Promedio	Incert.
1	1.45190	0.00001
2	1.45047	0.00001
3	1.44947	0.00001
4	1.44912	0.00001
5	1.45103	0.00001
6	1.45066	0.00001
7	1.45117	0.00001
8	1.44682	0.00001
9	1.44835	0.00001
10	1.44691	0.00001
11	1.44729	0.00001
12	1.44923	0.00001
13	1.44992	0.00001
14	1.44940	0.00001
15	1.44836	0.00001
16	1.44882	0.00001
17	1.45092	0.00001
18	1.45083	0.00001
19	1.44732	0.00001
20	1.45225	0.00001

En el cuadro anterior se puede observar los valores promedio del índice de refracción de junto con su incertidumbre para el biodiésel con metanol. Se emplearon los datos del Cuadro 50 para la obtención de los valores y se hizo uso los Cálculos 35, 37 y 38.

**Cuadro 78.** Humedad por gramo del biodiésel con metanol

PE	Humedad ( %/g BD)	
	Promedio	Incert.
1	0.07	0.01
2	0.04	0.01
3	0.05	0.02
4	0.08	0.01
5	0.10	0.01
6	0.02	0.02
7	0.08	0.01
8	0.06	0.01
9	0.06	0.02
10	0.07	0.02
11	0.04	0.01
12	0.10	0.01

13	0.06	0.01
14	0.06	0.01
15	0.06	0.01
16	0.10	0.01
17	0.06	0.01
18	0.06	0.01
19	0.05	0.01
20	0.04	0.02

En el cuadro anterior se puede observar la humedad por gramo de biodiésel con metanol promedio junto a la incertidumbre de cada una de las mediciones. Se emplearon los datos del Cuadro 51 para la obtención de los valores y se hizo uso los Cálculos 35, 37 y 38.

**Cuadro 79.** Masas estequiométricas teóricas de reactivos y productos para la producción de biodiésel con etanol y metanol

PE	Masa (g)									
	Aceite	Etanol	Metanol	NaOH AGL	NaOH total	H <sub>2</sub> O	NaCl	Ácido acético	BD	Glicerina
1	100.0	42.0	29.2	0.023	1.523	60.0	6.0	2.8	100.0	10.5
2	100.0	31.5	21.9	0.023	0.523	60.0	6.0	1.3	100.0	10.5
3	100.0	36.8	25.6	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
4	100.0	31.5	21.9	0.023	0.523	60.0	6.0	1.3	100.0	10.5
5	100.0	36.8	25.6	0.023	0.523	60.0	6.0	1.3	100.0	10.5
6	100.0	36.8	25.6	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
7	100.0	36.8	25.6	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
8	100.0	36.8	25.6	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
9	100.0	31.5	21.9	0.023	1.523	60.0	6.0	2.8	100.0	10.5
10	100.0	42.0	29.2	0.023	1.523	60.0	6.0	2.8	100.0	10.5
11	100.0	36.8	25.6	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
12	100.0	42.0	29.2	0.023	0.523	60.0	6.0	1.3	100.0	10.5
13	100.0	31.5	21.9	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
14	100.0	36.8	25.6	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
15	100.0	42.0	29.2	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
16	100.0	36.8	25.6	0.023	1.523	60.0	6.0	2.8	100.0	10.5
17	100.0	31.5	21.9	0.023	1.523	60.0	6.0	2.8	100.0	10.5
18	100.0	36.8	25.6	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
19	100.0	36.8	25.6	0.023	1.023	60.0	6.0	2.0	100.0	10.5
20	100.0	42.0	29.2	0.023	0.523	60.0	6.0	1.3	100.0	10.5

En el cuadro anterior se presentan las masas calculadas de cada componente utilizado en la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel con etanol y metanol, así como la masa teórica de productos a obtener. Las cantidades se calcularon a partir de las 20 combinaciones del diseño experimental y representan los valores estequiométricos teóricos para cada ensayo. Se emplearon los datos del Cuadro 53 y Cuadro 61 para la obtención de los valores y se hizo uso de los Cálculos 6, 7, 14 y 15.

**Cuadro 80.** Rendimiento de biodiésel producido con etanol y con metanol

PE	Rendimiento ( %)	
	BD EtOH	BD MetOH
1	82.7 %	90.5 %
2	64.5 %	84.1 %
3	85.3 %	93.0 %
4	59.4 %	79.8 %
5	71.6 %	85.7 %
6	85.8 %	94.0 %
7	86.4 %	93.8 %
8	84.7 %	92.9 %
9	79.1 %	91.0 %
10	87.5 %	95.0 %
11	87.9 %	94.7 %
12	63.1 %	82.5 %
13	76.0 %	88.4 %
14	81.9 %	91.5 %
15	83.7 %	92.2 %
16	88.2 %	94.5 %
17	77.2 %	86.7 %
18	85.6 %	93.1 %
19	86.3 %	93.6 %
20	69.2 %	87.9 %

En el cuadro anterior se presentan los rendimientos de la producción de biodiésel producido con etanol y metanol. Se realizó un ensayo por cada combinación del diseño experimental. Se emplearon los datos del Cuadro 54 y 55 para la obtención de los valores y se hizo uso del Cálculo 34.

**Cuadro 81.** Pruebas T para la comparación de rendimientos de biodiésel con etanol y metanol

Comparación	Valor-p (< 0.05)		Resultado
	Prueba T Pareada	Prueba T Independiente	
Rendimiento EtOH vs MetOH	4.23E-09	2.13E-05	Diferencia significativa

En el cuadro anterior se presentan los resultados de las pruebas T (pareada e independiente) utilizadas para evaluar si existen diferencias significativas en los rendimientos de biodiésel producido con etanol y metanol. Valores-p menores a 0.05 indican que las diferencias observadas son estadísticamente significativas. Se emplearon los datos del Cuadro 80 para la obtención de los valores y se hizo uso del Cálculo 41 y 42.

**Cuadro 82.** Masas estequiométricas teóricas de reactivos y productos para la producción de biodiésel con etanol en el punto óptimo del modelo

Corrida	Masa (g)						
	Aceite	Etanol	NaOH AGL	NaOH total	H <sub>2</sub> O	NaCl	Ácido acético
1	100.0	37.8	0.023	1.313	60.0	6.0	2.4
2	100.0	37.8	0.023	1.313	60.0	6.0	2.4
3	100.0	37.8	0.023	1.313	60.0	6.0	2.4

En el cuadro anterior se presentan las masas estequiométricas teóricas de reactivos y productos. Incluye las cantidades de aceite, etanol, NaOH AGL, NaOH total, H<sub>2</sub>O, NaCl y ácido acético para la producción con etanol en el punto óptimo del modelo. Se emplearon los datos del Cuadro 60 para la obtención de los valores y se hizo uso del Cálculo 6, 7, 14 y 15.

**Cuadro 83.** Coeficientes del modelo cuadrático de rendimiento de biodiésel con etanol

Término	Factor	Coefficiente	Valor-p	Significancia (p < 0.1)
A	Relación alcohol:aceite (RM)	+ 82.88	< 0.0001	Muy significativo
B	Catalizador ( % m/m)	+ 61.51	< 0.0001	Muy significativo
C	Tiempo de reacción (min)	+ 0.53	< 0.0001	Muy significativo
AB	Interacción	+ 1.38	0.0274	Significativo
AC	Interacción	+ 0.02	0.0973	Significativo
BC	Interacción	-0.06	0.061	Significativo
A <sup>2</sup>	Término cuadrático	-6.00	< 0.0001	Muy significativo
B <sup>2</sup>	Término cuadrático	-23.78	< 0.0001	Muy significativo
C <sup>2</sup>	Término cuadrático	-0.0024	0.0642	Significativo
Intercepto	---	-289.73	---	---

En el cuadro anterior se presentan los coeficientes asociados a los factores principales, interacciones y términos cuadráticos del modelo ajustado para el rendimiento de biodiésel con etanol. Se incluye el valor-p y la significancia estadística de cada término para (p < 0.1). Se obtuvo del programa Design Expert.

**Cuadro 84.** Estadísticas de ajuste del modelo

Parámetro	Media	Desviación estándar	CV (%)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustado	R <sup>2</sup> Predicho
Modelo	79.3	0.7539	0.9506	0.9964	0.9931	0.9758

En el Cuadro anterior se presentan los principales indicadores estadísticos de ajuste del modelo, como la media, desviación estándar, coeficiente de variación y los coeficientes de determinación ajustado y predicho. Se obtuvo del programa Design Expert.

**Cuadro 85.** Diagnósticos del modelo cuadrático

Diagnóstico	Criterio	Resultado
Normalidad de residuos	Gráfico debe tener tendencia lineal	Cumple
Residuos vs predichos	No debe haber patrones visibles	Cumple
Relación señal a ruido	> 4 para modelos adecuados	54.59
Falta de ajuste	> 0.1 para modelos adecuados	0.267

En el cuadro anterior se presenta un resumen con los resultados de los gráficos de diagnóstico, incluyendo la normalidad de residuos, la relación residuos vs valores predichos, la relación señal-ruido y la falta de ajuste para determinar si el modelo es estadísticamente adecuado. Se obtuvo del programa Design Expert.

**Cuadro 86.** Punto óptimo del modelo cuadrático

Parámetro	Relación alcohol:aceite (RM)	Catalizador (% m/m)	Tiempo de reacción (min)
Valor óptimo del modelo	7.2:1	1.29	125.95

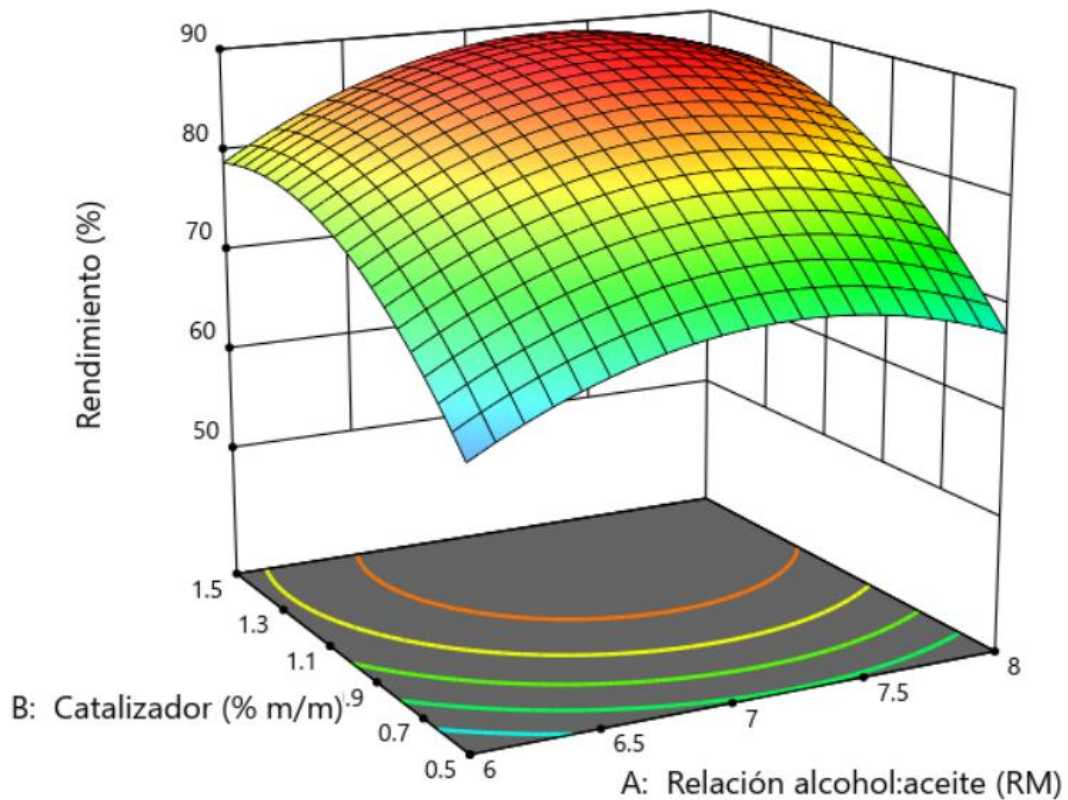
En el cuadro anterior se presentan los parámetros experimentales propuestos como punto óptimo para maximizar el rendimiento de biodiésel con etanol. Incluye los valores de relación molar alcohol:aceite, concentración de catalizador y tiempo de reacción, según el modelo cuadrático ajustado. Se obtuvo del programa Design Expert.

**Cuadro 87.** Validación del punto óptimo del modelo cuadrático para el rendimiento de biodiésel con etanol

Media (pred.)	Mediana (pred.)	Media (obs.)	D.E.	E.E.P.	IC al 95 %	Corridas
90.293	90.293	90.7	0.753861	0.590147	[88.97; 91.61]	3

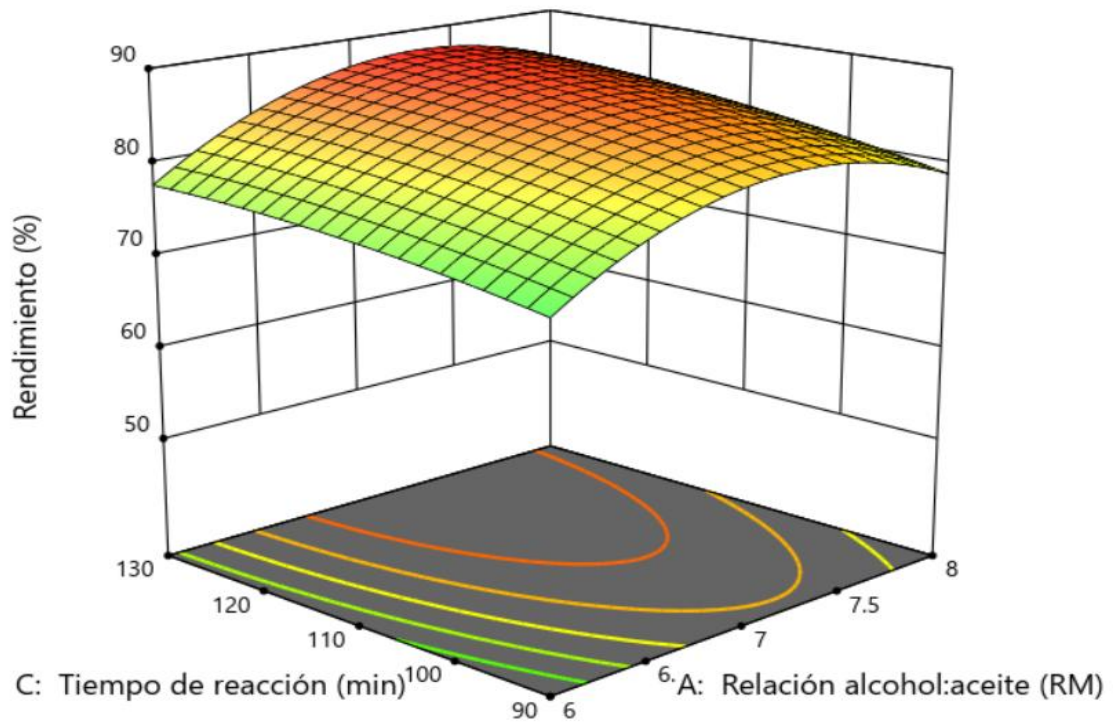
En el cuadro anterior se presentan los resultados de la validación experimental del punto óptimo propuesto por el modelo. Se muestran los valores observados y predichos del rendimiento junto con la desviación estándar (D.E.), el error estándar de predicción (E.E.P.) y el intervalo de confianza al 95 %. La cantidad de corridas corresponde al número de repeticiones experimentales realizadas para verificar la consistencia del modelo. Se obtuvo del programa Design Expert.

**Figura 26.** Superficie de respuesta del rendimiento de biodiésel con etanol en función de la relación molar alcohol:aceite y el porcentaje de catalizador



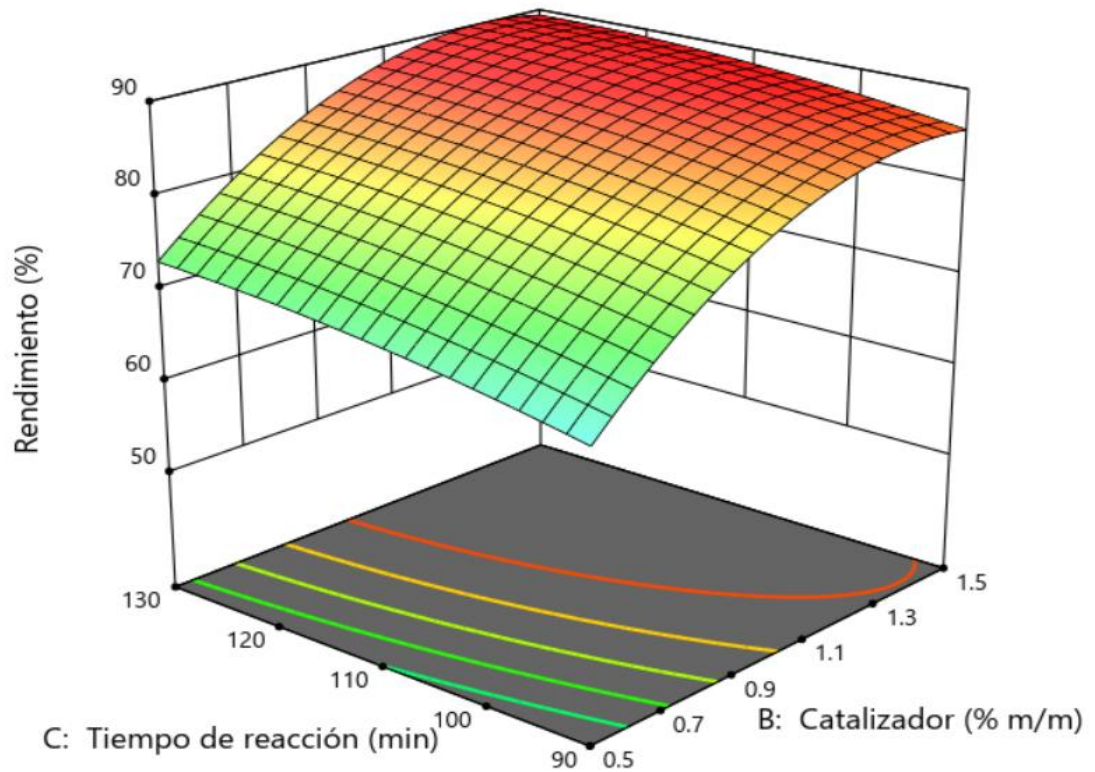
En la figura anterior se presenta una gráfica de superficie de respuesta hecha con Design Expert que representa el efecto combinado de la relación molar alcohol:aceite (RM) y el porcentaje de catalizador ( % m/m) en el rendimiento de biodiésel con etanol. Los colores indican diferentes niveles de rendimiento, donde el área roja corresponde al rendimiento más alto (~90 %) y las áreas en verde y azul corresponden a rendimientos más bajos. La representación incluye curvas de nivel proyectadas en la base de la gráfica para facilitar la visualización de las combinaciones óptimas de los factores.

**Figura 27.** Superficie de respuesta del rendimiento de biodiésel con etanol en función de la relación molar alcohol:aceite y el tiempo de reacción



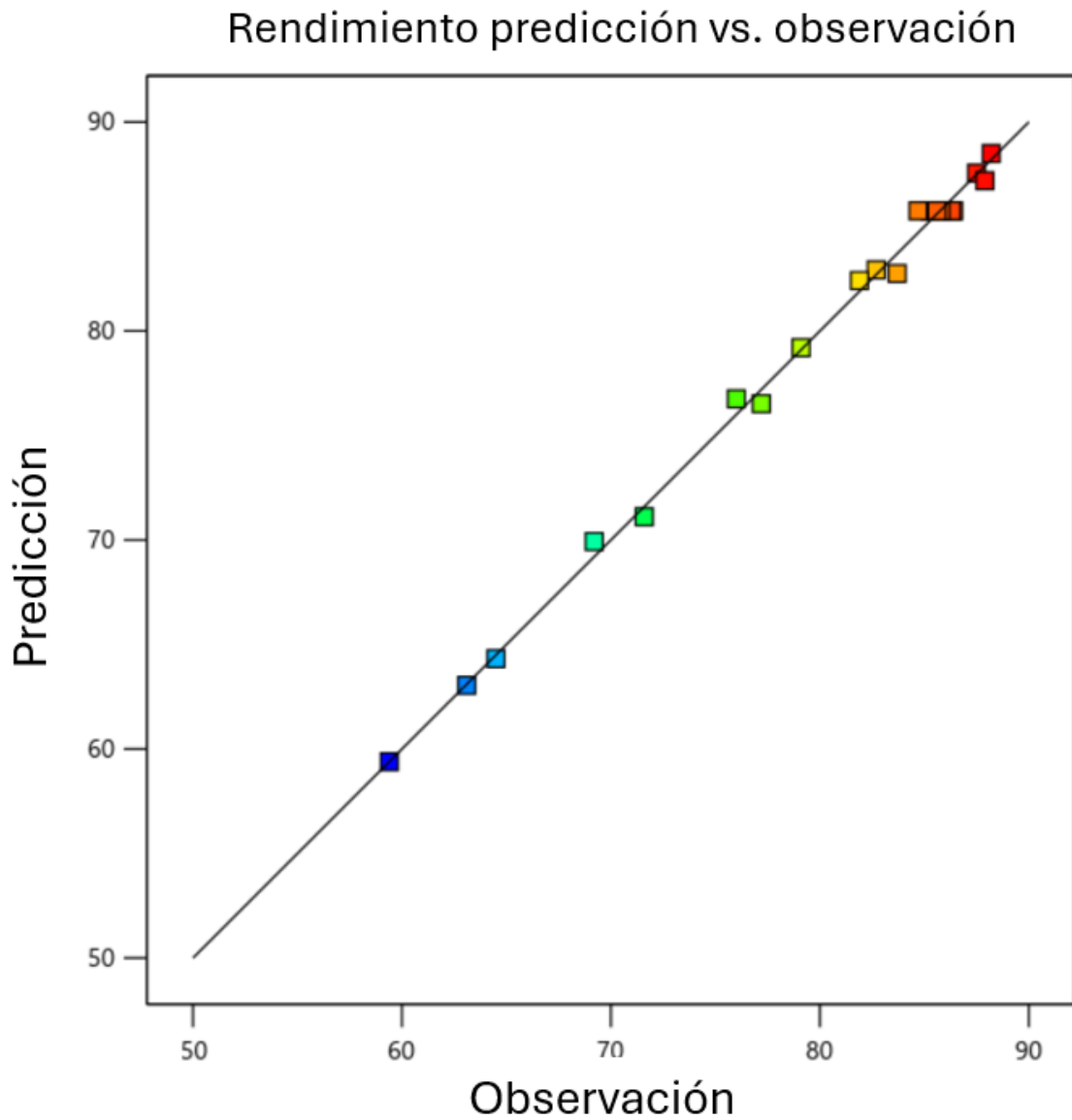
En la figura anterior se presenta una gráfica de superficie de respuesta hecha con Design Expert que representa el efecto combinado de la relación molar alcohol:aceite (RM) y el tiempo de reacción (min) sobre el rendimiento de biodiésel con etanol. Los colores reflejan los niveles de rendimiento, donde el área roja corresponde al rendimiento más alto (~90 %) y las áreas en verde y amarillo corresponden a rendimientos más bajos.

**Figura 28.** Superficie de respuesta del rendimiento de biodiésel con etanol en función del porcentaje de catalizador y el tiempo de reacción



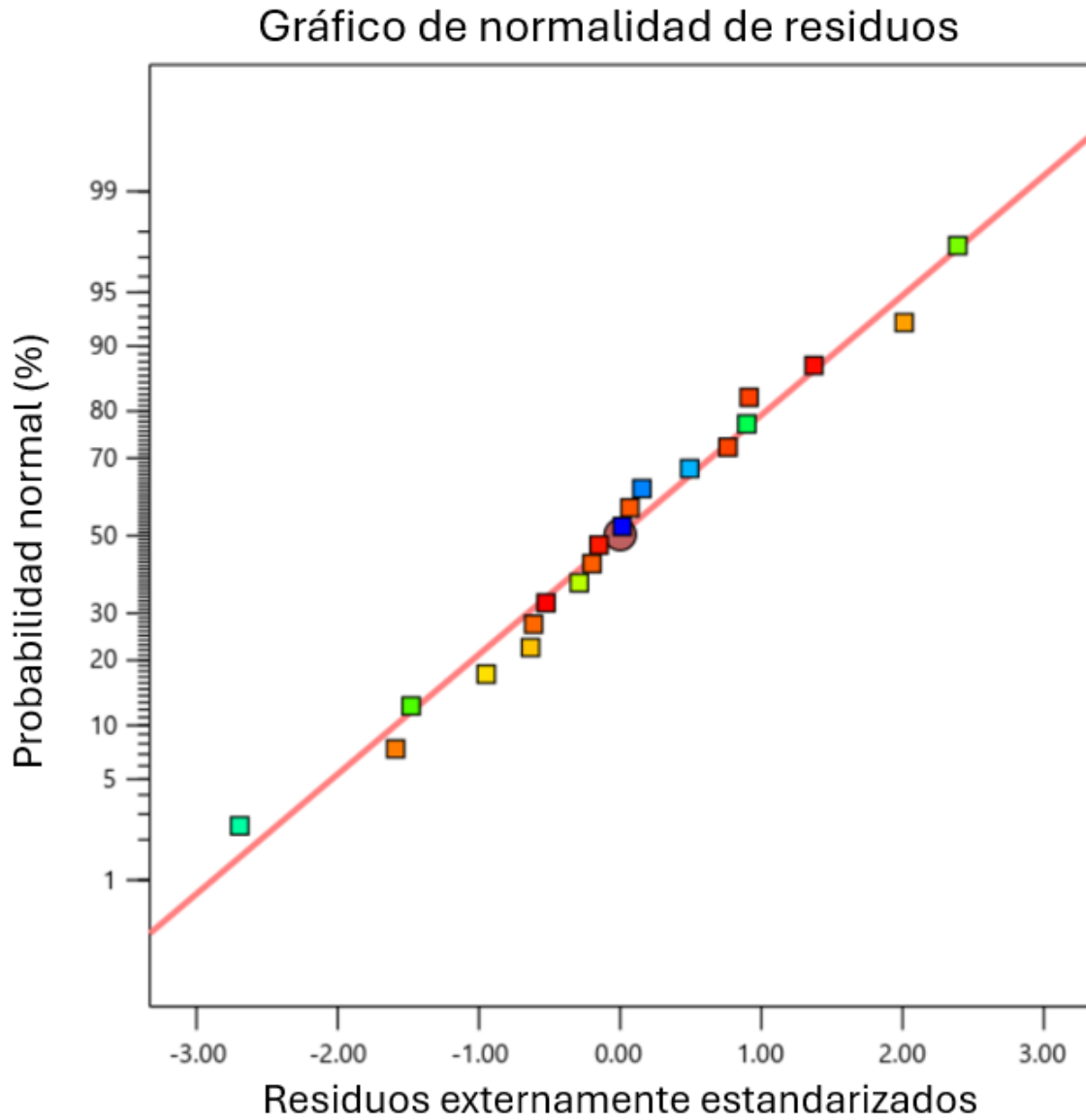
En la figura anterior se presenta una gráfica de superficie de respuesta hecha con Design Expert que representa el efecto combinado de la relación molar alcohol:aceite (RM) y el tiempo de reacción sobre el rendimiento de biodiésel con etanol. Los colores reflejan los niveles de rendimiento, donde el área roja corresponde al rendimiento más alto (~90 %) y las áreas en verde y amarillo corresponden a rendimientos más bajos.

**Figura 29.** Rendimientos predichos vs observados para el modelo cuadrático de biodiésel con etanol



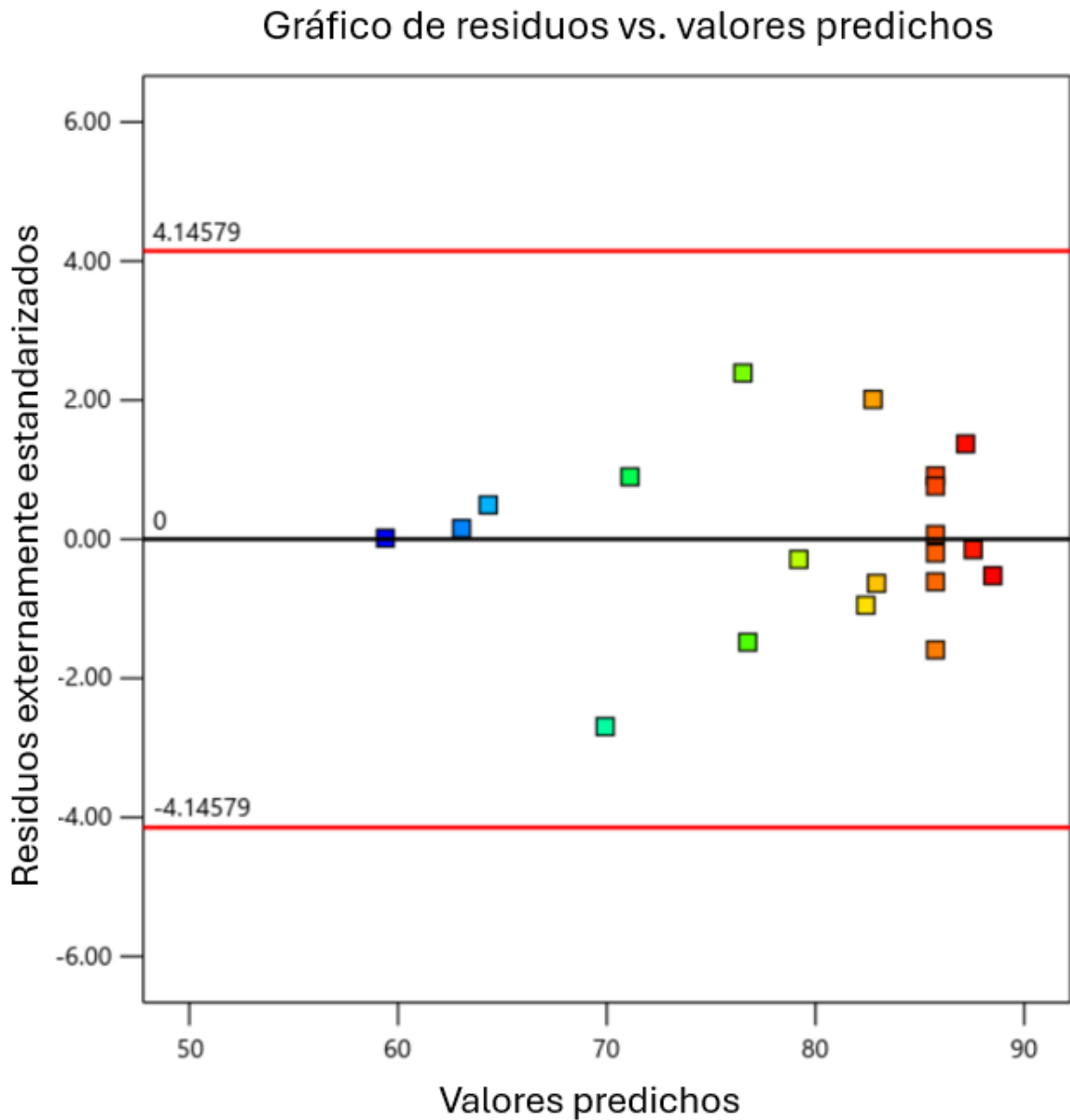
En la figura anterior se presenta la comparación entre los valores de rendimiento predichos por el modelo cuadrático y los valores experimentales observados. La línea diagonal representa el ajuste ideal y los puntos de colores representan las diferentes corridas experimentales. Fue realizada usando el programa Design Expert.

**Figura 30.** Gráfico de normalidad de residuos del modelo cuadrático de rendimiento de biodiésel con etanol



La gráfica anterior representa la comprobación de la normalidad de los residuos mediante un gráfico de probabilidad normal. Los puntos corresponden a los residuos estandarizados externos, y la línea roja diagonal muestra el comportamiento esperado si los residuos siguen una distribución normal. Fue realizada usando el programa Design Expert.

**Figura 31.** Gráfico de residuos vs valores predichos del modelo cuadrático de rendimiento de biodiésel con etanol



En la figura anterior se presenta la relación entre los residuos estandarizados y los valores predichos por el modelo cuadrático. La línea central negra corresponde al valor cero, y las líneas rojas superiores e inferiores marcan los límites de  $\pm 3$  unidades estandarizadas. Fue realizada usando el programa Design Expert.

## D. Análisis de error

**Cálculo 35.** Media de las mediciones de índice de refracción del aceite usado de frituras en triplicado

$$\bar{x} = \frac{1.46696 + 1.46696 + 1.46698}{3} = 1.46696$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la media de las tres mediciones de índice de refracción del lote 1 de aceite usado de frituras. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 53.

**Cálculo 36.** Desviación estándar de las mediciones del número ácido del aceite usado de frituras

$$= DESVEST.M(0.414; 0.414; 0.455) = 0.02$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la desviación estándar del número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 54.

**Cálculo 37.** Incertidumbre de sumas y restas para la densidad del lote 1 de aceite usado de frituras

$$u_c = \sqrt{0.001^2 + 0.001^2} = 0.001$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la incertidumbre de la densidad del lote 1 de aceite usado de frituras. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 55.

**Cálculo 38.** Incertidumbre en multiplicaciones y divisiones para la molaridad del lote 1 de aceite usado de frituras

$$u_y = 0.1 * \sqrt{\left(\frac{0.0001}{0.1837}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{9}\right)^2} = 0.001$$

El cálculo anterior se realizó para determinar la incertidumbre de la molaridad de la solución de KOH para la determinación del número ácido del biodiésel con etanol. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 56.

**Cálculo 39.** Coeficiente de variación (CV. %) del número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras

$$CV = \frac{0.02}{0.428} \times 100 = 6 \%$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el coeficiente de variación del número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 57.

**Cálculo 40.** Intervalo de confianza al 95 % del número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras

$$IC = 0.428 \pm 4.3 \cdot \frac{0.02}{\sqrt{3}} = [0.368; 0.487]$$

El cálculo anterior se realizó para determinar el coeficiente de variación del número ácido del lote 1 de aceite usado de frituras. Se utilizó el mismo cálculo para los demás lotes y para el biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 58.

**Cálculo 41.** Prueba T independiente de los rendimientos de biodiésel con etanol y metanol

$$= \text{PRUEBA. T}(\text{rendimientosBD; colas2; tipo1}) = 2.13 \times 10^{-5}$$

En el cálculo anterior se realizó la prueba T independiente para los rendimientos de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 59.

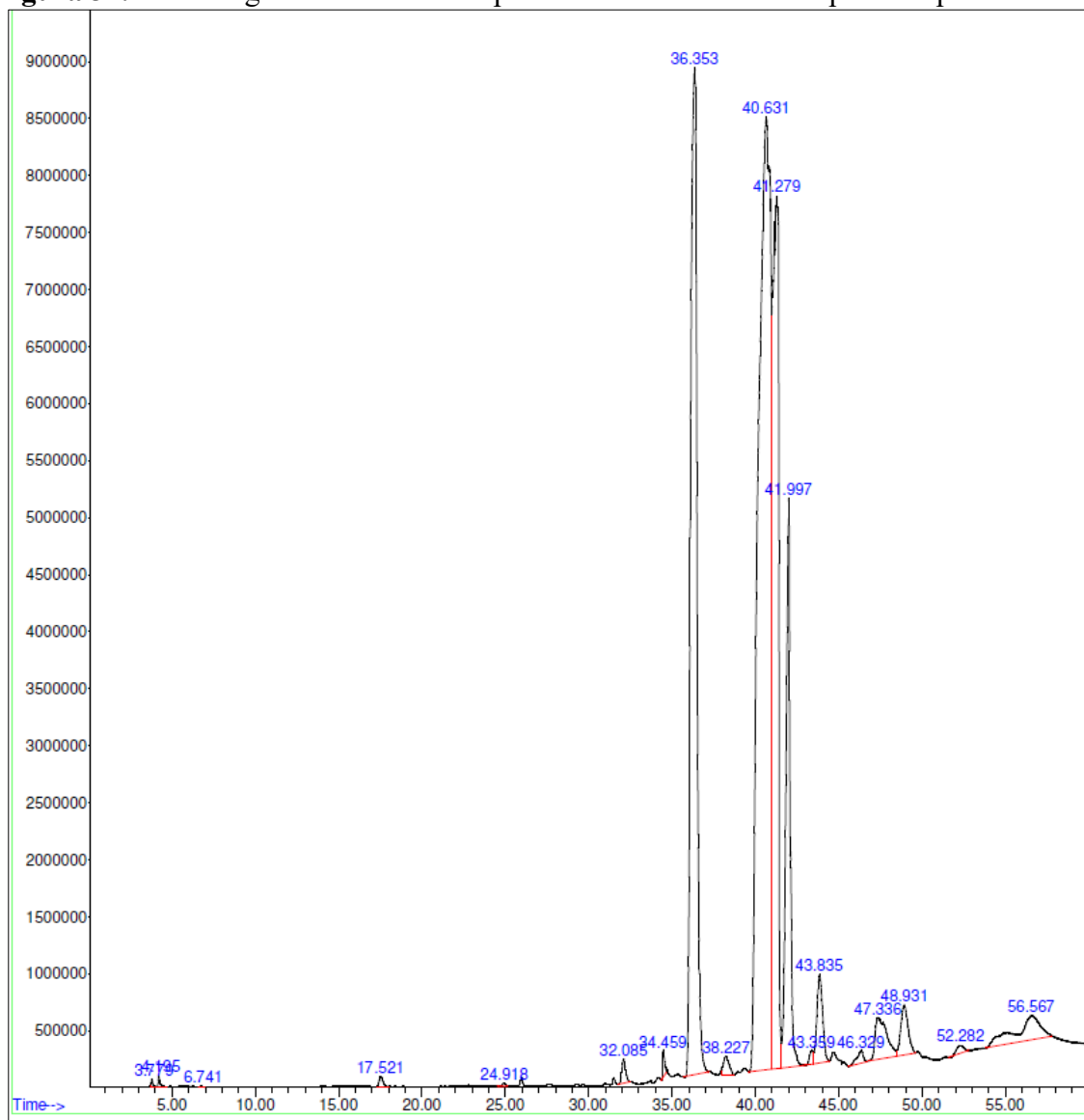
**Cálculo 42.** Prueba T pareada de los rendimientos de biodiésel con etanol y metanol

$$= \text{PRUEBA. T}(\text{rendimientosBD; colas2; tipo2}) = 4.23 \times 10^{-9}$$

En el cálculo anterior se realizó la prueba T pareada para los rendimientos de biodiésel con etanol y metanol, por medio de la Ecuación 60.

## E. Cromatogramas

**Figura 32.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 1

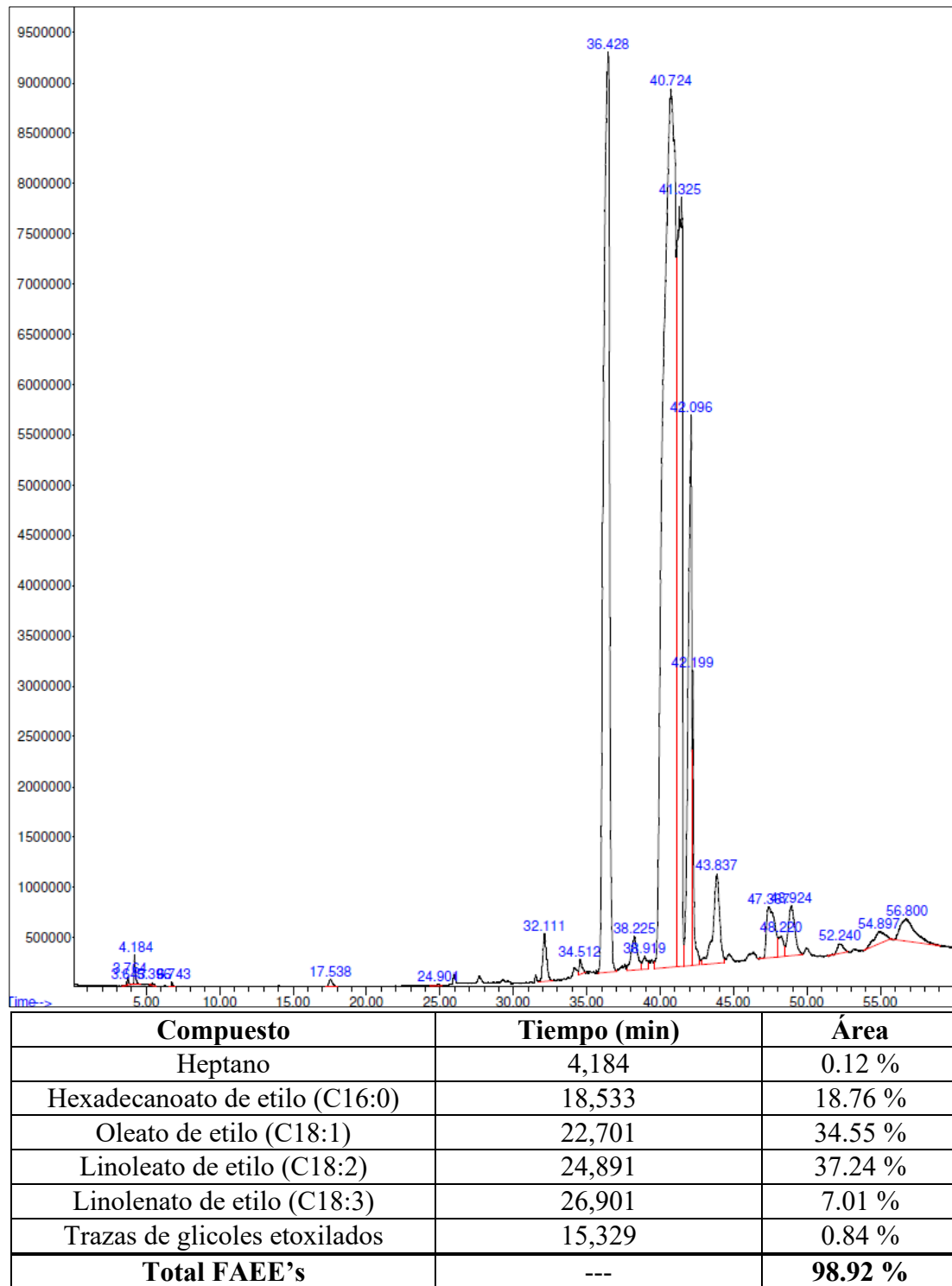


Compuesto	Tiempo (min)	Área
Heptano	4.195	0.10 %
Hexadecanoato de etilo (C16:0)	18.521	19.12 %
Oleato de etilo (C18:1)	22.743	33.87 %
Linoleato de etilo (C18:2)	24.981	35.21 %
Linolenato de etilo (C18:3)	26.732	6.79 %
Trazas de glicoles etoxilados	15.215	0.91 %
<b>Total FAEE's</b>	---	<b>98.88 %</b>

La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 1. Se muestra adicionalmente el compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos.

El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

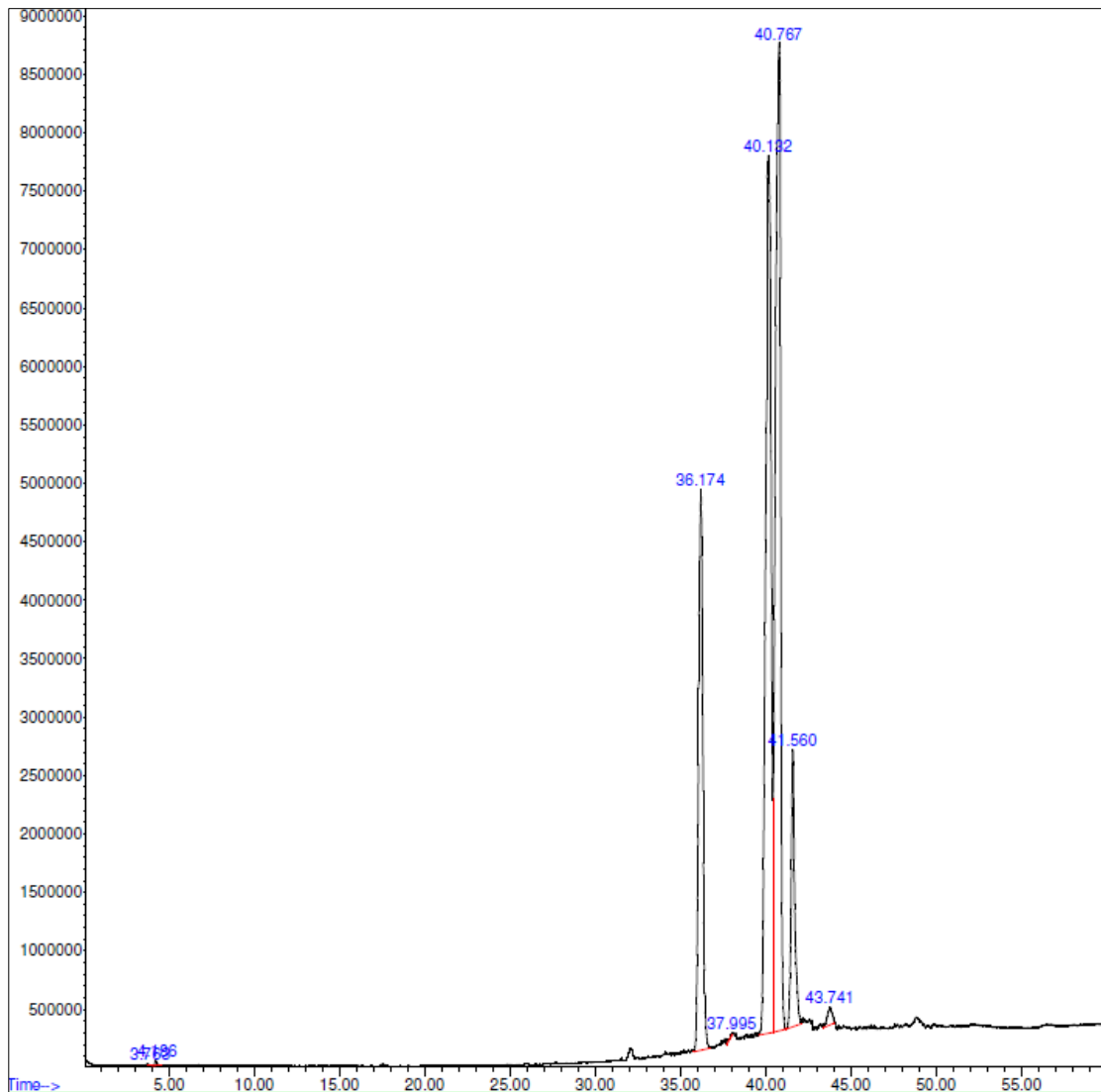
**Figura 33.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 2



La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 2. Se muestra adicionalmente el

compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos. El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

**Figura 34.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 3

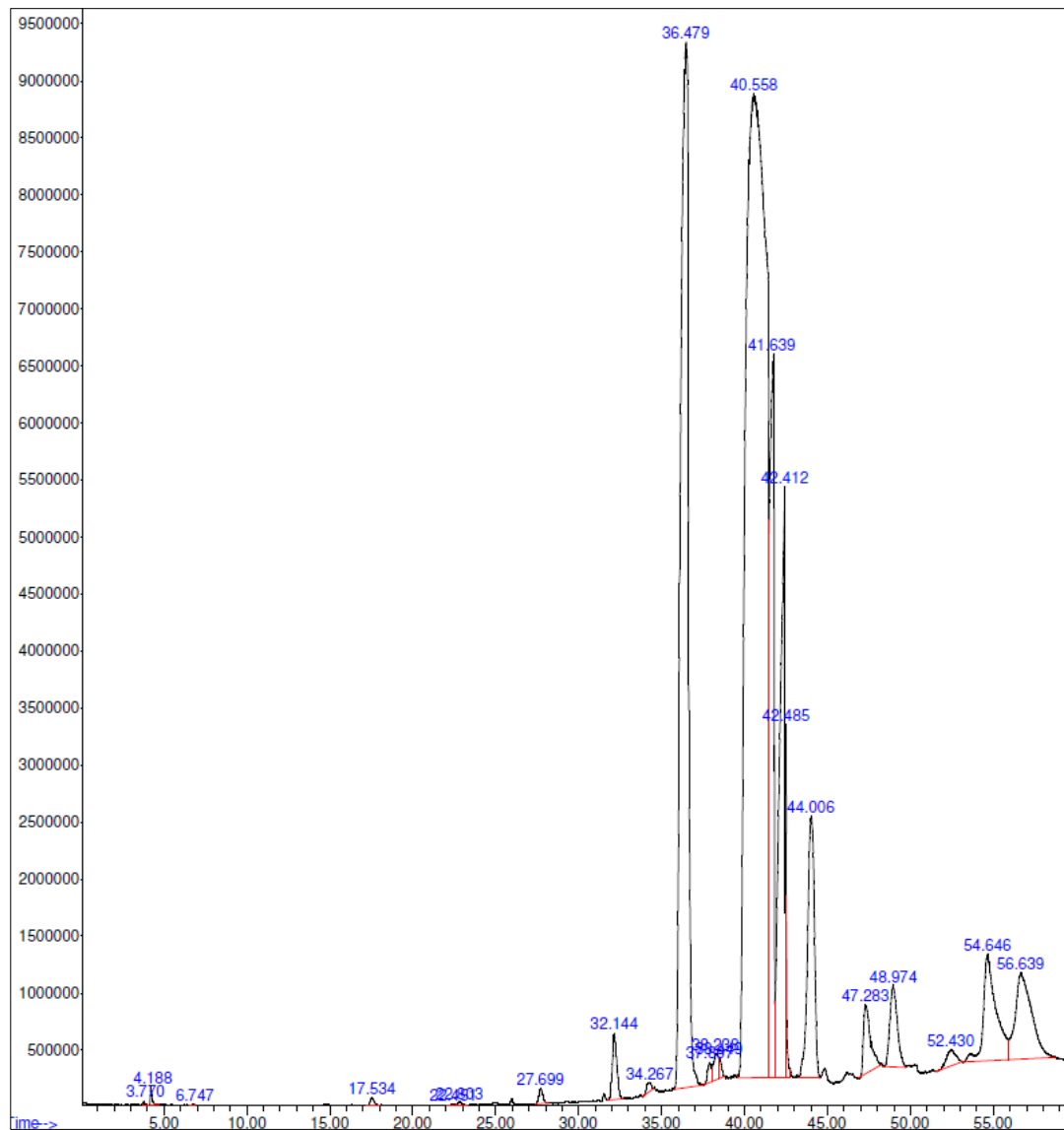


Compuesto	Tiempo (min)	Área
Heptano	4,186	0.11 %
Hexadecanoato de etilo (C16:0)	18,451	18.94 %
Oleato de etilo (C18:1)	22,615	34.74 %
Linoleato de etilo (C18:2)	24,762	36.84 %
Linolenato de etilo (C18:3)	26,842	6.93 %
Trazas de glicoles etoxilados	15,448	0.85 %
<b>Total FAEÉ's</b>	---	<b>99.03 %</b>

La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 3. Se muestra adicionalmente el

compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos. El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

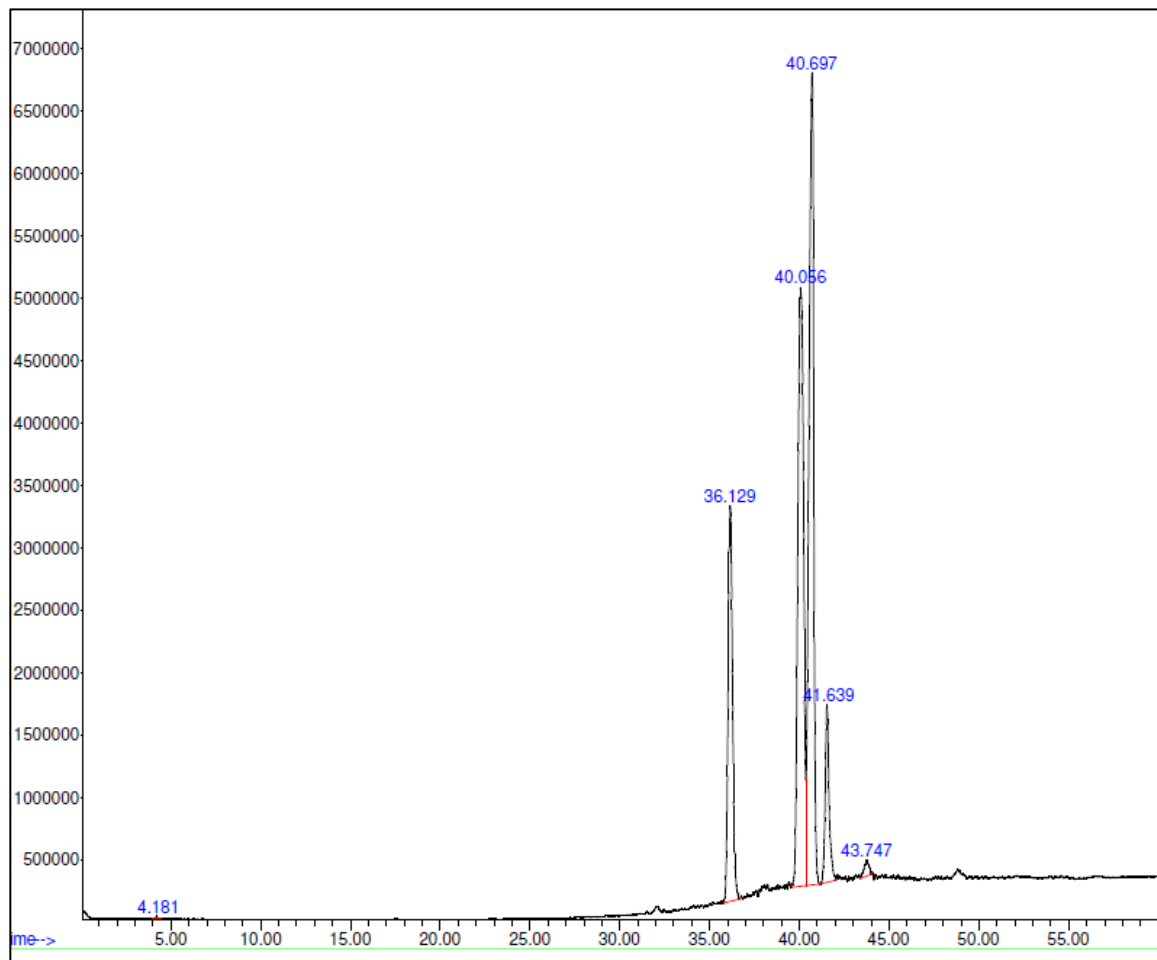
**Figura 35.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 4



Compuesto	Tiempo (min)	Área
Heptano	4,188	0.09 %
Hexadecanoato de etilo (C16:0)	18,534	18.83 %
Oleato de etilo (C18:1)	22,502	35.21 %
Linoleato de etilo (C18:2)	24,738	36.92 %
Linolenato de etilo (C18:3)	26,701	7.04 %
Trazas de glicoles etoxilados	15,237	0.91 %
<b>Total FAEE's</b>	---	<b>98.92 %</b>

La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 4. Se muestra adicionalmente el compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos. El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

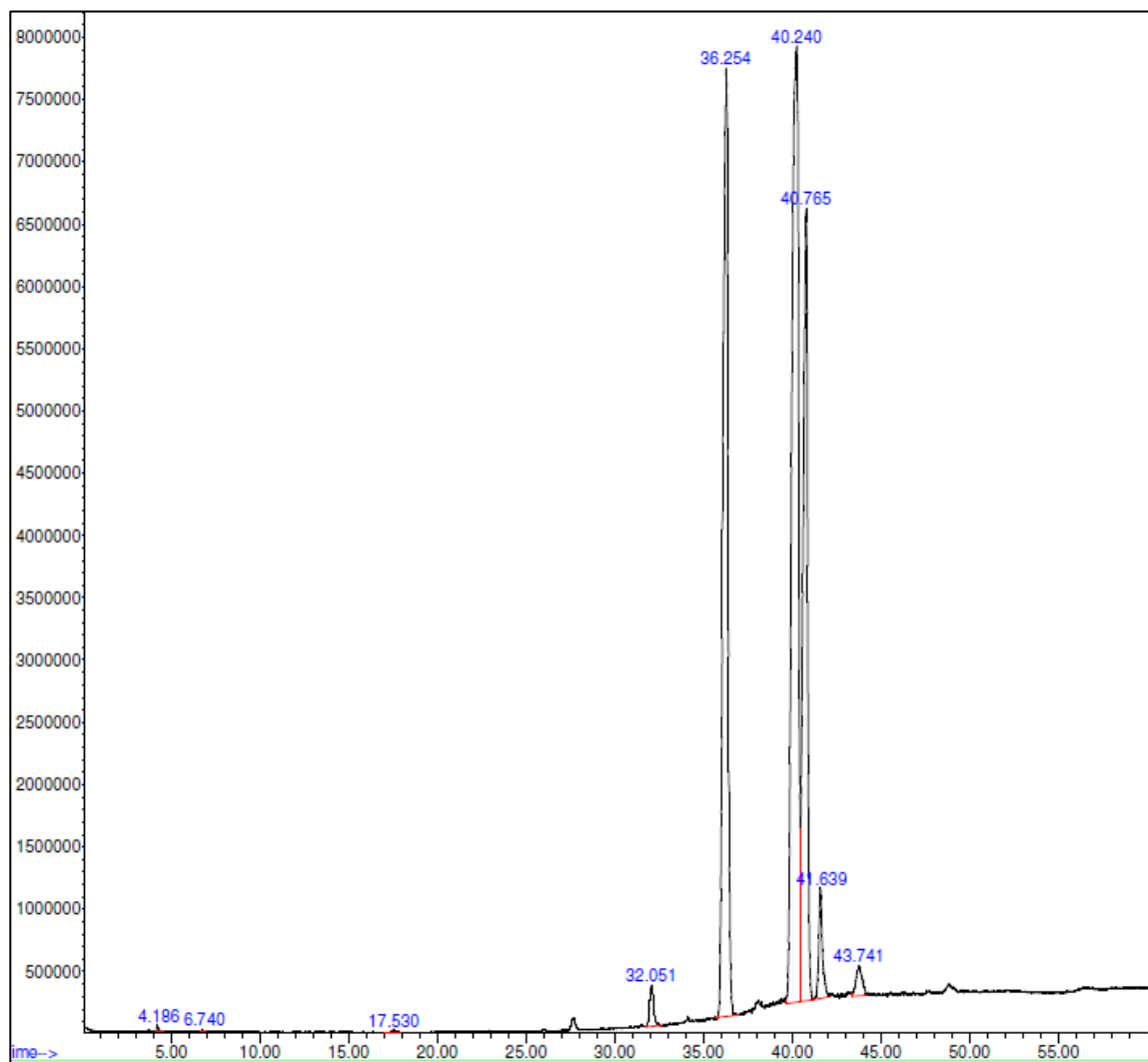
**Figura 36.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 5



Compuesto	Tiempo (min)	Área
Heptano	4,181	0.04 %
Hexadecanoato de etilo	36,131	17.73 %
Oleato de etilo	40,056	34.98 %
Linoleato de etilo	40,698	39.43 %
Linolenato de etilo	41,639	7.04 %
Ácido oleico	43,745	0.78 %

La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 5. Se muestra adicionalmente el compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos. El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

**Figura 37.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 6

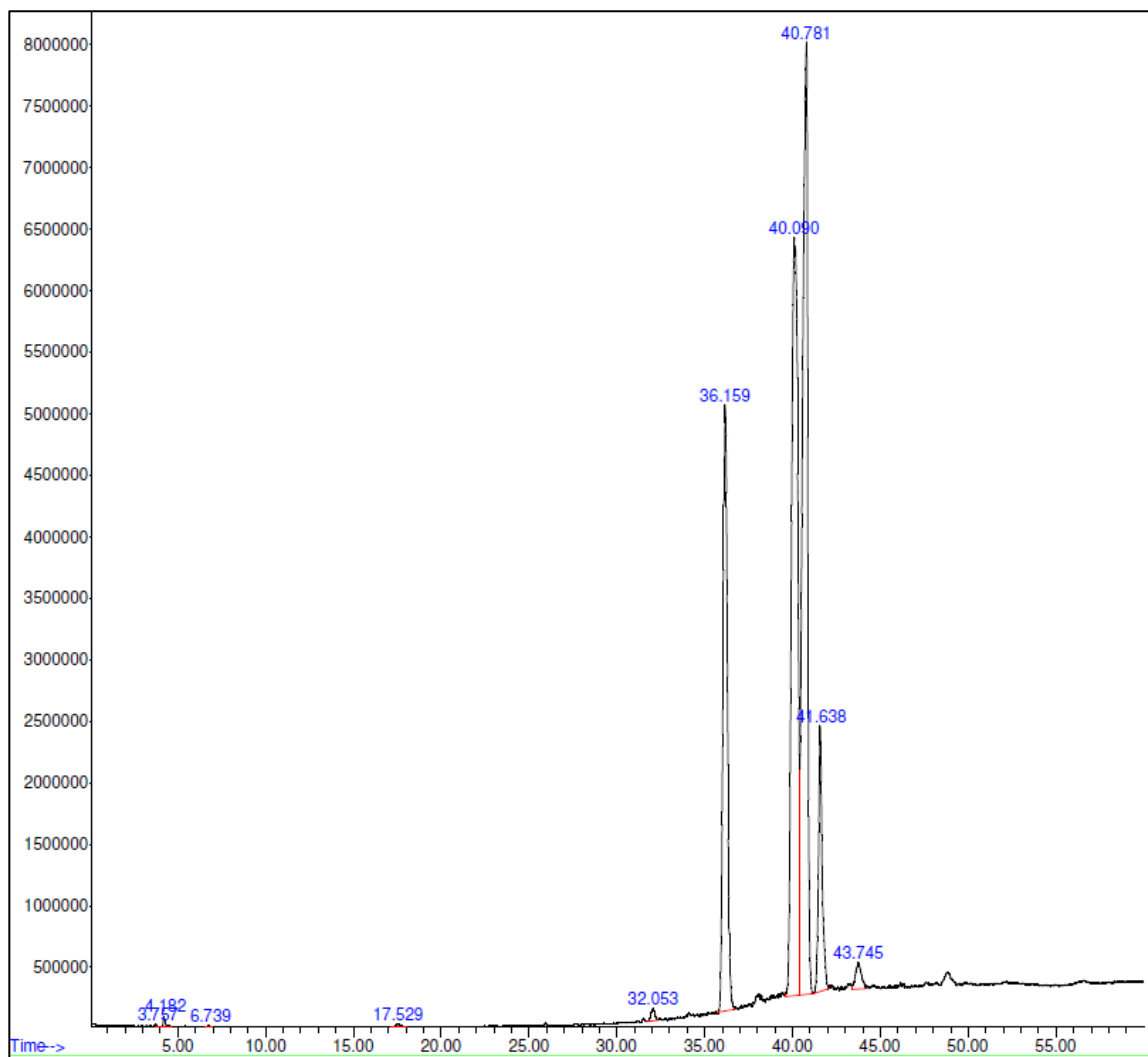


Compuesto	Tiempo (min)	Área
Pentano	3,712	0.02 %
Heptano	4,151	0.08 %
Etanol	5,398	0.02 %
Octanoato de etilo	17,508	0.06 %
Miristato de etilo	32,058	0.45 %
Palmitato de etilo	36,123	21.10 %
Oleato de etilo	40,065	33.92 %
Linoleato de etilo	40,760	35.67 %
Linolenato de etilo	41,602	8.01 %
Otros (Docosanoato de etilo)	43,720	0.67 %
<b>Total FAEs</b>	-	<b>99.12 %</b>

La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 6. Se muestra adicionalmente el compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos.

El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

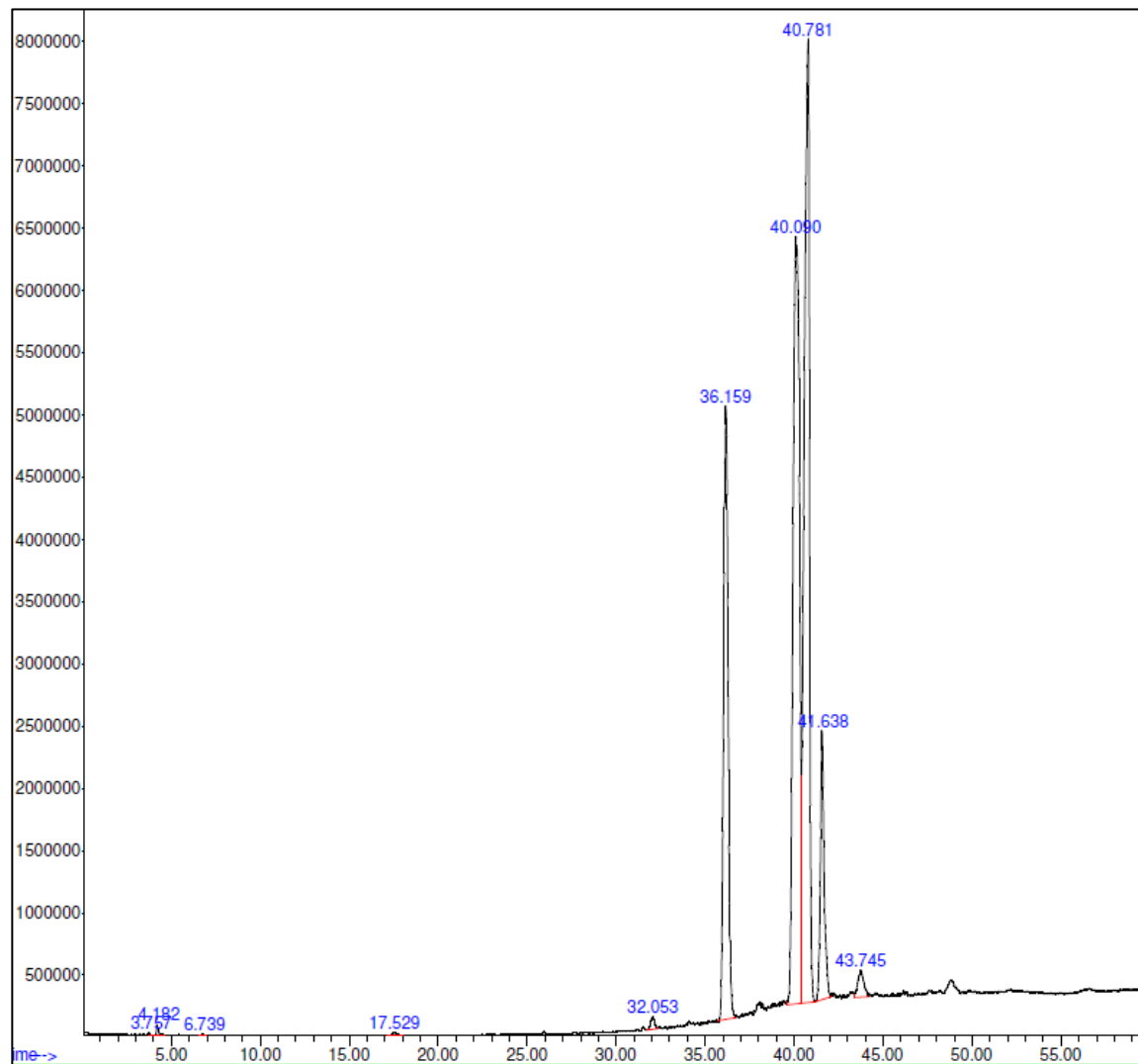
**Figura 38.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 7



Compuesto	Tiempo (min)	Área
Pentano	3,705	0.01 %
Heptano	4,169	0.07 %
Etanol	5,385	0.02 %
Octanoato de etilo	17,480	0.04 %
Miristato de etilo	32,041	0.40 %
Palmitato de etilo	36,137	20.53 %
Oleato de etilo	40,079	34.87 %
Linoleato de etilo	40,751	35.82 %
Linolenato de etilo	41,655	7.90 %
Otros (Docosanoato de etilo)	43,707	0.53 %
<b>Total FAEs</b>	-	<b>99.34 %</b>

La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 7. Se muestra adicionalmente el compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos. El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

**Figura 39.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 8

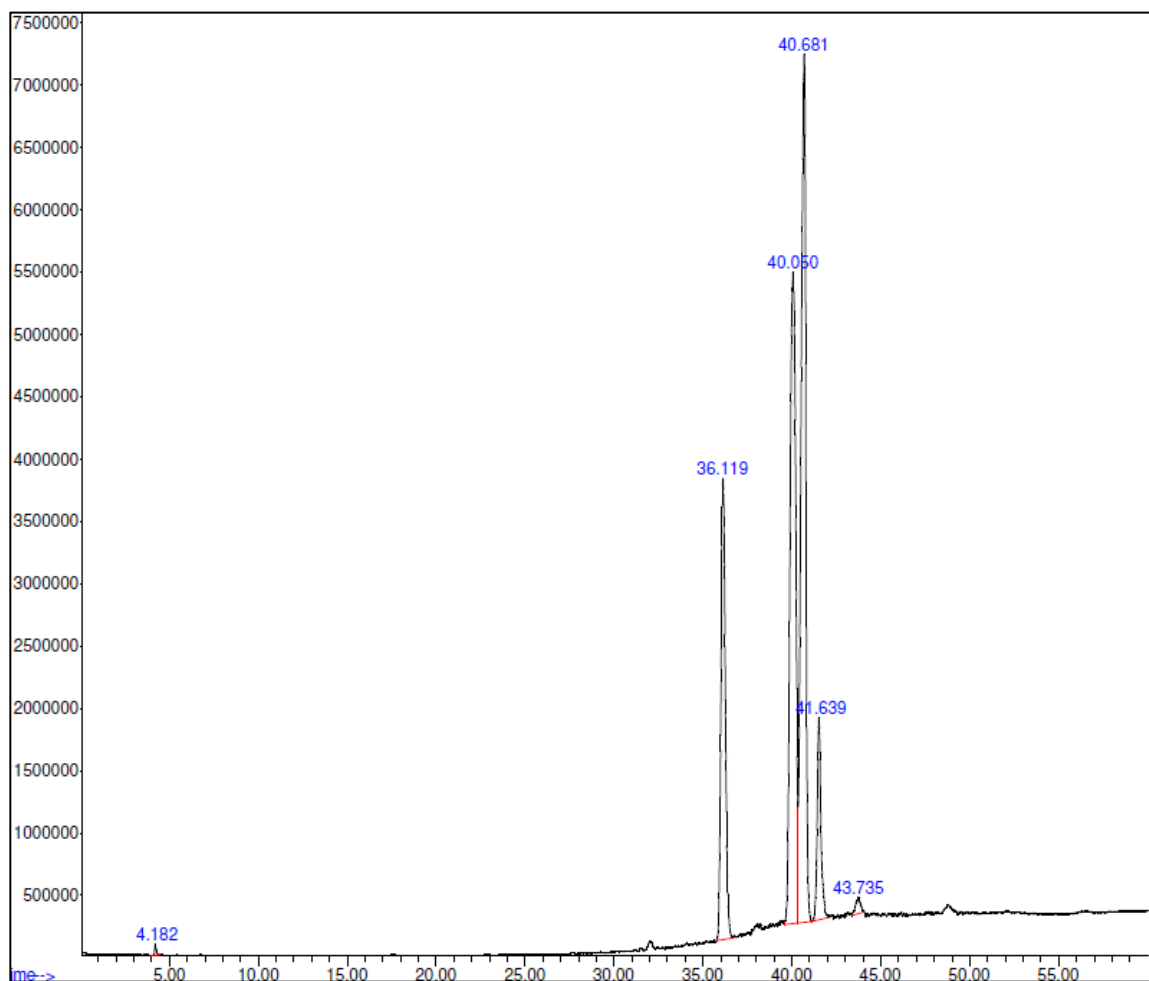


Compuesto	Tiempo (min)	Área
Pentano	3,709	0.01 %
Heptano	4,175	0.08 %
Etanol	5,399	0.03 %
Octanoato de etilo	17,501	0.05 %
Miristato de etilo	32,045	0.41 %
Palmitato de etilo	36,140	21.78 %
Oleato de etilo	40,074	33.48 %
Linoleato de etilo	40,759	35.98 %

Linolenato de etilo	41,611	7.02 %
Otros (Docosanoato de etilo)	43,718	1.16 %
<b>Total FAEs</b>	-	<b>98.83 %</b>

La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 8. Se muestra adicionalmente el compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos. El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

**Figura 40.** Cromatograma del biodiésel producido con etanol en el punto experimental 9



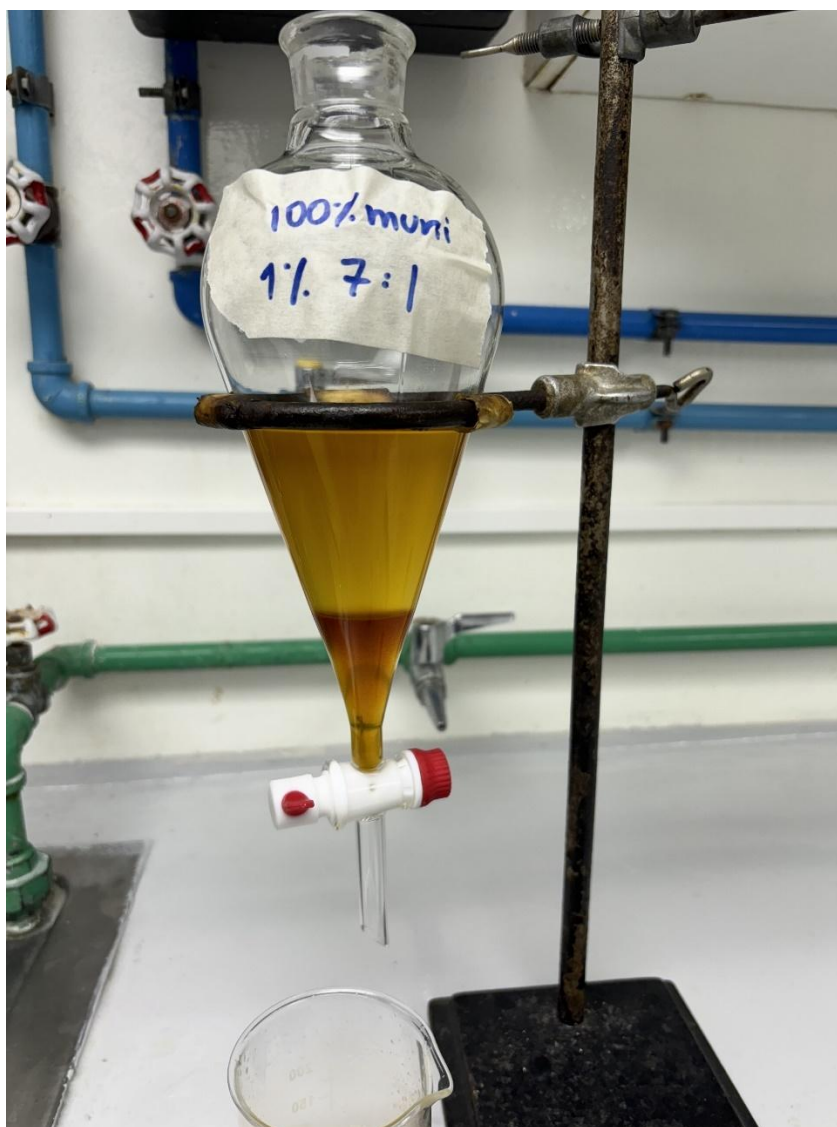
Compuesto	Tiempo (min)	Área
Pentano	3,708	0.02 %
Heptano	4,178	0.09 %
Etanol	5,397	0.04 %
Octanoato de etilo	17,505	0.06 %
Miristato de etilo	32,050	0.43 %
Palmitato de etilo	36,136	22.01 %
Oleato de etilo	40,071	34.11 %

Linoleato de etilo	40,755	36.02 %
Linolenato de etilo	41,623	6.80 %
Otros (Docosanoato de etilo)	43,715	0.42 %
<b>Total FAEs</b>	-	<b>99.33 %</b>

La figura anterior muestra el cromatograma de gases-masa del biodiésel producido con etanol según las condiciones del punto experimental 9. Se muestra adicionalmente el compuesto, el tiempo de retención, el área porcentual y el contenido total de ésteres etílicos. El análisis fue realizado en el laboratorio de análisis instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

## F. Imágenes de la experimentación

**Figura 41.** Separación de fases durante la producción de biodiésel con etanol



En la figura anterior se muestra la separación de fases biodiésel (superior) y glicerina (inferior) utilizando etanol como reactivo. Realizado en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Figura 42.** Lavado del biodiésel con etanol utilizando agua destilada y cloruro de sodio



En la figura anterior se muestra el lavado del biodiésel producido con etanol, utilizando agua destilada y cloruro de sodio. La fase superior es el biodiésel crudo y la fase inferior es el agente de lavado con residuos. Realizado en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

**Figura 43.** Sistema empleado para la producción de biodiésel a escala laboratorio con etanol y metanol



En la figura anterior se puede ver el sistema utilizado para llevar a cabo la transesterificación (izquierda) y la formación del etóxido (derecha). Realizado en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

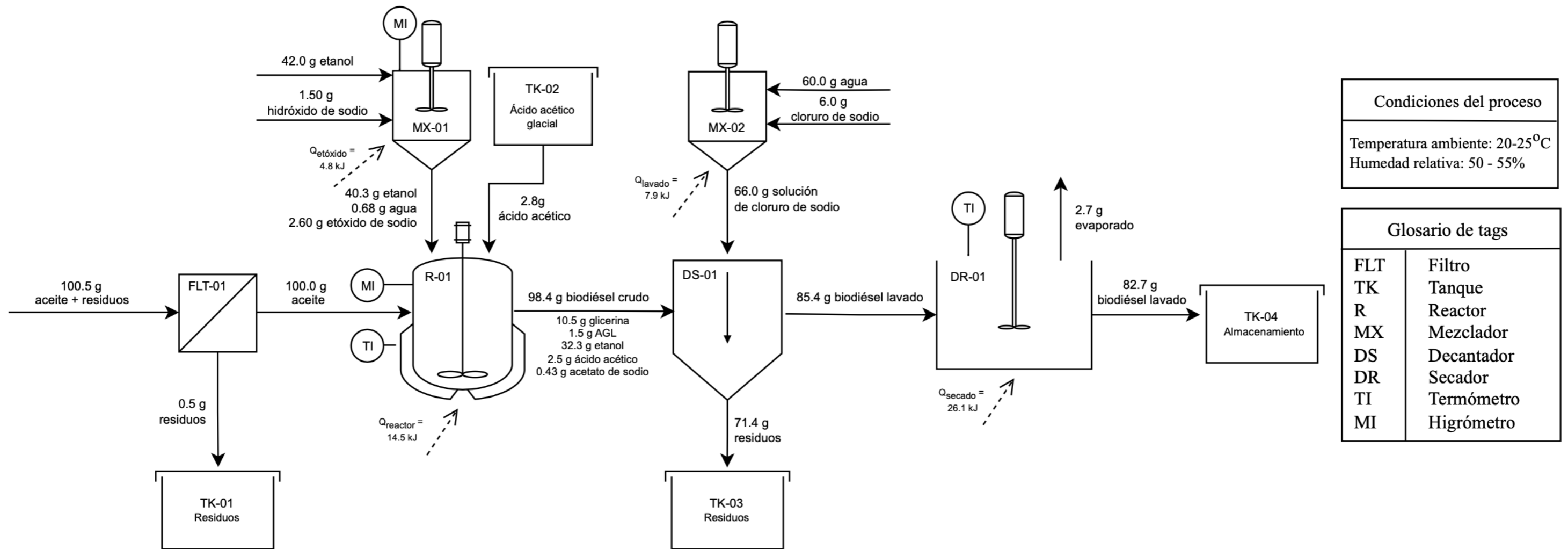
**Figura 44.** Lotes de biodiésel con etanol y metanol producidos



En la figura anterior se puede ver algunos de los lotes de biodiésel con etanol y metanol producidos a lo largo de la experimentación. Realizado en Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.

## G. Diagrama de flujo

Figura 45. Diagrama de flujo para el proceso de producción de biodiésel con etanol y metanol



La figura anterior muestra el diagrama de flujo de la producción de biodiésel con etanol y metanol en escala laboratorio. Los balances de masa y energía corresponden a las condiciones del punto experimental 1 usando etanol como reactivo. Las ecuaciones utilizadas y cálculos realizados pueden encontrarse en la sección de Marco Teórico y Cálculos de Muestra respectivamente.

### XIII. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

**Cuadro 88.** Rangos de precios de los reactivos para la producción de biodiésel a escala laboratorio en Guatemala

Reactivo	Cantidad	Precio Guatemala (2023-2024)	Fuente de referencia
Etanol al 99 %	1 L	Q. 13.0	Distribuidora Mario Bathen (precio mayorista)
Metanol al 99 %	1 L	Q. 6.25	Pochteca (precio mayorista)
Hidróxido de sodio (NaOH)	1 kg	Q. 25.0 –30.0	Disproquim Guatemala (precio minorista)
Hidróxido de potasio (KOH)	1 kg	Q. 40.0 –50.0	Disproquim Guatemala (precio minorista)
Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	1 L	Q. 50.0 –55.0	QUIDISA (precio minorista)
Ácido clorhídrico (HCl)	1 L	Q. 35.0 – 40.0	Chemical Solutions Guatemala (precio minorista)
Ácido acético glacial	1 kg	Q. 70.0 – 75.0	Chemical Solutions Guatemala (precio minorista)
Cloruro de sodio (NaCl)	1 kg	Q. 5.0 – 10.0	QUIDISA (precio minorista)

En el cuadro anterior se muestran los precios de los reactivos empleados para la producción de biodiésel con etanol y metanol en Guatemala, en las distintas cantidades estándar indicadas. Estos incluyen el 12 % del IVA y reflejan estimaciones actuales basadas en datos de las páginas web y cotizaciones realizadas con distintos proveedores locales. Estos valores pueden cambiar dependiendo del volumen de compra y condiciones del mercado.

**Cuadro 89.** Comparación de costos relativos en la producción de biodiésel con etanol y metanol

Costo	BD con etanol por litro	Porcentaje del costo	BD con metanol por litro	Porcentaje del costo	Diferencia (%)
Alcohol	Q. 13.0	77.80 %	Q. 6.25	73.53 %	108.0 %
NaOH	Q. 0.21	1.26 %	Q. 0.21	2.47 %	0.0 %
Ácido acético glacial	Q. 0.73	4.37 %	Q. 0.00	0.00 %	--
NaCl	Q. 0.15	0.90 %	Q. 0.00	0.00 %	--
Energía	Q. 2.50	14.96 %	Q. 1.91	22.47 %	30.9 %
Filtro	Q. 0.13	0.78 %	Q. 0.13	1.53 %	0.0 %
<b>Total, por litro</b>	<b>Q. 16.71</b>	<b>100.0 %</b>	<b>Q. 8.5</b>	<b>100.0 %</b>	<b>---</b>

En el cuadro anterior se muestra la comparación de los costos relativos en la producción de biodiésel (BD) utilizando etanol y metanol como reactivos principales. Se presentan los

valores unitarios de cada insumo en quetzales por litro, así como su porcentaje de contribución al costo total del proceso en cada caso. Además, se incluye la diferencia relativa entre ambas opciones.




**Cuadro 90.** Comparación de características entre el uso de etanol y metanol en la producción de biodiésel

<b>Criterio</b>	<b>BD con etanol</b>	<b>BD con metanol</b>
Costo unitario del alcohol (Q./L)	13.00	6.25
Comportamiento en la transesterificación	Menor eficiencia, genera emulsiones	Mayor eficiencia, facilita separación
Demanda energética del proceso	Mayor (216 minutos de calentamiento total)	Menor (165 minutos de calentamiento total)
Seguridad	Menos tóxico, menor riesgo, inflamable	Más tóxico, riesgo de neurotoxicidad
Impacto ambiental	Renovable, menor huella de carbono	De origen fósil, mayor huella de carbono

En el cuadro anterior se muestra una comparación entre el uso de etanol y metanol en la producción de biodiésel (BD), evaluando criterios clave como el costo del alcohol, el comportamiento en la transesterificación, la demanda energética del proceso, la seguridad y el impacto ambiental

## XIV. CERTIFICADOS DE ANÁLISIS

**Figura 46.** Certificado de análisis para el metanol al 99 %

	<div style="border: 2px solid green; padding: 5px; display: inline-block;"><b>CERTIFICADO DE ANÁLISIS</b></div>	<p style="font-size: small;">Fecha de Emisión: 08-feb-08</p> <p style="font-size: x-small;">Rev.: 04</p> <p style="font-size: x-small;">Fecha de última Revisión: 24-jul-23</p>	
<p>Almacén: Guatemala                  Dirección: Km. 19.5 Carr. Panamericana, Lote 7, Lo de Coy Mixco.                  Teléfono: 23029400</p>			
<p>Fecha de emisión COA: 13 de enero de 2025</p>			
<b>PRODUCTO:</b>	<b>METANOL</b>	<b>LOTE:</b>	<b>2753131130</b>
Fecha de Análisis: 29 de agosto de 2024 Fecha de Re Análisis: ** 29 de agosto de 2026		Ref. 0122753131130	
PARÁMETROS	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS	
Apariencia	Líquido claro libre de materia en suspensión	Líquido claro libre de materia en suspensión	
Acidez como ácido acético, %w	0 - 0.0003	0.0011	
Agua, % peso*	0 - 0.1	0.00	
Color Pt - Co	0 - 5	5	
Material no volátil, (%peso)	0 - 0.001	0.0002	
Gravedad específica 20/20 °C	0.780 - 0.7932	0.793	
Pureza Cromatográfica, % peso*	99.85 - 100	99.990	
Acetona, %peso	0 - 0.003	0.0030	
Olor	Característico	Característico	
Prueba de permanganato, min	50 - 100	60	
Sustancias Carbonizables	0 -50	5	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Elaborado por: <u>Leslie Aguilar Echeverría</u>                      Departamento de Control de Calidad                      Este documento es válido con firma electrónica</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>			
LCLMS - Líquido claro, libre de materia en suspensión Nota: Los valores marcados con asterisco (*) son analizados por Pochteca Materias Primas y el resto de los resultados son copia fiel de los emitidos por nuestros proveedores. ** En condiciones adecuadas de almacenamiento.			
FCALDMP-01-02			

En la figura anterior se muestra el certificado de análisis del metanol empleado en la Universidad del Valle de Guatemala, realizado por Pochteca.



## XV. GLOSARIO

Adiabático: proceso fisicoquímico en el cual no existe un intercambio de calor entre el sistema y sus alrededores.

Adsorbente: capacidad de un material de retener elementos en su superficie.

Atomización: es el proceso mediante el cual un material se transforma en pequeñas partículas.

DCC-FCC: diseño central compuesto face centered

Disparidad: falta de equilibrio o igualdad entre elementos.

Economía circular: modelo económico que minimiza los residuos y maximiza los recursos.

Estándar primario: compuesto de alta pureza que se utiliza en valoraciones ácido – base debido a su concentración exacta.

Ester: compuesto orgánico resultante entre un ácido carboxílico, un alcohol y un catalizador.

Gases de efecto invernadero (GEI): gases presentes en la atmosfera que absorben y emiten radiación infrarroja, promoviendo el efecto invernadero.

Isomería: fenómeno en el cual 2 compuestos químicos poseen la misma composición, pero distinta distribución espacial.

Matriz energética: representación de las composiciones energéticas con las que satisface la demanda energética.

Monoacilglicéridos: molécula formada por un glicerol y un único ácido graso.

Monoalquílico: molécula que contiene un único grupo alquilo unido a otro componente.

Método Rancimat: método empleado para la evaluación oxidativa de grasas, aceites y otros productos.

Picnómetro: instrumento diseñado para medir la densidad de líquidos.

Punto de inflamación: temperatura a la que un líquido comienza a liberar vapores al aire.

Viscosímetro de Ostwald: instrumento empleado para medir la viscosidad de un líquido mediante el tiempo que tarda en fluir a través de un tubo capilar.

Volatilidad: propiedad física de un elemento que permite cambiar de una fase líquido a una fase gaseosa.