

Proyecto de Integración de Ingeniería Ambiental

OBTENCIÓN DE BIOTURBOSINA A PARTIR DE ACEITES RESIDUALES

Proyecto de investigación

Trimestre 17-P

PRESENTA

Christian Villagómez Díaz

2122000679

chvillgmz@gmail.com

ASESORA

Dra. Margarita M. González Brambila
Departamento de Energía
mmgb@correo.azc.uam.mx

CO-ASESORA

Dra. Blanca Estela Chávez Sandoval
Departamento de Energía
becs@correo.azc.uam.mx

Agosto, 2017

Declaratoria:

Yo, Margarita M. González Brambila, y yo Blanca Estela Chávez Sandoval, declaramos que aprobamos el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y damos nuestra autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de la UAM Azcapotzalco.



Yo, Christian Villagómez Díaz, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de la UAM Azcapotzalco.



*“Los planes para proteger el aire y
el agua, lo salvaje y la vida
silvestre, son de hecho planes para
proteger al hombre”.*

Stewart Udall

AGRADECIMIENTOS

A mi madre **Martha** por haberme dado la vida y por ser mi ángel de la guardia. Allí donde te encuentres, espero que todo el amor que te tengo siga llegando a tu corazón.

A mis hermanas **Gaby** y **Candy** por haber sido los cimientos para la construcción de mi vida profesional, sentando en mí las bases de responsabilidad y deseos de superación, gracias por su amor y comprensión en todo momento a lo largo de este camino, sin su apoyo no sería ni la mitad de lo que soy ahora, muchas gracias por tratarme no solo como su hermano pequeño sino como un hijo más en sus vidas, este título es por y para ustedes.

A mi asesora la **Dra. Margarita González Brambila** que me brindó la oportunidad de colaborar con ella y con su gran equipo de trabajo en el laboratorio de Análisis de Procesos.

A mi co-asesora la **Dra. Blanca Estela Chávez Sandoval** gracias por su confianza, apoyo, conocimientos y tiempo en la realización de este proyecto de investigación.

Y por último gracias a la **Universidad Autónoma Metropolitana** unidad Azcapotzalco por haber sido mi segunda casa al haberme acogido y brindado la oportunidad de ser uno de sus alumnos.

¡¡Muchas gracias!!

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	11
INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 ANTECEDENTES	13
1.2 JUSTIFICACIÓN	15
CAPÍTULO 2.....	16
OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
CAPÍTULO 3.....	17
REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	17
3.1 ACEITES RESIDUALES	17
3.2 ACEITES VEGETALES	17
3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES VEGETALES	18
3.4 TIPOS DE ACEITES VEGETALES	19
3.4.1 ACEITE DE CANOLA.....	19
3.4.2 ACEITE DE SOYA.....	20
3.4.3 ACEITE DE GIRASOL	21
3.4.5 ACEITE DE CÁRTAMO	22
3.5 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LOS ACEITES VEGETALES USADOS (AVU)	22
3.6 BIOCOMBUSTIBLES.....	23
3.7 BIODIÉSEL	24
3.8 BIOTURBOSINA.....	26
3.9 TRANSESTERIFICACIÓN	30
CAPÍTULO 4.....	33
TÉCNICAS ANALÍTICAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES	33
4.1 ESPECTROSCOPIA.....	33
4.1.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA.....	34
4.2 CROMATOGRAFÍA.....	36
4.2.1 CROMATOGRAFÍA DE GASES (CG)	37
4.2.2 ESPECTROMETRÍA DE MASAS (EM)	38

4.2.3 CROMATOGRAFÍA DE GASES – ESPECTROMETRÍA DE MASAS (CG/EM).....	39
CAPÍTULO 5.....	41
METODOLOGÍA.....	41
5.1 PRETRATAMIENTO DEL ACEITE DE CANOLA.....	41
5.1.1 FILTRADO AL VACÍO	41
5.1.2 LAVADO DEL ACEITE.....	42
5.2 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE LOS ACEITES.....	43
5.2.1 DENSIDAD	43
5.2.3 pH	45
5.4 PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.....	48
5.4.1 SEPARACIÓN DEL BIODIÉSEL DE LA GLICERINA.....	51
5.4.2 LAVADO DEL BIODIÉSEL.....	52
5.4.3 MEDICIÓN DEL PH	53
5.4.4 CALCULO DEL RENDIMIENTO EXPERIMENTAL	54
5.4.5 CALCULO DEL PORCENTAJE DE CONVERSIÓN.....	54
5.5 PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA.....	55
5.5.1 ELABORACIÓN DE MEZCLAS.	56
CAPÍTULO 6.....	58
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
6.1 ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS	58
6.2 ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....	59
6.3 RENDIMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....	60
6.4 ANÁLISIS DE BIOCOMBUSTIBLES CON ESPECTROSCOPIA IR.....	61
6.5 ESPECTROS OBTENIDOS A PARTIR DE UNA MEZCLA DE TURBOSINA CONVENCIONAL CON BIOTURBOSINA.	65
6.6 ANÁLISIS DE FAMES UTILIZANDO CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADO A ESPECTROMETRÍA DE MASAS	67
CAPÍTULO 7.....	72
CONCLUSIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPOSICIÓN DEL ACEITE DE CANOLA	19
TABLA 2. COMPOSICIÓN DEL ACEITE DE SOYA	20
TABLA 3. COMPOSICIÓN DEL ACEITE DE GIRASOL	21
TABLA 4. COMPOSICIÓN DEL ACEITE DE CÁRTAMO	22
TABLA 5. PARÁMETROS FÍSICOS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOTURBOSINA.....	27
TABLA 6. PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA (ROMERO ET AL., 2016).	27
TABLA 7. REGISTRO DE VUELOS USANDO COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN RENOVABLE (CHIARAMONTI Y PRUSSI, 2014).	29
TABLA 8. MATERIAL PARA FILTRADO AL VACÍO	41
TABLA 9. MATERIAL PARA EL LAVADO DEL ACEITE.....	42
TABLA 10. MATERIAL PARA MEDIR LA DENSIDAD.....	43
TABLA 11. MATERIAL PARA MEDIR PH.....	45
TABLA 12. MATERIAL PARA MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE ACIDEZ	46
TABLA 13. MATERIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL	49
TABLA 14. MATERIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA	55
TABLA 15. MEZCLAS DE BIOTURBOSINA CON TURBOSINA.....	57
TABLA 16. RESULTADOS DE DENSIDAD Y PH DEL ACEITE RESIDUAL.....	58
TABLA 17. ÍNDICE DE ACIDEZ DEL ACEITE RESIDUAL	59
TABLA 18. RESULTADOS DE DENSIDAD Y PH PARA LOS BIOCOMBUSTIBLES	59
TABLA 19. RESULTADOS DEL RENDIMIENTO DE LOS BIOCOMBUSTIBLES	60
TABLA 20. RESULTADOS DE LOS ÁCIDOS GRASOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN (VICENTE, 2012).....	12
FIGURA 2. TRANSESTERIFICACIÓN DE UN TRIGLICÉRIDO CON ALCOHOL. TOMADO Y ADAPTADO DE (LEUNG Y LENUNG, 2010).....	31
FIGURA 3. MECANISMO DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN USANDO METANOL (VICENTE, 2005).....	32
FIGURA 4. ESPECTRO IR TÍPICO EN TRANSMITANCIA CON BANDAS CARACTERÍSTICAS DE LOS GRUPOS FUNCIONALES, OBTENIDO DE TRIPLENLACE, 2012.	35
FIGURA 5. CONTENIDO DE FAME EN BIODIÉSEL PRODUCIDO A 30°C (GUERRERO ET AL, 2010).....	36
FIGURA 6. ELEMENTOS BÁSICOS DE LA CROMATOGRAFÍA DE GASES TOMADO DE (LINDE, 2017)	38
FIGURA 7. COMPONENTES DE UN ESPECTRÓMETRO DE MASAS TOMADO DE (GOMIS, 2008)	39
FIGURA 8. PROCESO DEL LAVADO DEL ACEITE RESIDUAL	43
FIGURA 9. DENSIDAD DEL ACEITE RESIDUAL	44
FIGURA 10. SOLUCIÓN ALCOHÓLICA DE HIDRÓXIDO DE POTASIO 0.1 N.....	46
FIGURA 11. PREPARACIÓN DEL ANALITO CON 30 G DE ACEITE RESIDUAL	47
FIGURA 12. VALORACIÓN DEL ANALITO	48
FIGURA 13. PRODUCCIÓN DEL METÓXIDO DE SODIO.....	49
FIGURA 14. METIL ÉSTERES DE ÁCIDOS GRASOS	50
FIGURA 15. PROCESO DE SEPARACIÓN DEL BIODIÉSEL Y LA GLICERINA	51
FIGURA 16. LAVADO DEL BIODIÉSEL.....	52
FIGURA 17. MEDICIÓN DEL BIODIÉSEL OBTENIDO	53
FIGURA 18. BIOTURBOSINA	56
FIGURA 19. MEZCLAS DE BIOTURBOSINA CON TURBOSINA	57
FIGURA 20. ESPECTRÓMETRO INFRARROJO PERKINELMER	62
FIGURA 21. ESPECTRO DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO A 65°C.....	63
FIGURA 22. ESPECTRO DE LA MEZCLA B10 CON 27 ML DE TURBOSINA Y 3 ML DE BIOTURBOSINA.....	65
FIGURA 23. ESPECTRO DE LA MEZCLA B5 CON 28.5 ML DE TURBOSINA Y 1.5 ML DE BIOTURBOSINA	65
FIGURA 24. ESPECTRO DE LA MEZCLA B20 CON 24 ML DE TURBOSINA Y 6 ML DE BIOTURBOSINA.....	66
FIGURA 25. CROMATOGRAMA DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO A 65°C	67
FIGURA 26. ESPECTRO DE MASAS Y ESTRUCTURA DEL ÁCIDO PENTADECÍLICO (C ₁₅ H ₃₀ O ₂).....	69
FIGURA 27. ESPECTRO DE MASAS Y ESTRUCTURA DEL ÁCIDO PALMITOLEICO (C ₁₆ H ₃₀ O ₂)	69
FIGURA 28. ESPECTRO DE MASAS Y ESTRUCTURA DEL ÁCIDO OLEICO (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	70
FIGURA 29. ESPECTRO DE MASAS Y ESTRUCTURA DEL ÁCIDO LINOLEICO (C ₁₈ H ₃₂ O ₂)	70
FIGURA 30. ESPECTRO DE MASAS Y ESTRUCTURA DEL ÁCIDO A LINOLÉNICO (C ₁₈ H ₃₀ O ₂)	70
FIGURA 31. ESPECTRO DE MASAS Y ESTRUCTURA DEL ÁCIDO HOMOGAMMA LINOLEICO (11,14,17 EICOSATRIENOICO)	71
FIGURA 32. ESPECTRO DE MASAS Y ESTRUCTURA DEL ÁCIDO ARAQUÍDICO (C ₂₀ H ₄₀ O ₂)	71
FIGURA 33. ESPECTRO DE MASAS Y ESTRUCTURA DEL ÁCIDO CIS 13-EICOSANOICO	71

ABREVIATURAS

°C	Grados Celsius
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATAG	Air Transport Action Group
AVU	Aceite Vegetal Usado
CG	Cromatografía de Gases
CG/EM	Cromatografía de Gases acoplada a Masas
CGL	Cromatografía de Gas Líquido
CGS	Cromatografía de Gas Sólido
cm	Centímetros
EM	Espectrometría de Masas
FAME	Esteres Metílicos de Ácidos Grasos
g	Gramos
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
IR	Infrarrojo
M	Masa
mdb	Masa del Biodiésel
mdb	Masa del Biodiésel
ml	Mililitros
N	Normalidad
NAIST	National Institute of Standards and Technology
η	Rendimiento
rpm	Revoluciones Por Minuto
T	Temperatura
V	Volumen
ρ	Densidad
ρdb	Densidad del biodiésel

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son productos que se han formado bajo condiciones especiales durante millones de años, en los cuales se agrupan bajo esta denominación el carbón, gas natural y petróleo (también denominado crudo). Su energía química se convierte en calorífica, la cual se transforma en energía mecánica o eléctrica mediante máquinas como motores o turbinas (Mundo, 2011).

Una de las alternativas para disminuir el uso de los combustibles fósiles son los biocombustibles que presentan la particularidad de utilizar productos vegetales como materia prima. La *American Society for Testing and Materials*, define al biodiésel como una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de líquidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales (García, 2006).

El biodiésel se puede obtener a partir de distintos tipos de materias primas entre las cuales destacan los aceites extraídos de plantas oleaginosas como el girasol, la soya y el aceite colza, así como de cualquier materia que contenga triglicéridos como los aceites de fritura usado o aceite residual. El aceite residual proveniente del sector industrial o doméstico es la materia prima más barata evitando así los costos de tratamiento como residuo, además de ayudar a reducir el impacto ambiental. La utilización de los aceites vegetales residuales cumple con cuatro propósitos fundamentales (Castells, 2009);

1. Utilización de un residuo valorizable como recurso.
2. Es una solución para minimizar el agotamiento del petróleo.

3. Reducción de contaminantes a la atmósfera.
4. Reducción de dependencia energética.

Para que un aceite vegetal comestible se pueda considerar como un aceite residual, es necesario que haya sido utilizado en diversas ocasiones para preparar alimentos y que, además, muestre cambios de color, pérdida de palatabilidad, olores no deseables y el desarrollo de una rancidez (Orduña, 2010).

La obtención del biodiésel a partir de aceites residuales se hace mediante el proceso químico llamado transesterificación (o alcoholísis) en presencia de un alcohol como el metanol (alcohol ligero) u otros alcoholes de cadena carbónica larga como el etanol, el propanol y el butanol. La reacción es catalizada por hidróxido de potasio o de sodio en la que el triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina, los cuales se pueden separar mediante decantación (Vicente, 2012). En la figura 1 se presenta dicha reacción:

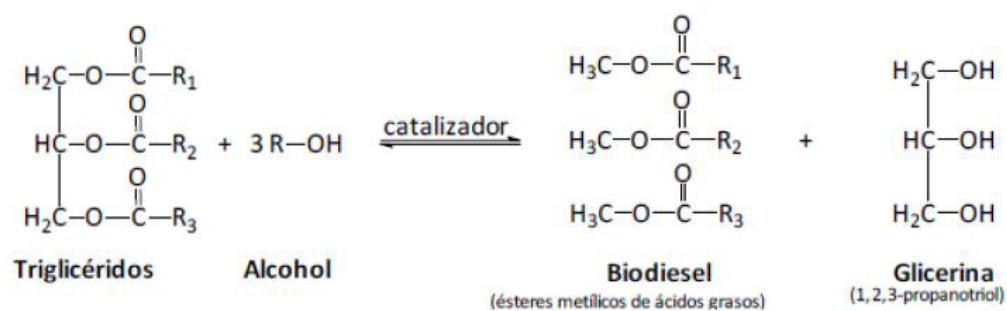


Figura 1. Reacción de transesterificación (Vicente, 2012).

Una alternativa a los combustibles fósiles utilizados en la aviación comercial es el uso de bioturbosina o bioqueroseno obtenido de aceites vegetales con bajo contenido en carbón (Casas y Sandoval, 2015).

Ante la presencia del cambio climático es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías para dejar a un lado la dependencia de los combustibles fósiles y sustituirlos por el uso de biocombustibles a través de

materias renovables, para reducir el efecto invernadero y así diversificar la matriz energética nacional, que en México depende en más del 90% de recursos no renovables como el petróleo y el gas (Echeverría y Martínez, 2013).

1.1 ANTECEDENTES

El uso de biocombustibles se inicia a finales del siglo XIX y nace prácticamente con el uso de hidrocarburos como fuente de energía. A principios del siglo XX Rudolf Diésel desarrollo el primer motor diésel, cuyo prototipo ya estaba previsto que funcionara con aceites vegetales (Gasca *et al.*, 2009). Para modificar las características del aceite vegetal, se propusieron cuatro procesos que modifican la viscosidad cinemática: transesterificación, pirolisis, dilución del líquido con petrodiesel y microemulsificación. De los cuatro procesos propuestos, la transesterificación comenzó a estudiarse debido a que uno de sus productos presentó una viscosidad inferior al aceite vegetal y más cercana a la viscosidad cinemática del diésel (Orduña, 2010).

En 1937 se concede la primera patente a un combustible obtenido a partir de aceites de palma y etanol como materia prima en presencia de un catalizador ácido mediante el proceso de transesterificación, a G. Chavanne, en Bélgica.

Con respecto al uso de combustibles para la aviación en 1937, Hans Von Ohain utilizó gasolina como combustible para su avión, debido a que era la única alternativa conocida para esa época. No obstante, la necesidad de encontrar un mercado para los otros productos derivados del petróleo marcó la pauta para el desarrollo de la turbosina (Romero *et al.*, 2016).

El primer combustible para avión fue identificado como Jet Propellant #1 o JP-1, producido para la Fuerza Armada Aérea de Estados Unidos en el año de 1944 y se utilizó por primera vez en un avión de turbina de gas, aportando así las especificaciones que actualmente deben de cumplir los carburantes de aviación (Romero *et al.*, 2016).

En los años sesenta para hacer frente a la preocupación sobre el medio ambiente y el cambio climático, el Departamento de Energía de Estados Unidos comenzó a patrocinar investigaciones para la búsqueda de combustibles alternativos a los fósiles para evitar así el agotamiento de las reservas petroleras. La creciente demanda en el transporte aéreo fue también motivo para el desarrollo de investigaciones sobre los biocombustibles.

El primer proceso industrial patentado para la producción de biodiésel se inició en 1977 por el científico brasileño Expedito Parente que definió los parámetros de fabricación y controles de calidad que sirven para calificar un combustible como el biodiésel. Actualmente la empresa de Parente está trabajando con Boeing y la NASA en la producción de bioqueroseno (Fuels, 2017).

Ante la preocupación por el cambio climático se buscan nuevas alternativas que puedan sustituir el uso de hidrocarburos y reducir el impacto ambiental. Los gobiernos y las universidades han puesto atención en el tema de energías alternativas (León, 2015) para la obtención de biodiésel y bioturbosina a partir de materias primas renovables.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente una de las huellas de carbono más profundas proviene del transporte de mercancías y personas; el auto y el avión, entre otros tipos de transporte, son grandes emisores de CO₂ provocando un exceso de gases de efecto invernadero.

En México se generan grandes cantidades de gases contaminantes por cada litro de turbosina quemada, 2.036 kilogramos de CO₂, 0.0011 kilogramos de SOX y 0.0215 kilogramos de NOX. Con el objetivo de reducir en un 80% los impactos de las emisiones contaminantes se buscan nuevas alternativas que puedan sustituir el uso de combustibles fósiles.

La norma D7566-11 de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) permite la utilización de la mezcla de combustibles renovables en una proporción de hasta el 50% con combustible tradicional.

La producción de biocombustibles a partir de aceites residuales evita el encarecimiento de los alimentos además de que la materia prima para su producción es más barata y de cierta forma se reduce la contaminación de las aguas, ya que estos aceites no serán vertidos al drenaje haciendo frente a la dependencia de los combustibles convencionales y ayudando así a la reducción de los contaminantes atmosféricos.

Realizar este tipo de investigaciones en México es de gran importancia ya que la combustión de energéticos convencionales es responsable de poco más del 61% de las emisiones de CO₂ y del 46% de los gases de efecto invernadero.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL.

Optimizar las condiciones de obtención de bioturbosina a partir de aceites residuales de la cafetería de la UAM-AZC.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Caracterizar fisicoquímicamente los residuos de aceite de la cafetería de la UAM-AZC.
- 2) Establecer las condiciones óptimas para la producción de bioturbosina.
- 3) Distinguir las características de la bioturbosina obtenida a partir de los aceites residuales mediante espectrometría infrarroja.
- 4) Determinar las mejores condiciones de reacción para la obtención de bioturbosina.

CAPÍTULO 3

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

3.1 ACEITES RESIDUALES

La industria de alimentos emplea desde hace años, aceites vegetales para procesos de cocción o frituras. Debido a la falta de normatividad y de conciencia ambiental, terminando el proceso de cocción el aceite quemado se desecha a drenajes sin recibir un tratamiento previo, contaminando miles de litros de agua (Albarracín *et al.*, 2010). Los aceites residuales presentan cambios de color, pérdida de palabilidad, olores no deseables y el desarrollo de rancidez. Estas características se deben a la oxidación espontánea por el oxígeno atmosférico en las grasas y aceites vegetales o bien por la acción enzimática de microorganismos.

3.2 ACEITES VEGETALES

Cuando un aceite se somete continuamente a altas temperaturas de cocción en presencia de aire y humedad, se producen tres reacciones esenciales de degradación:

- Hidrólisis causante del contenido de humedad de los alimentos fritos. Esta reacción produce ácidos grasos libres, mono y diglicéridos.
- Oxidación causada por el contacto con el oxígeno. Los productos de reacción son triglicéridos oxidados y materiales volátiles tales como aldehídos y cetonas.

- Polimerización causada por estas dos reacciones, y altas temperaturas. Produce di, poli y triglicéridos con estructura de anillos.

Debido a las reacciones de degradación antes mencionadas, se produce una serie de cambios físicos y químicos en aceites de fritura incluyendo la viscosidad, densidad, contenido de ácidos grasos libres, triglicéridos polimerizados y disminución del número de enlaces dobles (Sanli *et al.*, 2011).

3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES VEGETALES

Los aceites vegetales se componen de una mezcla de 95% triglicéridos, que son la condensación de una molécula de glicerina con tres ácidos grasos, y 5% ácidos grasos libres compuestos alifáticos monobásicos que en su mayoría constan de un solo grupo carboxilo que a excepción del ácido isovaleriánico, contienen un número par de átomos de carbono (Orduña, 2010).

Existen ácidos grasos insaturados y saturados; los ácidos grasos insaturados se caracterizan por poseer dobles enlaces entre sus átomos de carbono para nombrarlos se utiliza el sufijo -enoico, en cambio los ácidos grasos saturados son ácidos grasos no enoicos, generalmente de cadena lineal y tienen dos o más enlaces con átomos de hidrogeno, utilizan la terminación -anoico.

Los ácidos insaturados suelen subdividirse en ácidos poliinsaturados y ácidos monoinsaturados; los poliinsaturados se pueden obtener de vegetales como; el maíz, soja, girasol, calabazas y nueces, poseen más de un doble enlace entre sus átomos de carbono, se oxidan fácilmente lo que provoca la formación de radicales libres que son nocivos para la salud. Los

ácidos monoinsaturados son capaces de fijar más hidrogeno debido a que sus dos átomos de carbono se encuentran situados de forma consecutiva a un solo átomo de hidrogeno, su principal representante es el ácido oleico, presente en el aceite de oliva.

3.4 TIPOS DE ACEITES VEGETALES

En la cafetería de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco para elaboración de alimentos se utilizan aceites de canola, soya, girasol y cártamo, que a continuación se describen:

3.4.1 ACEITE DE CANOLA

Se obtiene de dos especies vegetales, *Brassica napus* y *Brassica rapa* (*Brassica campestris*), agrupadas bajo el nombre de colza. El aceite de canola es un aceite muy insaturado con elevados contenidos de ácido linolénico lo que ocasiona que sea muy sensible a la oxidación. Su composición es la siguiente:

Tabla 1. Composición del aceite de canola

Ácidos grasos	Tipo de grasa	Composición % peso
Ácido oleico (9-Octadecenoico)	Monoinsaturada C18:1	82.53
Ácido palmítico (n-Hexadecanoico)	Saturada C16:0	9.26
Ácido estereáutico (n-Octadecanoico)	Saturada C18:0	3.66
Ácido gondoico o gadoleico (11-Cis)	Monoinsaturada C20:1	1.89

<i>Eicosaenoico)</i>		
Ácido behénico (<i>n-Docosanoico)</i>	Saturada	0.41
	C22:0	
Ácido palmitoléico (<i>9-Hexadecenoico)</i>	Monoinsaturada	0.70
	C16:1	
Ácido araquídico (<i>n-Eicosanoico)</i>	Saturada	0.83
	C20:0	
Ácido erúcico (<i>13-Docosenoico)</i>	Monoinsaturada	0.27
	C22:1	
Ácido hexadecadienoico	Poliinsaturada	0.18
	C16:2	
Ácido mirístico (<i>n-Tetradecanoico)</i>	Saturada	0.15
	C14:0	
Ácido margárico (<i>n-heptadecanoico)</i>	Saturada	0.12
	C17:0	

3.4.2 ACEITE DE SOYA

El aceite de soya se obtiene del prensado de la semilla de la soya (*Glycine max*) en cuatro procesos; desgomado, neutralizado, blanqueado y desodorizado. Es abundante en ácidos grasos poliinsaturados como los ácidos linoleico y linolénico, sus productos en la industria son; aceites de frío, mantecas para panificadoras, margarinas, aderezos, mayonesas y alimentos enlatados. Su composición en ácidos grasos es la siguiente:

Tabla 2. Composición del aceite de soya

Ácidos grasos	Tipo de grasa	Composición % en peso
Ácido linoleico (<i>9c-12c-Octadecanoico)</i>	Poliinsaturada	51.2
	C18:2	
Ácido oleico (<i>9-Octadecenoico)</i>	Monoinsaturada	23.5
	C18:1	
Ácido palmítico (<i>n-</i>	Saturada	14

Hexadecanoico)	C16:0	
Ácido linolénico (6c-9c-12c- Octadecanoico)	Poliinsaturada	8.5
Ácido esteárico (n- Octadecanoico)	Saturada	2.4
Ácido mirístico (n- Tetradecanoico)	Saturada	0.4
	C14:0	

3.4.3 ACEITE DE GIRASOL

Las semillas de girasol (*Helianthus annuus*) contiene alrededor del 40% aceite y 25% proteína, los lípidos se encuentran como triglicéridos, y los ácidos grasos poliinsaturados forman un total del 62% de la grasa. Sus ácidos grasos se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Composición del aceite de girasol

Ácidos grasos	Tipo de grasa	Composición % peso
Ácido linolénico (6c-9c-12c- c-Octadecanoico)	Poliinsaturada	81.63
Ácido palmítico (n- Hexadecanoico)	Saturada	11.47
Ácido esteárico (n- Octadecanoico)	Saturada	5.47
Ácido behénico (n- Docosanoico)	Monoinsaturada	0.60
Ácido palmitoléico (9- Hexadecenoico)	Monoinsaturada	0.35
Ácido araquídico (n- Eicosanoico)	Saturada	0.29
Ácido mirístico (n- Tetradecanoico)	Saturada	0.19

3.4.5 ACEITE DE CÁRTAMO

El aceite de *cártamo* (*Carthamus tinctorius*), se obtiene prensando la semilla para después ser refinado cuidadosamente obteniendo un aceite sin olor ni sabor. Existen dos clases de aceite de cártamo: unos tienen alto contenido de ácido graso (oleico), mientras que los otros tienen alto contenido de ácido graso poliinsaturado (linoleico). El contenido de Ácidos grasos es el siguiente:

Tabla 4. Composición del aceite de cártamo

Ácidos grasos	Tipo de grasa	Composición % peso
Ácido linolénico (6c-9c-12c-Octadecanoico)	Poliinsaturada C18:3	77.89
Ácido oleico (9-Octadecenoico)	Monoinsaturada C18:1	11.58
Ácido palmítico (n-Hexadecanoico)	Saturada C16:0	8.60
Ácido esteárico (n-Octadecanoico)	Saturada C18:0	1.93

3.5 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LOS ACEITES VEGETALES USADOS (AVU)

Una de las preocupaciones en la gestión de residuos es el manejo adecuado de los aceites vegetales usados, según (Boatella y Codony, 2000) la generación per-cápita de AVU es de 1.5 a 6 litros en un año. El aceite presenta una densidad inferior a la del agua y tiende a esparcirse en grandes membranas finas que obstaculizan la oxigenación del agua. En algunos casos puede solidificarse en el drenaje provocando atascos.

La forma adecuada de desechar un AVU es depositarlo en un envase sellado reciclable y tirarlo junto con la basura normal evitando los siguientes problemas de contaminación ambiental y de salud:

- I. Contaminación ambiental asociada a la toxicidad de este residuo en los ecosistemas receptores, que generalmente corresponde a cuerpos de agua.
- II. Obstrucción de las líneas de drenaje y alcantarillado municipales, debido a la formación de una capa superficial al interior de las tuberías que disminuye el diámetro, traduciéndose en problemas de inundaciones, malos olores y generación de plagas.
- III. Costos elevados e inconvenientes de operación en las plantas de tratamiento de aguas residuales y de mantenimientos a los sistemas de drenaje y alcantarillado.
- IV. Salud pública asociada a la generación de compuestos tóxicos, e incluso del tipo cancerígeno, durante la reutilización del AVU a altas temperaturas. Estos compuestos pueden clasificarse en aquellos originados por la degradación del aceite y los contaminantes liposolubles como es el caso de las dioxinas, bifenilos policlorados (PCB's) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) (Boatella y Codony, 2000).

3.6 BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles al igual que los combustibles se han ido adaptando a las necesidades del hombre para no afectar su vida cotidiana y poner en riesgo su alimentación y salud. Los biocombustibles o bio fuels se clasifican por su procedencia:

Los biocombustibles de primera generación se producen directamente de cosechas que pueden destinarse a la alimentación humana o del ganado. Los principales cultivos empleados son el maíz, la caña de azúcar, la soya y los aceites vegetales vírgenes.

La diferencia de los biocombustibles de segunda generación con respecto al de primera generación es que se produce a partir de materias primas que no se destinan a la alimentación y se cultivan en terrenos no agrícolas o marginales.

La tercera generación de biocombustibles, también conocidos como biocarburantes avanzados proceden de la biomasa obtenida de especies no comestibles o desechos incluyendo a las algas o microalgas. Utiliza técnicas de biología molecular, que mejoran los métodos de transformación de la biomasa en biocarburantes.

En los biocombustibles de cuarta generación se utilizan bacterias genéticamente modificadas empleando dióxido de carbono para la obtención del producto, esta generación aún se encuentra en desarrollo.

3.7 BIODIÉSEL

El biodiésel es un combustible líquido producido a partir de materias renovables, como los aceites vegetales o grasas animales, que actualmente sustituye parcial o totalmente al diésel de petróleo en los motores diésel (Medina *et al.*, 2012).

Para la obtención de biodiésel la materia prima se somete a una reacción de alcoholisis o transesterificación junto con un catalizador que puede ser ácido o básico, para obtener ésteres de ácidos grasos, si se usa metanol serán metil ésteres, se usa etanol serán etil ésteres y así sucesivamente.

Posteriormente se encontrarán ácidos grasos en los triglicéridos que pueden ser saturados e insaturados, su composición dependerá del tipo de semilla del aceite o grasa animal que se utilizó, los ésteres más comunes que suelen encontrarse son; ácido oleico, ésteres de ácidos linoléico y ésteres de ácido palmítico.

El biodiésel posee la ventaja de ser biodegradable, renovable, no tóxico, posee lubricidad, y en comparación con el diésel, reduce la mayoría de las emisiones de efecto invernadero (Knothe, 2010).

Para la ASTM el biodiésel debe de ser un combustible alternativo de combustión limpia hecho con grasa o aceite (como el de soya o de palma) que se ha sujetado a un proceso químico para extraerle la glicerina. Para ser llamado biodiésel, debe de cumplir con las estrictas especificaciones de su norma ASTM D6751, para ser utilizado en cualquier mezcla con combustible diésel, las definiciones técnicas para la mezcla son las siguientes:

- Biodiésel, n - un combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales, denominados B100 y que cumplen los requisitos de la norma ASTM D 6751.
- Biodiésel Blend, n - una mezcla de combustible biodiésel que cumple con ASTM D 6751 con combustible diésel a base de petróleo, denominado BXX, donde XX representa el porcentaje en volumen de biodiésel en la mezcla.

3.8 BIOTURBOSINA

De acuerdo a la *Air Transport Action Group* (ATAG) el crecimiento de la aviación se pronostica a una tasa del 4.8% anual hasta el 2036, aunado a las emisiones de gases de efecto invernadero (ATAG, 2016). La *International Civil Aviation Organization* (ICAO) afirma que el transporte de pasajeros representa el 2% de las emisiones anuales de CO₂ (ICAO, 2013), mientras el transporte de mercancías contribuye con un 3% (Gutiérrez *et al.*, 2016). Para el 2050 se espera que el sector de la aviación contribuya con un 10% a 32% de las emisiones anuales de CO₂. Para reducir esos porcentajes la *Air Transport Association* (IATA) y la ICAO considera que el combustible de aviación renovable es la alternativa que puede contribuir a la reducción en un 50% de las emisiones del CO₂ para el año 2050.

El sector de la aviación emplea como combustible principal el combustible de origen fósil obtenido de la destilación del crudo, que contiene parafinas, naftalenos y compuestos aromáticos en el rango de C8 a C16 sus principales componentes incluyen n-heptano e iso-octano, en comparación con el combustible renovable que solo contiene parafinas y naftalenos en un rango de C8 a C16 (Gutiérrez *et al.*, 2016). El que no contenga compuestos aromáticos no afecta a las propiedades principales como temperatura de congelación, viscosidad o contenido energético.

La principal materia prima para producir bioturbosina o biokeroseno es a partir de aceites y grasas, por lo tanto, las materias primas como semillas oleaginosas o algas ricas en lípidos, o residuos como aceite de cocina usado o aceites de animales son esenciales para su producción.

Para el caso de la bioturbosina o biokeroseno debe de cumplir con los parámetros físicos que se mencionan en la norma *ASTM D1655 Standard*

Specification for Aviation Turbine Fuels, dichos parámetros se mencionan en la tabla 5:

Tabla 5. Parámetros físicos para la obtención de bioturbosina.

Propiedad física	ASTM-D1655
Densidad a 15°C	775-840 Kg/m ³
Viscosidad a -20°C	8.0 mm ² /s (max)
Punto de congelación	Max -47°C
Punto de inflamabilidad	38°C (min)
Valor mínimo de calefacción	42.8 MJ/Kg (min)

Actualmente existen cinco procesos para la obtención de turbosina renovable, cada proceso posee ventajas y desventajas con el tipo de materia prima utilizada y con la forma de procesarla. En la siguiente tabla (Tabla 6) se presentan dichos procesos:

Tabla 6. Procesos para la producción de bioturbosina (Romero *et al.*, 2016).

Desarrollador	Proceso	Etapas del proceso	Productos	Ventajas
North Carolina University Diversified Energy Corporation	Centia	Hidrólisis Decarboxilación Isomerización/craqueo Refinación	Nafta Bioturbosina Diésel verde	Bajo consumo de hidrogeno, ya que solo se requiere para la etapa de isomerización y craqueo. Es flexible para transformar varios tipos de aceites vegetales y animales.
Fraunhofer Institute for Environment alSafety and	Greasoline	Vaporización/decarboxilación Refinación	Gasolina Keroseno Diésel verde	Baja presión para la operación, y bajo consumo de hidrogeno,

<i>Energy Technology</i>				catalizador de costo relativamente bajo; sin embargo, la bioturbosina no es el producto principal.
<i>Syntroleum</i>	Bio-synfining	Hidrotratamiento Craqueo Refinación	Nafta Bioturbosina Diésel verde	Similar al proceso de hidrotratamiento de UOP Honeywell, pero su principal producto es el diésel verde.
<i>Sasol</i>	Fisher-Tropsch	Gasificación Síntesis de Fischer-Tropsch Hidrotratamiento Hidrocraqueo Refinación	Nafta Bioturbosina Diésel verde	Se pueden aprovechar todo tipo de biomasa. También puede ser utilizado en combinaciones de biomasa con carbón.
<i>UOP Honeywell</i>	Hidrotratamiento	Hidrotratamiento Craqueo/isomerización Refinación	Nafta Bioturbosina Diésel verde	El proceso tiene la flexibilidad para utilizar diferentes aceites vegetales o grasas animales. Es similar a los procesos de refinación de la industria petrolera. Es posible obtener rendimientos hacia turbosina de hasta 36 por ciento.

Todos los procesos mencionados en la tabla anterior permiten obtener bioturbosina, de todos ellos el proceso de hidrotratamiento es el que presenta mayor grado de avance y la bioturbosina obtenida se encuentra certificada ante la ASTM desde el 11 de julio de 2011, año en el cual se registra el primer vuelo con combustible de aviación renovable. Los

registros de los vuelos se presentan en la tabla 7 (Chiaramonti y Prussi, 2014).

Tabla 7. Registro de vuelos usando combustible de aviación renovable (Chiaramonti y Prussi, 2014).

Vuelo	Compañía	Fecha	Trayectoria	Materia prima
<i>KLM</i>	SkyNRG	22 junio 2011	Amsterdam-París	Aceite de cocina usado
<i>Lufthansa</i>	Neste Oil	15 julio 2011	Hamburgo-Frankfurt	Mezcla de materia primas
<i>Finnair</i>	SkyNRG	18 julio 2011	Amsterdam-Helsinki	Aceite de cocina usado
<i>Interjet</i>	ASA	21 julio 2011	Ciudad de México-Tuxtla Gutiérrez	Jatropha
<i>Aeroméxico</i>	ASA	1 agosto 2011	Ciudad de México-Madrid	Jatropha
<i>Airfrance</i>	SkyNRG	13 octubre 2011	Toulouse-París	Aceite de cocina usado
<i>UNITED</i>	Solazyme	7 noviembre 2011	Houston-Chicago	Algas
<i>Lufthansa</i>	Nestle OilMi	12 enero 2012	Frankfurt-Washington	Mezcla de reservas de comida
<i>Jetstar</i>	SkyNRG	19 abril 2012	Melbourne-Hobart	Aceite de cocina

<i>Air Canada</i>	SkyNRG	18 junio 2012	Toronto- Ciudad de México	usado Aceite de cocina usado
<i>Aeroméxico</i>	ASA	18 junio 2012	Ciudad de México-Sao Paulo	Mezcla de materias primas
<i>KLM</i>	SkyNRG	8 marzo 2013	Nueva York- Amsterdam	Aceite de cocina usado
<i>KLM</i>	SkyNRG	16 mayo 2014	Amsterdam- Aruba	Aceite de cocina usado
<i>Finnair</i>	SkyNRG	23 septiembre 2014	Helsinki- Nueva York	Aceite de cocina usado
<i>Norwegian</i>	SkyNRG	11 noviembre 2014	Bergen-Oslo	Aceite de cocina usado

Alrededor del mundo se han realizado exitosamente más de 1,700 vuelos impulsados con biocombustibles de aviación, en México se han realizado un total de 36 vuelos y suministrado 109,693 litros de bioturbosina (Auxiliares, 2013).

3.9 TRANSESTERIFICACIÓN

Los biocombustibles se obtienen generalmente mediante un proceso de transesterificación que consiste en la reacción de un triéster de glicerilo con un alcohol, comúnmente los alcoholes más utilizados son el metanol y el etanol. El metanol se utiliza con frecuencia debido a su bajo costo y a

sus ventajas físicas y químicas (es polar y es un alcohol de cadena corta); además, el metanol reacciona rápidamente con los triglicéridos y se disuelve fácilmente en álcalis (Ortega *et al.*, 2014).

Para realizar una reacción de transesterificación estequiométricamente es necesario mantener una relación molar 6:1 o 7:1 metanol:aceite, para desplazar el equilibrio hacia la formación de producto; es decir, se agrega metanol en exceso (Orduña, 2010) para evitar la reversibilidad en la reacción y favorecer el equilibrio hacia la formación de biocombustible.

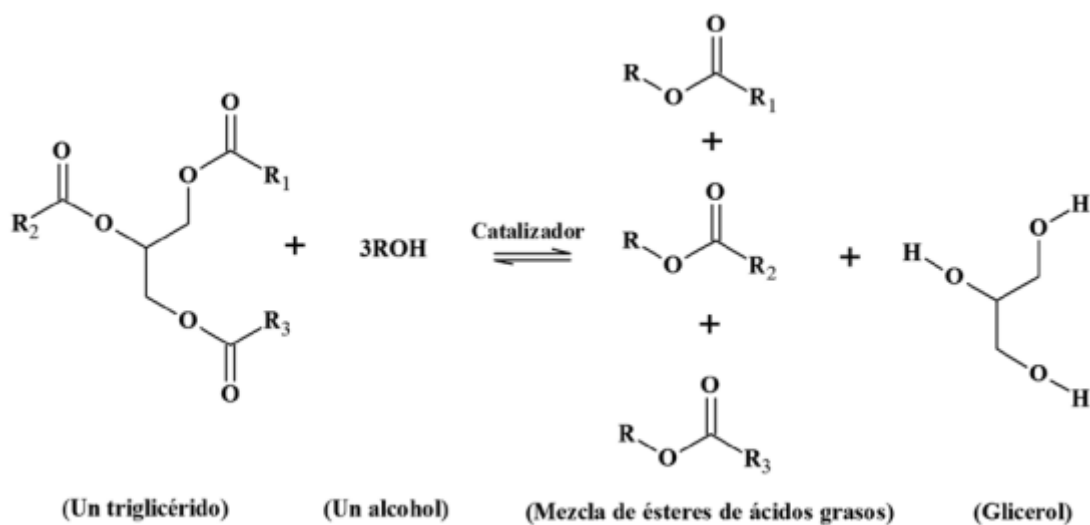


Figura 2. Transesterificación de un triglicérido con alcohol. Tomado y adaptado de (Leung y Lenung, 2010).

El producto recuperado se separa por reposo en dos fases para eliminar el glicerol. La mezcla restante, que es el biocombustible, se destila para quitar el exceso de alcohol. Los ésteres son sometidos a un proceso de lavado con agua, secado al vacío y filtrado para obtener el biocombustible y glicerina, este último tiene uso en la industria farmacéutica y cosmética.

En la transesterificación para evitar una reacción de saponificación se realiza la metanolisis en presencia de un catalizador ácido, el cual se

encarga de formar metil ésteres de ácidos grasos a partir de los ácidos grasos libres. Posteriormente se aplica un catalizador básico a la metanolisis para formar metil ésteres de Ácidos grasos libres. Estos catalizadores ayudan a la formación de FAME óptimos para la obtención de biocombustibles.

La temperatura es un factor importante en la producción de biocombustibles, si se utiliza metanol la temperatura ideal es a partir de 65°C para evitar que se evapore y que la reacción sea agresiva, la presión que se utiliza es la atmosférica (Orduña, 2010) y el tiempo suele ser de una hora aproximadamente.

En la figura 3 se observa el mecanismo de reacción de la transesterificación consiste en una serie de reacciones consecutivas reversibles, donde los triglicéridos se convierten paso a paso a diglicéridos, monoglicéridos y por último a glicerol, produciendo en cada etapa una mol de éster.

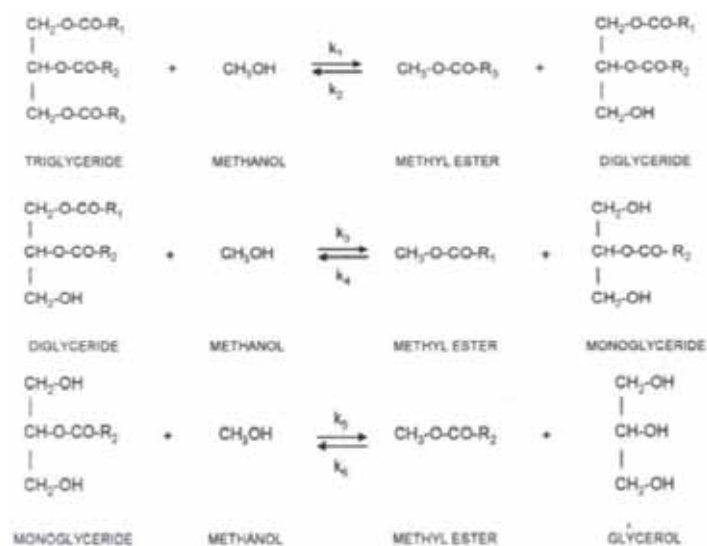


Figura 3. Mecanismo de la reacción de transesterificación usando metanol (Vicente, 2005).

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS ANALÍTICAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

4.1 ESPECTROSCOPIA

La espectroscopia es el estudio de la interacción entre la materia y la radiación, se encarga de medir la intensidad de la radiación en función de la longitud de onda para la identificación de sustancias a través del espectro emitido o absorbido.

Los métodos espectroscópicos se clasifican principalmente como atómicos, moleculares o iónicos basados en si se aplican o no átomos, moléculas o iones. Los métodos se dividen en tres categorías; La espectroscopia de absorción que utiliza la gama de los espectros electromagnéticos en los que la sustancia absorbe fotones como, por ejemplo; espectroscopia infrarroja, ultravioleta, visible y de microondas (Lewis *et al.*, 2004). La segunda categoría es la espectroscopia de emisiones que utiliza la gama de espectros electromagnéticos en la que los fotones son emitidos por la sustancia y la última categoría es la espectrometría de dispersión donde la cantidad de luz que dispersa una sustancia depende de los ángulos de polarización y la longitud de onda (Sylvester, 2013).

4.1.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

Esta espectroscopia se fundamenta en la absorción de la radiación infrarroja por las moléculas de vibración. Pueden distinguirse dos categorías de vibraciones: de tensión y de flexión. Las vibraciones de tensión son cambios en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos mientras que las vibraciones de flexión están originadas por cambios en el ángulo que forman dos enlaces.

La porción infrarroja del espectro electromecánico con longitudes de onda en la zona medio (entre 4000 y 1300 cm^{-1}) se suelen observar una serie de bandas de absorción provocadas por las vibraciones entre dos átomos de la molécula. En la zona del espectro medio las vibraciones derivan de grupos que contienen hidrogeno o de grupos con dobles o triples enlaces aislados.

La zona lejana del espectro IR comprende una longitud entre 1300 cm^{-1} y 400 cm^{-1} , en esta zona la asignación de bandas de absorción a vibraciones moleculares es más difícil de realizar, debido a que cada vibración esta generada por absorciones individuales sumadas lo que se conoce como multiplicidad de las bandas. La flexión de enlaces CH, CO, CN y CC corresponde a la zona de la huella dactilar, zona donde se presentan pequeñas diferencias en la estructura y constitución de las moléculas alcanzando las variaciones moleculares en los máximos de absorción. En la siguiente figura 5 se observa los grupos funcionales presentes en una longitud de onda de 4000 cm^{-1} a 500 cm^{-1} .

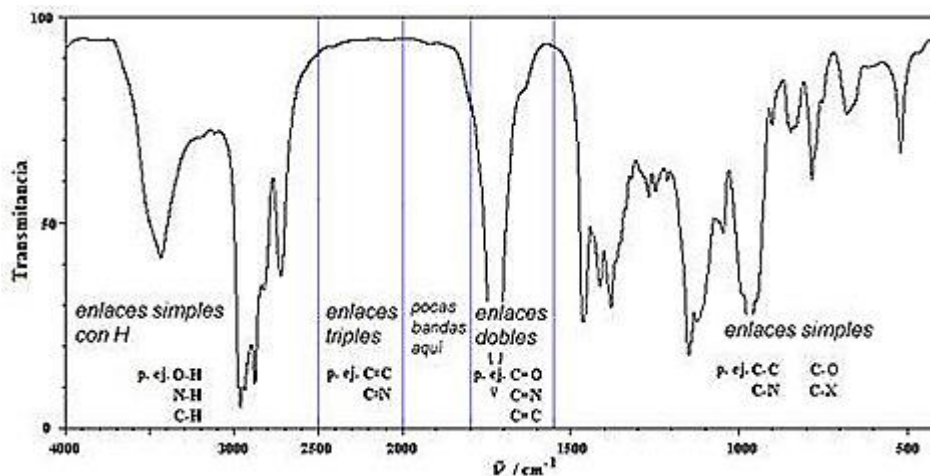


Figura 4. Espectro IR típico en transmitancia con bandas características de los grupos funcionales, obtenido de Triplenlace, 2012.

La espectroscopia IR permite estudiar prácticamente cualquier muestra con independencia del estado en que se encuentre: líquidos, disoluciones, pastas, polvos, fibras, films, gases o superficies. El espectro vibracional de una molécula se considera una propiedad física única, así entre otras aplicaciones, el espectro IR se puede usar como una huella dactilar en la identificación de muestras desconocidas mediante la comparación de espectros de referencia (Stuart, 2004).

4.2 CROMATOGRAFÍA

La cromatografía es un método físico de separación en el que los componentes a separar se distribuyen entre dos fases: una fase estacionaria de gran área superficial, y una fase móvil la cual percola a través de la primera. El proceso cromatográfico se obtiene como resultado de repetidos procesos de sorción-desorción durante el movimiento de los componentes de la mezcla arrastrados por la fase móvil a través de la fase estacionaria, produciendo una separación debido a las diferencias en las constantes de distribución de los componentes de la mezcla entre la fase estacionaria y la móvil, a la distribución final en función de su posición, o del tiempo de separación se le denomina cromatograma.

La cromatografía es uno de los principales métodos analíticos que permite la separación y cuantificación de los compuestos químicos que están presentes en una mezcla. En la figura 6 se presenta un cromatograma de biodiésel.

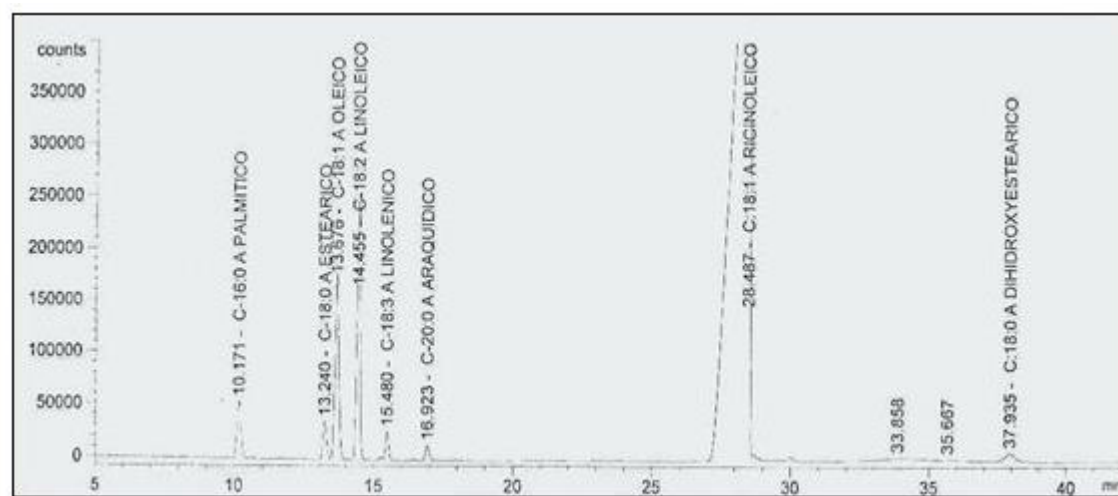


Figura 5. Contenido de FAME en biodiésel producido a 30°C (Guerrero et al, 2010).

4.2.1 CROMATOGRAFÍA DE GASES (CG)

La cromatografía de gases es una de las técnicas analíticas más utilizadas en la industria, medicina, biología y análisis ambiental. Esta técnica permite analizar la separación de compuestos volátiles, su limitación se encuentra en la inestabilidad térmica de los solutos, los cuales deben ser estables a la temperatura requerida para su volatilización (Valcárcel y Gómez, 1988). Por lo general la cromatografía de gases está restringida a la separación de compuestos con un peso molecular menor a 1000 y a una temperatura máxima de trabajo de aproximadamente 400°C.

En cromatografía de gases, la muestra se volatiliza y se inyecta una cantidad de la muestra a separar en una corriente de gas inerte a una temperatura elevada. La elución se produce por el flujo de la fase móvil del gas inerte, la fase móvil no interacciona con las moléculas del analito; su única función es la de transportar el analito a través de la columna (Gomis, 2008). En este punto se produce la separación de los componentes de la mezcla, y pasaran a través de algún sistema de detección, dando lugar a resultados analíticos. Existen básicamente dos tipos de cromatografía de gases:

Cromatografía Gas-Sólido (CGS) cuya fase estacionaria es un sólido y el tipo de equilibrio con la fase móvil es una adsorción.

Cromatografía de Gas-Líquido (CGL) cuya fase estacionaria es un líquido adsorbido sobre un sólido, el equilibrio lo marca el coeficiente de reparto.

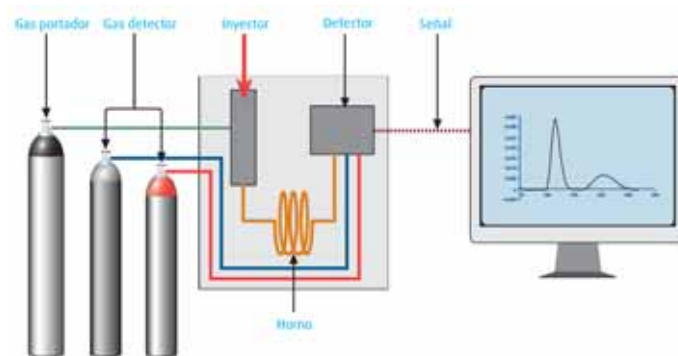


Figura 6. Elementos básicos de la cromatografía de gases tomado de (Linde, 2017)

La separación mediante CGS se fundamenta en las diferencias en volatilidad de la mezcla de los solutos cromatografiados, y en su capacidad para ser adsorbidos por el sólido activo. En la separación por CGL, tiene como fundamento las diferencias en volatilidad y solubilidad de la mezcla de los solutos a separar (Valcárcel y Gómez, 1988).

4.2.2 ESPECTROMETRÍA DE MASAS (EM)

Espectrometría de masas (EM) es una técnica microanalítica que se fundamenta en la determinación de compuestos desconocidos, cuantificar compuestos conocidos, y da información acerca de la estructura y propiedades químicas de las moléculas.

La EM se fundamenta en la ionización de la muestra, y luego en su dispersión, aplicando un campo magnético a estos iones. Los iones con menor masa migrarán más que los que tienen mayor masa, ya que la fuerza magnética ejercida sobre ellos será igual sobre todos los iones. Mediante el bombardeo de la muestra con una corriente de electrones a alta velocidad, la sustancia pierde algunos electrones y se fragmenta

dando diferentes iones, radicales y moléculas neutras (Duarte, 2017), una vez obtenidos los iones son conducidos mediante campos magnéticos hacia el analizador, en esta parte son acelerados y su trayectoria es desviada a una cierta distancia, dependiendo de su relación masa/carga. Cada patrón en el detector corresponderá a un elemento o compuesto químico determinado (Plascencia, 2003).

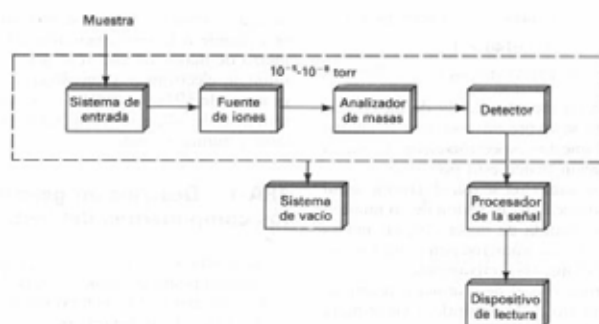


Figura 7. Componentes de un espectrómetro de masas tomado de (Gomis, 2008)

4.2.3 CROMATOGRAFÍA DE GASES – ESPECTROMETRÍA DE MASAS (CG/EM)

La CG/EM es un método que combina las características propias de cada equipo para la identificación y cuantificación de mezclas de sustancias volátiles y semivolátiles dentro de una prueba. La separación de dichas sustancias depende de la diferente distribución de las sustancias estudiadas entre la fase móvil y estacionaria que conforman el sistema. El tiempo de retención es un factor importante dentro del sistema, ya que permite que las sustancias sean fragmentadas y analizadas en el espectro de masas gracias al uso de columnas cromatográficas, las cuales pueden ser comparadas con información contenida del espectrómetro de masas del *National Institute of Standards and Technology* (NAIST) que constituye

un filtro altamente selectivo de los iones característicos, pues constituyen una verdadera “huella dactilar” de cada compuestos formados en la cámara de ionización (Stashenko y Martínez, 2012).

Estos dos equipos combinados permiten un grado más preciso de identificación de sustancias que cada instrumento utilizado por separado. El acoplamiento CG-EM permite combinar sinérgicamente la alta resolución cromatográfica con las sensibilidades y selectividades altas de la espectrometría de masas (Stashenko y Martínez, 2012).

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA

La investigación se llevó acabo en el Laboratorio de Análisis de Procesos de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, edificio W planta baja, a finales del año 2016.

5.1 PRETRATAMIENTO DEL ACEITE DE CANOLA

El aceite empleado para este trabajo fue de canola obtenido de la cafetería de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, edificio I planta baja. Cafetería en la cual se reporta un consumo diariamente de 60 L de aceite para la preparación de alimentos por (Orduña, 2010).

5.1.1 FILTRADO AL VACÍO

Con el fin de eliminar residuos de comida en los aceites, es necesario que pasen por un sistema de filtrado.

Tabla 8. Material para filtrado al vacío

<i>Material</i>	<i>Reactivos</i>
<i>Papel filtro de 0.5 mm</i>	Aceite residual
<i>Matraz Kitasato de 1 L</i>	
<i>Bomba de vacío</i>	
<i>Embudo buchner</i>	

Montaje del sistema de vacío.

1. Ajustar el embudo con el papel filtro al matraz Kitasato.
2. Conectar el matraz Kitasato al sistema de vacío de la bomba.
3. Verter lentamente el aceite en el embudo.
4. Vaciar el aceite filtrado.

5.1.2 LAVADO DEL ACEITE

Para eliminar el agua presente en el aceite, se empleó el método reportado por (Betanzos, 2011).

Tabla 9. Material para el lavado del aceite.

<i>Material</i>	<i>Reactivo</i>
<i>Parrilla</i>	Agua
<i>Vaso de precipitado</i>	
<i>Embudo de separación</i>	Aceite residual
<i>Vidrio de reloj</i>	

1. El aceite se calienta a 80°C y se somete a agitación severa en una parrilla de calentamiento con agitación.
2. Se agrega un volumen de agua igual al del aceite en el vaso de precipitados que se encuentra en la parrilla, y se deja a la misma temperatura y agitación durante 20 minutos.
3. Posteriormente se vacía el contenido de vaso de precipitados en un embudo de separación, y se deja decantar durante 24 horas.
4. Se separa el aceite que se encuentra en el embudo de separación, y se hierve a una temperatura de 110°C durante 2 horas.
5. Con la ayuda de un vidrio de reloj se revisa que no se condense agua en él, si hay condensado se deja a la misma temperatura por

más tiempo hasta que no se condense agua, si esto sucede el agua se habrá eliminado del aceite.

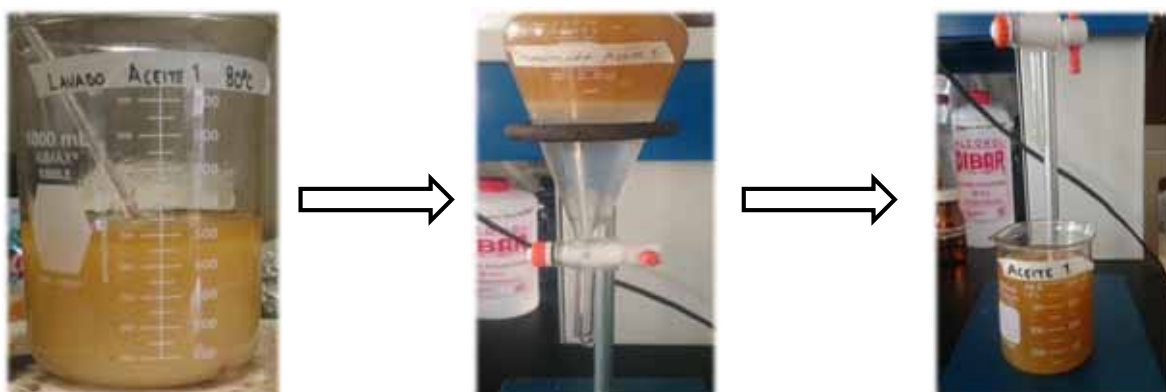


Figura 8. Proceso del lavado del aceite residual

5.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS ACEITES

5.2.1 DENSIDAD

La densidad permite medir la ligereza o pesadez de una sustancia, se define como el cociente entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

Tabla 10. Material para medir la densidad.

Material	Reactivos
Probeta graduada de 10 ml	Aceite residual
Pipeta de 2 ml	
Balanza analítica	

1. Se coloca la probeta graduada de 10 ml en la balanza analítica, y se tara.

2. Con una pipeta de 2 ml se toma más de 1 ml de las muestras de aceite.
3. El aceite se agrega a la probeta hasta completar 5 ml.
4. Se lee el peso del aceite.

El cálculo de la densidad se obtendrá mediante la fórmula:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Donde ρ es la densidad en [g/ml], M representa a la masa en gramos [g] y V es el volumen en unidades de mililitros [ml].



Figura 9. Densidad del aceite residual

5.2.3 pH

El pH es una medida de alcalinidad o acidez en una solución, mide la cantidad de iones hidrógeno, en este caso los iones que están contenidos en los aceites residuales.

Tabla 11. Material para medir pH

<i>Material</i>	<i>Reactivos</i>
<i>Vasos de precipitado de 50 ml</i>	Aceite residual
<i>Tiras indicadoras de pH</i>	

1. Se depositan 20 ml de aceite en un vaso de precipitado.
2. Se introduce una tira indicadora de pH, esperar unos segundos y retirar la tira.
3. Comparar inmediatamente, con la escala de colores que viene en el empaque, donde coincidan los cuatro colores será el valor de pH.

5.2.4 ÍNDICE DE ACIDEZ

El índice de acidez de un aceite o grasa se define como el número de miligramos de hidróxido de sodio requeridos para neutralizar la acidez libre por gramo de muestra, su resultado se expresa como el porcentaje de ácido oleico presente en la muestra (Bolaños, Lutz, & Herrera, 2003).

En este trabajo se aplica el método propuesto en la NMX-F-101-SCFI-2012 Determinación de ácidos grasos libres.

Tabla 12. Material para medición del índice de acidez

Material	Reactivos
Balanza Analítica de 210 g	Hidróxido de potasio
Matraz aforado de 250 ml	Etanol grado 96
Matraz Erlenmeyer de 250 ml	Éter dietílico
Probeta de 100 ml	Fenolftaleína
Gotero	
Soporte universal	
Pinzas para soporte universal	
Bureta de 50 ml	
Embudo	

Preparación del valorante

1. En la balanza analítica se pesan aproximadamente 1.40 g de hidróxido de potasio.
2. Se agrega el hidróxido de potasio al matraz aforado, se introduce etanol 96° y se diluye el hidróxido de potasio hasta llegar al aforo.



Figura 10. Solución alcohólica de hidróxido de potasio 0.1 N

Preparación del analito

1. En una balanza analítica se coloca un matraz Erlenmeyer se tara, y se agrega 30 g de aceite.
2. Al matraz Erlenmeyer se adiciona con una probeta 75 ml de etanol 96° y 75 ml de éter dietílico, al analito se agrega 3 ml de solución de fenolftaleína.



Figura 11. Preparación del analito con 30 g de aceite residual

Valoración

1. En un soporte universal se instalan las pinzas y se detiene en ellas una bureta de 50 ml.
2. Se coloca un embudo en la bureta y se adiciona la solución alcohólica de 0.1 N de hidróxido de potasio hasta completar los 50 ml.

3. Debajo de la bureta se coloca el matraz Erlenmeyer, se deja pasar el valorante y se agita vigorosamente el matraz Erlenmeyer.
4. Se detiene la adición del valorante cuando el analito ha adquirido un ligero color rosa y se mantiene por 15 segundos.
5. Se lee la cantidad de valorante que se añade al analito para conocer su concentración.



Figura 12. Valoración del analito

5.4 PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

En este trabajo la producción de biodiésel se llevó a cabo mediante una reacción de transesterificación con metanol, por lo que también se le conoce como metanolisis. El catalizador utilizado fue hidróxido de sodio.

Tabla 13. Material para la producción de biodiésel

<i>Material</i>	<i>Reactivo</i>
<i>Parrilla eléctrica</i>	Aceite residual 200 ml
<i>Matraz Erlenmeyer de 500 ml</i>	Metanol
<i>Matraz Erlenmeyer de 250 ml</i>	Hidróxido de sodio
<i>Agitador magnético de 8 cm</i>	
<i>Agitador magnético de 2 cm</i>	
<i>Probeta de 100 ml</i>	
<i>Termómetro</i>	
<i>Tapón horadado</i>	
<i>Papel parafilm</i>	

Producción del metóxido de sodio

1. En una balanza analítica se pesan 1.95 g de hidróxido de sodio.
2. El hidróxido de sodio se deposita en el matraz Erlenmeyer de 250 ml y se introducen 55 ml de metanol.
3. Se introduce un agitador magnético dentro del matraz Erlenmeyer y se coloca rápidamente un tapón horadado con el termómetro. Se sella con papel parafilm para evitar que se evapore la reacción.
4. Se lleva el matraz Erlenmeyer a la parrilla de calentamiento manteniendo una temperatura constante de 65°C durante una hora o hasta que se haya disuelto totalmente el hidróxido de sodio.

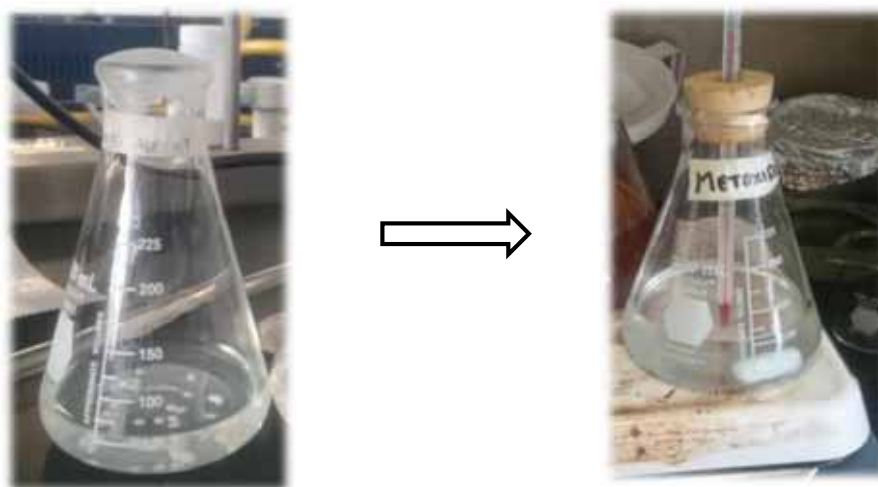


Figura 13. Producción del metóxido de sodio

Producción de metil ésteres de ácidos grasos

1. Depositar 200 ml de aceite en un matraz Erlenmeyer e introducir un agitador magnético de 8 cm de largo.
2. Colocar el matraz Erlenmeyer en la parrilla con agitación a una temperatura constante de 65°C.
3. Cuando el aceite y el metóxido de sodio tienen la misma temperatura a la cual se va a llevar a cabo la reacción se añade el metóxido al aceite.
4. Al agregar el metóxido de sodio al aceite se debe de mantener la temperatura constante durante 3 horas para que se complete la reacción.



Figura 14. Metil ésteres de ácidos grasos

5.4.1 SEPARACIÓN DEL BIODIÉSEL DE LA GLICERINA

1. En un soporte universal se coloca un anillo para soporte.
2. En un embudo de decantación se deposita el contenido del matraz Erlenmeyer de 500 ml.
3. Se coloca el embudo de decantación en el anillo del soporte universal.
4. Esperar 24 horas para la separación del biodiésel de la glicerina, y proceder a decantar (método de separación entre dos líquidos que poseen densidades diferentes) la glicerina.

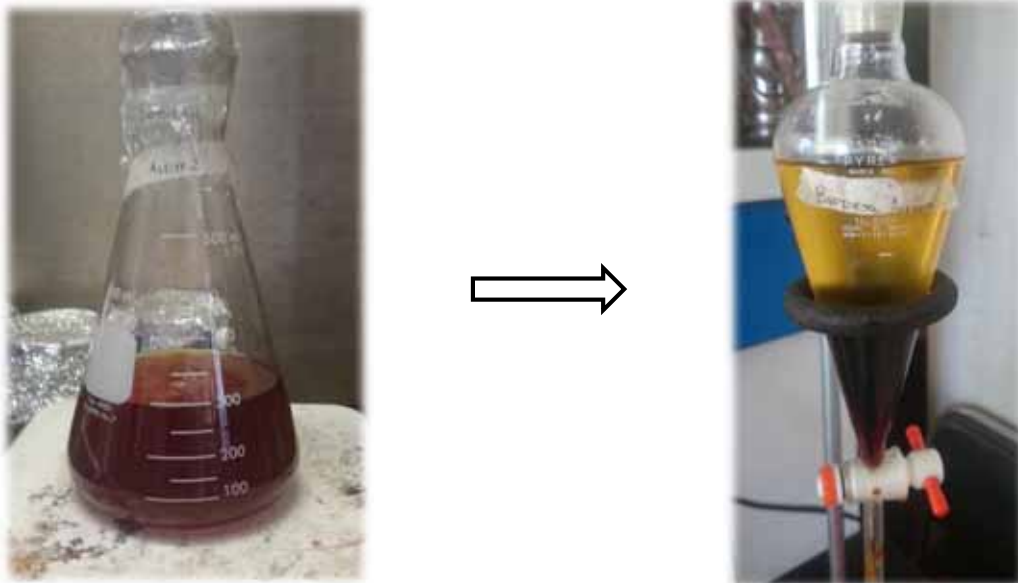


Figura 15. Proceso de separación del biodiésel y la glicerina

5.4.2 LAVADO DEL BIODIÉSEL

1. El biodiésel se deja en el embudo de decantación y se le agrega 1/3 en volumen de agua destilada.
2. Se agita vigorosamente y se deja separar durante 24 horas para decantar de nuevamente.
3. Ya que se haya eliminado el agua del biodiésel, se coloca en un matraz Erlenmeyer de 500 ml y se agrega el agitador de 8 cm de longitud.
4. El matraz Erlenmeyer se coloca en una parrilla eléctrica.
5. Se calienta lentamente el biodiésel hasta llegar a una temperatura de 110°C con agitación inferior a 1000 rpm para eliminar el metanol.
6. El biodiésel permanece en calentamiento hasta que dejen de aparecer burbujas en el biodiésel y se aprecie un biodiésel transparente.
7. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se mide la cantidad del biodiésel producido con una probeta de 500 ml.

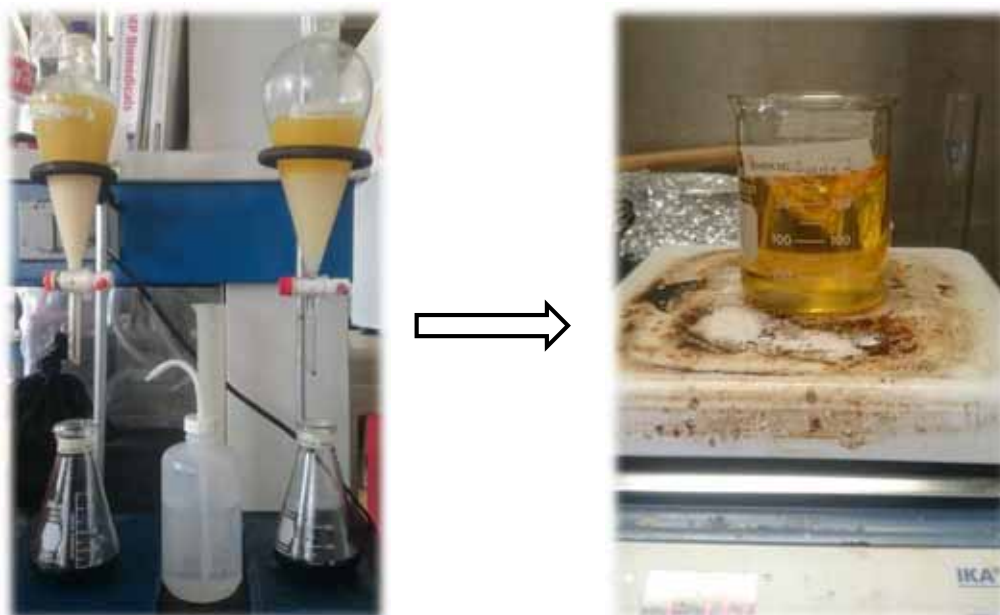


Figura 16. Lavado del biodiésel



Figura 17. Medición del biodiésel obtenido

5.4.3 MEDICIÓN DEL PH

Para conocer la calidad del biodiésel producido es necesario realizar la medición del pH de la siguiente manera:

1. En el matraz Erlenmeyer de 250 ml se coloca una cantidad de biodiésel ya limpio.
2. Se introduce una tira de papel pH en el matraz Erlenmeyer.
3. Se toma la lectura del pH correspondiente.

5.4.4 CALCULO DEL RENDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para obtener el rendimiento experimental de la reacción de transesterificación se utiliza la siguiente formula:

$$\eta = \frac{(\rho db)(mdb)}{A}$$

Donde η es el rendimiento de la reacción para producir biodiésel, ρdb es la densidad del biodiésel y mdb es la masa del biodiésel que se obtuvo en la medición de la probeta, A es la masa en gramos del aceite con la que se realizó la metanolisis.

5.4.5 CALCULO DEL PORCENTAJE DE CONVERSIÓN

Este porcentaje deriva de índice de acidez, y nos permite conocer qué porcentaje de la reacción de transesterificación se ha completado correctamente. Se ha calculado de la siguiente manera:

$$\% \text{ conversión} = \frac{IA_{Aceite} - IA_{Biodiesel}}{IA_{Aceite}} \times 100$$

Donde IA_{Aceite} es el índice de acidez del aceite e $IA_{Biodiesel}$ es el índice de acidez del biodiésel ambos en unidades de mg KOH/g muestra.

5.5 PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA

La turbosina es un combustible derivado del petróleo es aceitoso e incoloro, está compuesto por hidrocarburos de diez a doce átomos de carbono. Su proceso de producción se obtiene mediante destilación, pues permite hacer una separación de los hidrocarburos aprovechando sus diferentes puntos de ebullición. Por lo que en esta investigación se realiza una destilación al vacío a una temperatura de 100°C para la obtención de bioturbosina utilizando como reactivo el biodiésel producido anteriormente.

Tabla 14. Material para la producción de Bioturbosina

<i>Material</i>	<i>Reactivo</i>
<i>Bomba de vacío</i>	Biodiésel
<i>Refrigerante</i>	
<i>Matraz bola</i>	
<i>Vaso de precipitado</i>	
<i>Cabezal de destilación con pozo para termómetro.</i>	
<i>Termómetro</i>	
<i>Parrilla</i>	

1. Depositar la producción de biodiésel en el matraz bola y colocarlo en la parrilla de calentamiento.
2. Conectar el cabezal de destilación y el termómetro en el equipo de destilación.
3. Conectar la bomba de vacío al equipo de destilación.
4. A continuación, el FAME de aceite residual se destila a 200 Pa mediante una bomba de vacío y a una temperatura de 100°C.

5. Una vez realizada la destilación se obtiene una fracción ligera y otra pesada, la fracción ligera es la bioturbosina.



Figura 18. Bioturbosina

5.5.1 ELABORACIÓN DE MEZCLAS.

La principal diferencia de la bioturbosina de la turbosina convencional es la ausencia de componentes aromáticos, lo que provoca que su densidad este por debajo del mínimo establecido en las especificaciones. Por esta razón, la norma ASTM D7566 establece el uso de mezclas de turbosina fósil con hasta 50% de bioturbosina.

Se han realizado mezclas de bioturbosina obtenida con la turbosina comercial en distintas concentraciones para analizar mediante espectroscopia infrarroja el comportamiento de las mismas.

- B5. Mezcla de turbosina convencional con 5% en volumen de bioturbosina.
- B10. Mezcla de turbosina convencional con 10% en volumen de bioturbosina.
- B20. Mezcla de turbosina convencional con 20% en volumen de bioturbosina.

- B100. Bioturbosina en un volumen de 30 ml.
- B1000. Turbosina convencional en un volumen de 30 ml.

Tabla 15. Mezclas de bioturbosina con turbosina

	<i>Turbosina (ml)</i>	<i>Bioturbosina (ml)</i>	<i>Mezcla (ml)</i>
B5	28.5	1.5	30
B10	27	3	30
B20	24	6	30
B100	-	30	30
B1000	30	-	30



Figura 19. Mezclas de bioturbosina con turbosina

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS

La implementación del proyecto permitió la recolección y aprovechamiento de AVU proveniente de la cafetería de la UAM AZC. En la tabla 16 se presentan las características del aceite vegetal usado, las cuales se encuentran dentro de los rangos reportados por Orduña (2010).

Tabla 16. Resultados de densidad y pH del aceite residual

Medición	Aceite Residual Orduña (2010)	Aceite Residual
Densidad a 23°C [g/ml]	0.959	0.979
pH	4.30	4

La densidad y el pH obtenidos en la experimentación son aptos para que el aceite residual se sometiera al proceso de transesterificación y así realizar la producción de biocombustibles.

El índice de acidez representa el grado de descomposición lipolítica de los glicéridos, con respecto al tamaño de la muestra el método de la NMX-F-101-SCFI-2012 define cantidades de 56.2 ± 0.2 gramos de muestra en la cual se espera una acidez menor del 0.2% y para muestras de 28.2 ± 0.2 gramos la acidez esperada se encuentra en un rango entre 0.2 - 1%., el porcentaje se representa en unidades de ácido oleico. El resultado experimental obtenido del índice de acidez del aceite vegetal usado se reporta en la siguiente tabla:

Tabla 17. Índice de acidez del aceite residual

<i>Peso de la muestra en [g]</i>	<i>Normalidad de la solución de KOH</i>	<i>[ml] de solución usados</i>	<i>Índice de acidez [mg de KOH/g muestra]</i>	<i>% de ácidos grasos libres.</i>
28.2	0.1	5.6	1.114	0.564

El índice de acidez y el porcentaje de ácidos grasos libres reportados en esta investigación nos indica que existe la presencia de ácidos grasos no combinados que son el resultado de la descomposición de algunos triglicéridos, esta descomposición se puede deber al tratamiento químico o a la acción bacteriana presente en el aceite residual.

6.2 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.

De acuerdo a la norma ASTM D7566 para biodiésel y ASTM D1655 para bioturbosina, la densidad y el pH son algunos de los parámetros más importantes que definen la calidad de un biocombustible.

En este apartado se reflejan los resultados de la densidad y del pH de cada uno de los biocombustibles producidos, al igual se muestran los resultados para las mezclas de biocombustibles mencionadas anteriormente:

Tabla 18. Resultados de densidad y pH para los biocombustibles

<i>Medición</i>	<i>Biodiésel</i>	<i>Bioturbosina</i>	<i>B5</i>	<i>B10</i>	<i>B20</i>
<i>Densidad [g/ml]</i>	0.893	0.793	0.757	0.790	0.795
<i>pH</i>	7	7	7	7	7

Los resultados obtenidos en la producción de biodiésel y bioturbosina se encuentran dentro del rango que establecen las normas de la ASTM mencionadas anteriormente. Estos resultados en la investigación demuestran que los dos biocombustibles producidos son de buena calidad al poseer un pH de 7, lo que nos indica que se han eliminado los restos de catalizador y metanol agregados en la reacción de transesterificación. La densidad del biodiésel y la bioturbosina, 0.893 g/ml y 0.793 g/ml para ambos respectivamente se encuentran dentro de los parámetros de las normas ASTM. En cuanto a las mezclas que se realizaron con turbosina convencional y bioturbosina el pH se mantuvo constante, las densidades al haber realizado las mezclas aumentaron y no sobrepasaron los límites que exige la norma ASTM D7566.

6.3 RENDIMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Para producir biodiésel se utilizaron 200 ml de aceite residual limpio, con una densidad de 0.979 g/ml, la reacción se llevó a una temperatura de 65°C durante un tiempo de 3 horas. Cuando se obtuvo el biodiésel se produjo una masa de 137 g, se procedió a destilar a una temperatura de 100°C con una presión de 200 Pa durante un tiempo de aproximadamente 2 horas, con el fin de obtener bioturbosina. Se obtuvieron 140 ml de bioturbosina con una masa de 111.02 g. Los rendimientos de los biocombustibles, la relación biodiésel:aceite y bioturbosina:biodiésel se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Resultados del rendimiento de los biocombustibles

<i>Biocombustible</i>	<i>Masa [g]</i>	<i>Rendimiento</i>	<i>Biodiésel: Aceite [g/ml]</i>	<i>Bioturbosina: Aceite [g/ml]</i>
<i>Biodiésel</i>	137.55	70.53%	1.41	-

<i>Biocombustible</i>	<i>Masa [g]</i>	<i>Rendimiento</i>	<i>Biodiésel: Aceite [g/ml]</i>	<i>Bioturbosina: Aceite [g/ml]</i>
<i>Bioturbosina</i>	111.02	80.71%	-	1.75

El rendimiento en la producción de bioturbosina es bueno (80.71%), se encuentra dentro de los rendimientos para la producción de biocombustibles utilizando aceite residual de canola como materia prima (López, 2012).

6.4 ANÁLISIS DE BIOCOMBUSTIBLES CON ESPECTROSCOPIA IR

La espectroscopia infrarroja representa el cambio de amplitud en la vibración de los enlaces químicos de la muestra a analizar causado por la excitación de las vibraciones moleculares al absorber la energía procedente de la luz infrarroja. Esta técnica es la más utilizada para determinar los componentes orgánicos y es el tipo de espectrómetro infrarrojo más utilizado debido a que son más rápidos y fáciles de utilizar obteniendo datos precisos.

Las bandas de absorción características de casi todos los grupos funcionales se encuentran entre 4,000 cm^{-1} y 400 cm^{-1} . Los espectros de infrarrojo se representan como gráficas de absorbancia frente a un número de onda (Murga, 2002).

Los biocombustibles al igual que el aceite vegetal absorben en la región de 2,750 cm^{-1} – 3,000 cm^{-1} correspondiente a los modos de vibración de - CH_2 y - CH_3 . Cuando el reactivo utilizado es metanol, los triglicéridos presentes en el aceite se transforman en ésteres metílicos, los grupos - CH_3 aumentan en el biocombustible compuesto principalmente de alquil

ésteres de ácidos grasos y por consiguiente la intensidad del pico en $2,924\text{ cm}^{-1}$ también aumentan un poco (Hernández, 2017).

Los biocombustibles también dan picos de absorción en el espectro que resulta del alargamiento de los enlaces carbono-carbono. Los enlaces simples carbono-carbono dan lugar a picos muy débiles de muy poca utilidad para la identificación de estructuras. Los dobles enlaces de carbono-carbono dan picos de absorción en la región $1,620\text{ cm}^{-1} - 1,680\text{ cm}^{-1}$ y los enlaces triples carbono-carbono dan picos de absorción entre $2,100\text{ cm}^{-1}$ y $2,680\text{ cm}^{-1}$ (Solomons, 2000).

Para analizar las muestras realizadas en esta investigación, se aplicó la técnica de espectroscopia IR. Se colocó una gota de los biocombustibles sobre el equipo FT-IR Spectrometer de la marca PerkinElmer® para realizar un barrido y ver la relación de intensidad de algunos picos característicos de ciertos grupos funcionales con las propiedades típicas del biodiésel y bioturbosina (Chien *et al*, 2009).



Figura 20. Espectrómetro infrarrojo PerkinElmer

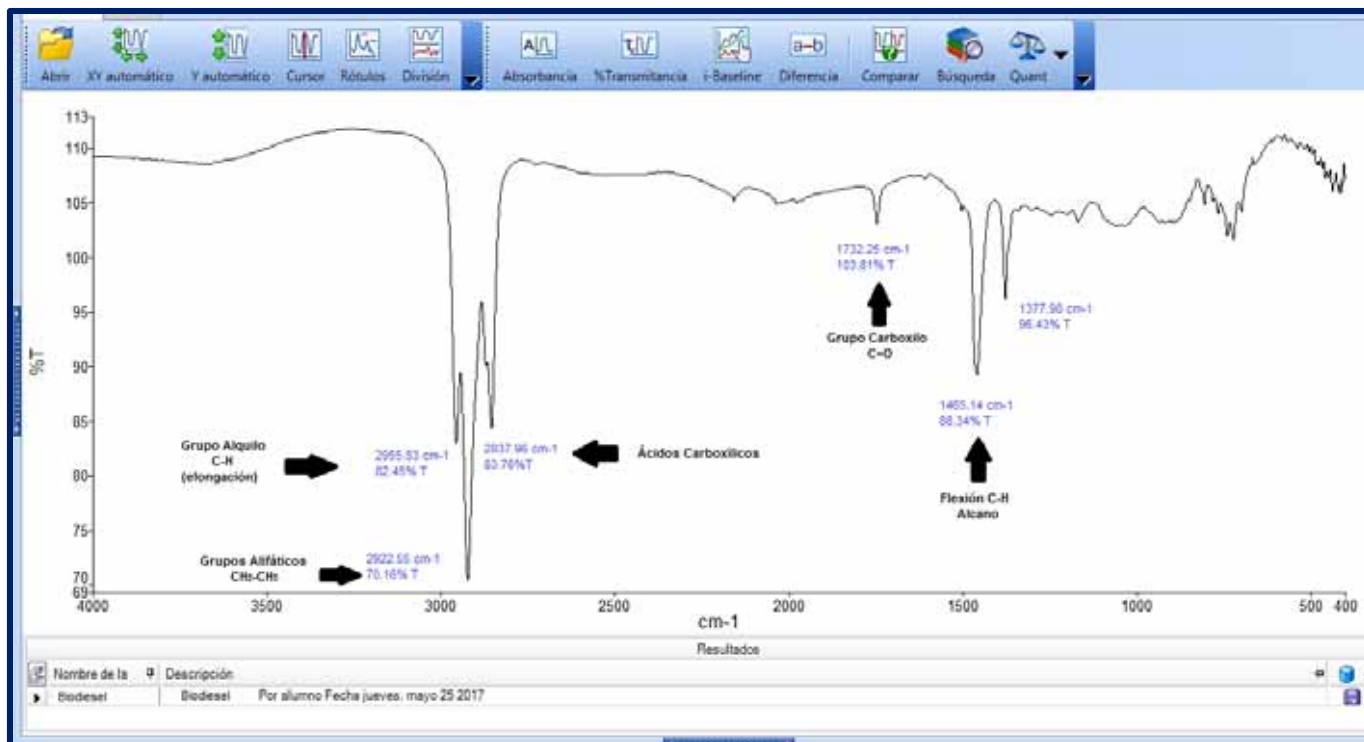


Figura 21. Espectro del biodiésel producido a 65°C

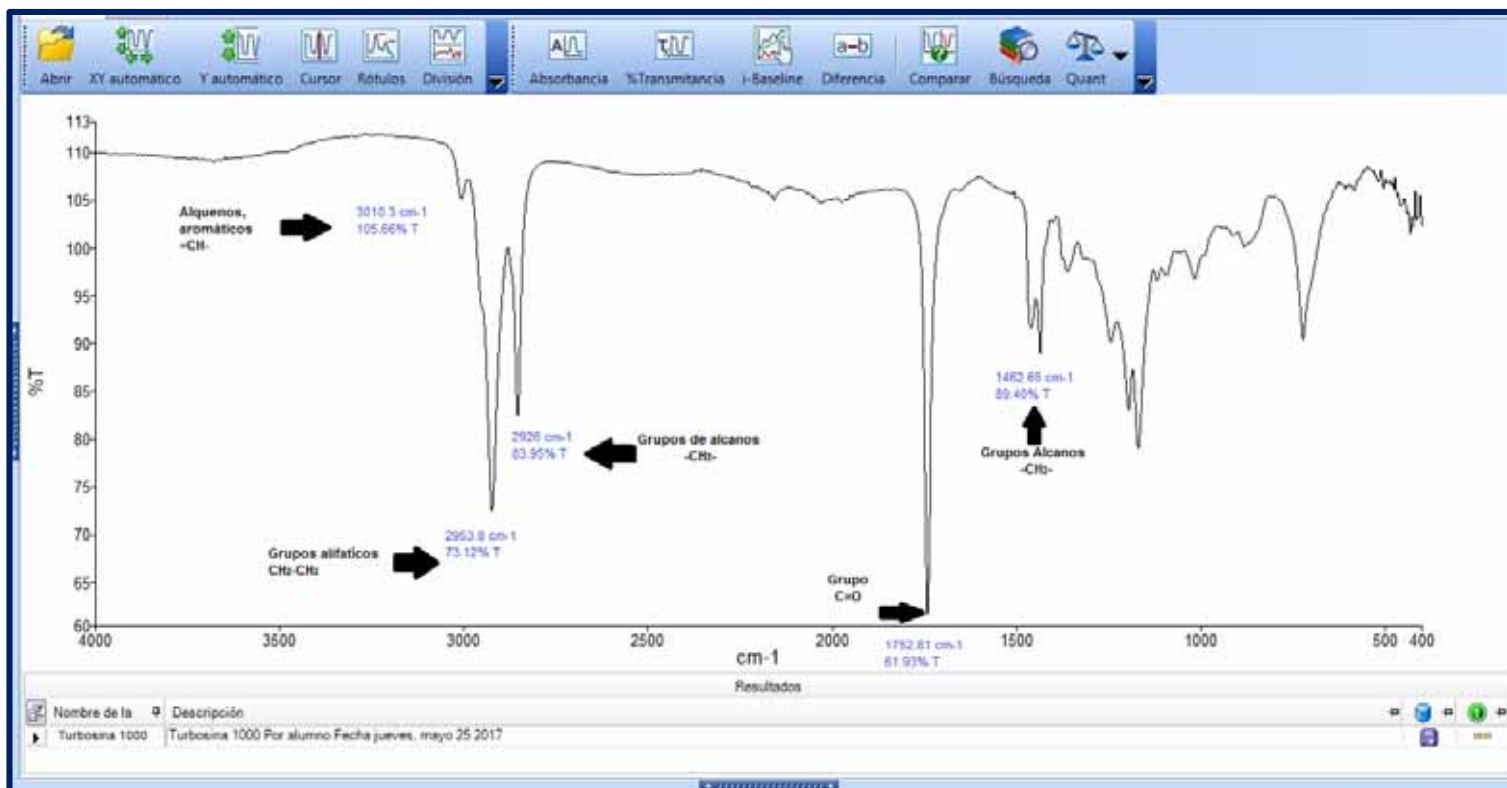


Figura 23. Espectro de la turbosina

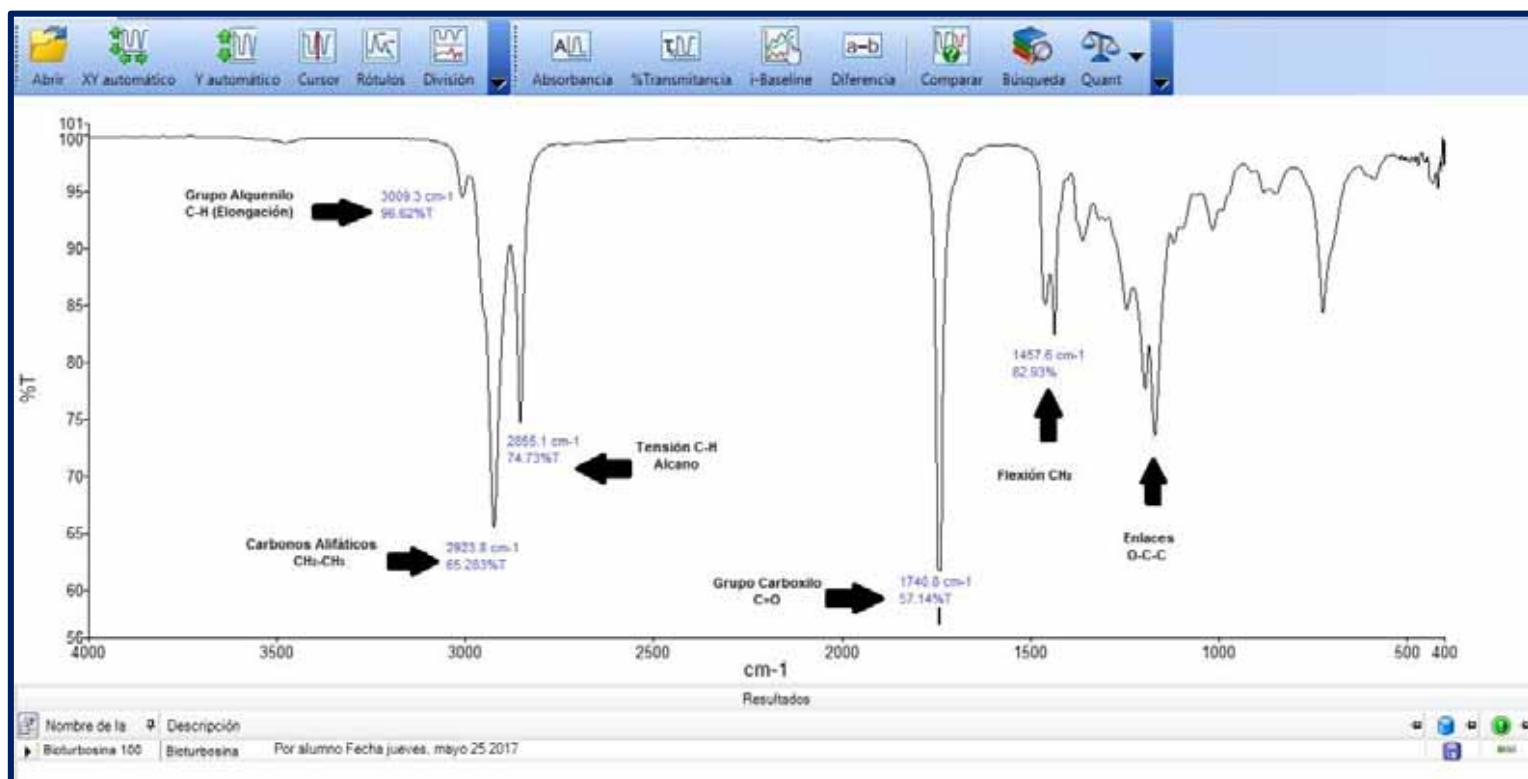


Figura 24. Espectro de la Bioturbosina obtenida a partir de aceites residuales

Al comparar la figura 23 y 24 se observan claramente señales características de la bioturbosina obtenida a partir de aceites residuales, como es un grupo de banda de absorción propia de los metil ésteres que lo conforman, en la región de los grupos funcionales 2000 cm⁻¹ y 1500 cm⁻¹ se encuentra el pico intenso correspondiente al grupo carboxilo (C=O) propio de los ésteres, se encuentra una diferencia mínima con el espectro de la turbosina; para ambos espectros es común la banda de absorción entre 2500 cm⁻¹ y 3000 cm⁻¹, correspondientes al estiramiento de los grupos alifáticos.

6.5 ESPECTROS OBTENIDOS A PARTIR DE UNA MEZCLA DE TURBOSINA CONVENCIONAL CON BIOTURBOSINA.

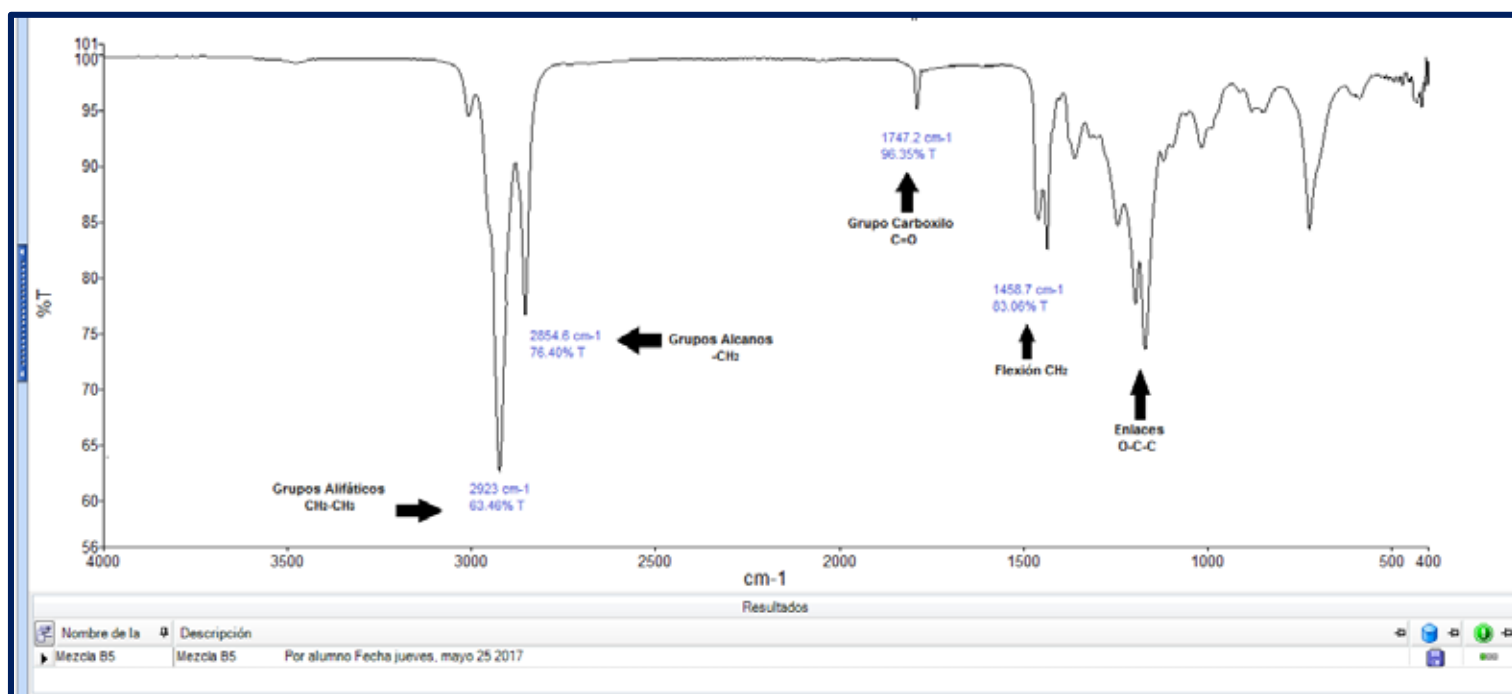


Figura 23. Espectro de la mezcla B5 con 28.5 ml de Turbosina y 1.5 ml de Bioturbosina

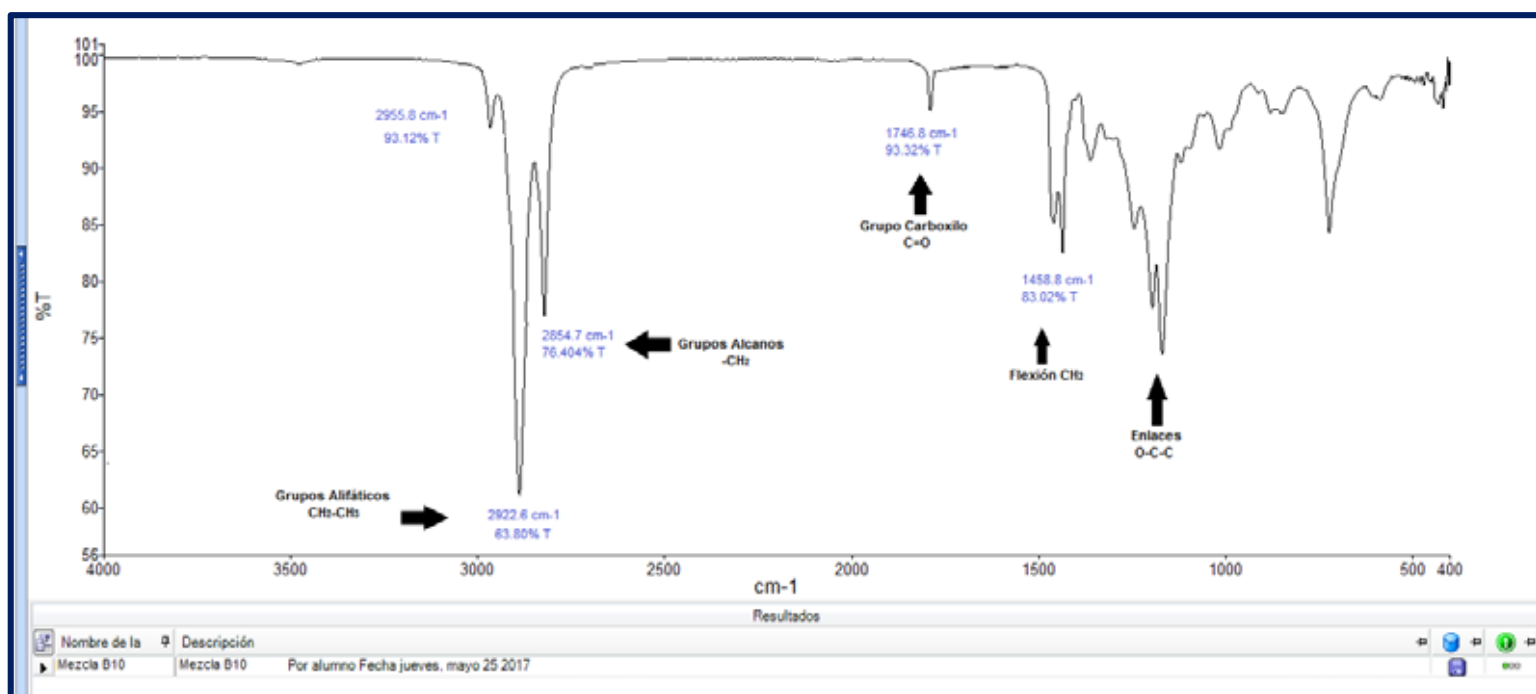


Figura 22. Espectro de la mezcla B10 con 27 ml de Turbosina y 3 ml de Bioturbosina

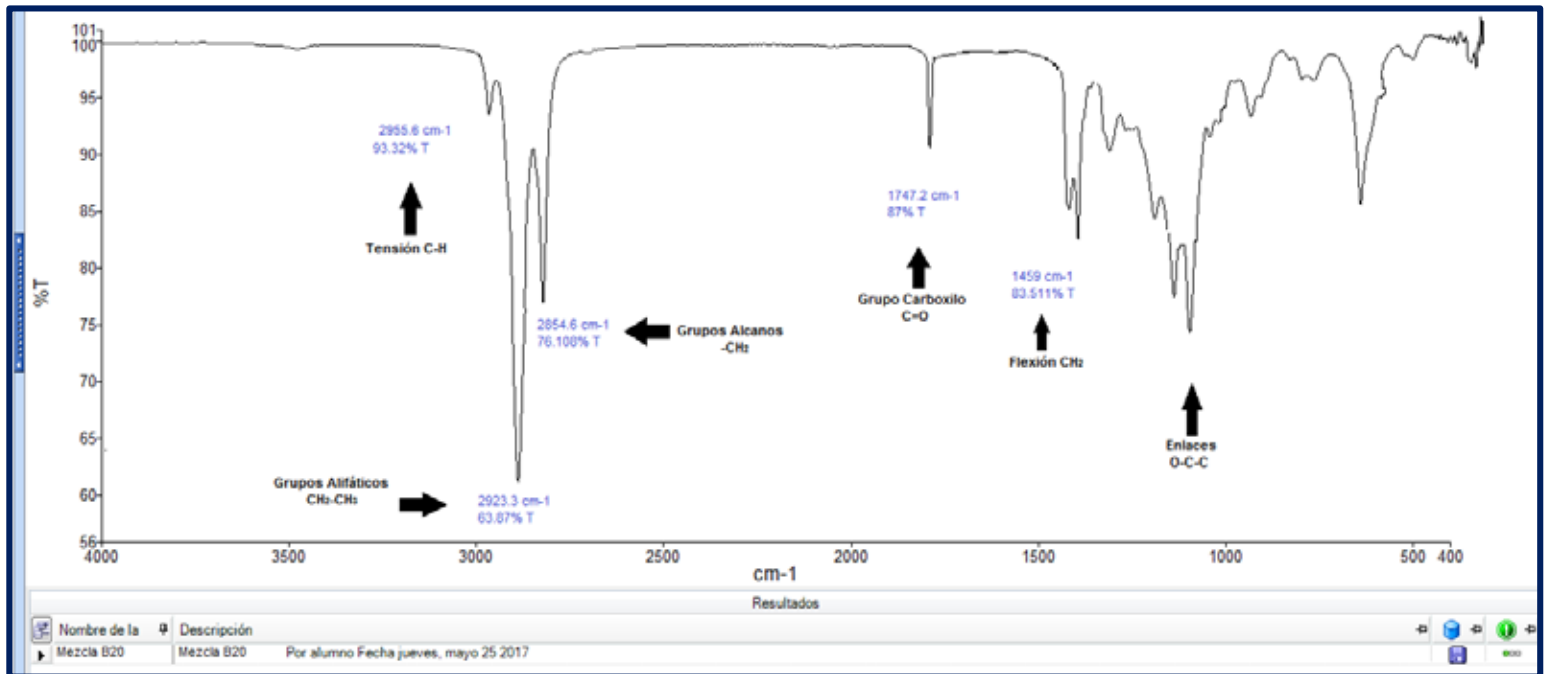


Figura 24. Espectro de la mezcla B20 con 24 ml de Turbosina y 6 ml de Bioturbosina

Las diferencias en las bandas de absorción de las mezclas B5, B10 y B20 son mínimas en la altura, absorbancia y área del pico del grupo carboxilo; se observó que al aumentar la concentración de la bioturbosina con la turbosina la señal del grupo carboxilo presenta una pequeña disminución en la absorción. Los grupos alifáticos en la región de la banda de absorción 2500 cm⁻¹ y 3000 cm⁻¹ presentan un ligero aumento de absorción al realizar las mezclas de turbosina con bioturbosina.

6.6 ANÁLISIS DE FAMES UTILIZANDO CROMATOGRAFÍA DE GASES ACOPLADO A ESPECTROMETRÍA DE MASAS

Se tomaron 20 µl de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) que fueron diluidos en 800 µl de heptano y se inyectaron 1 µl en el cromatógrafo de gases (PerkinElmer Clarus® 580) equipado con un detector de masas (PerkinElmer Clarus® SQ 8S) posteriormente se identificaron los compuestos.

A continuación, se presenta el cromatograma de la producción de biodiésel utilizando aceites residuales:

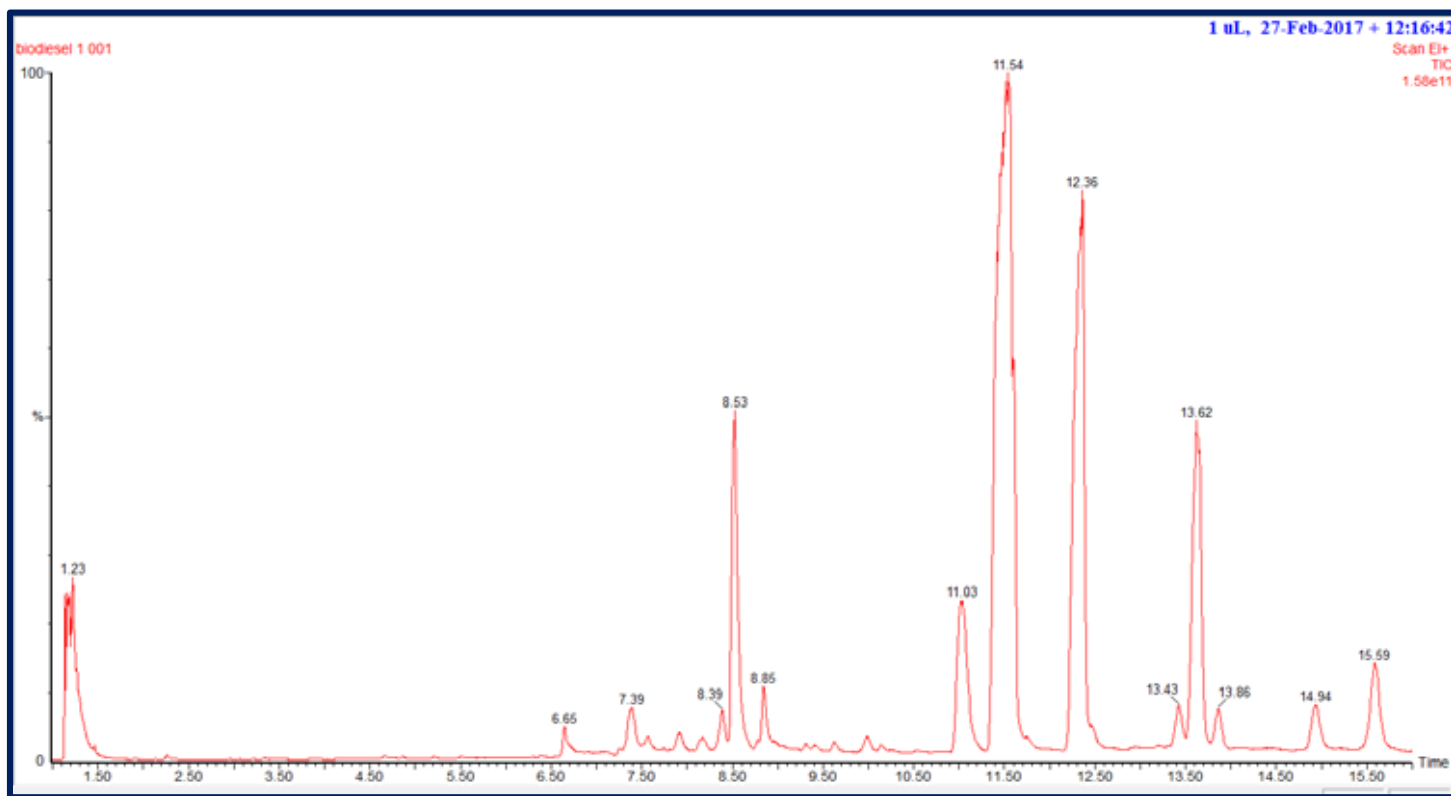


Figura 25. Cromatograma del Biodiésel producido a 65°C

Para la identificación de los metil ésteres se compararon los tiempos de retención de los estándares de ácidos grasos, los espectros obtenidos fueron comparados con los espectros de la biblioteca del equipo. En la siguiente tabla se muestran los ácidos grasos que se determinaron en la producción de biodiésel con aceites residuales:

Tabla 20. Resultados de los ácidos grasos en la producción de biocombustibles.

Tiempo de retención (min)	Familia de ácido graso	Nombre común	Ácido graso (Metil éster)	Representación abreviada
8.541		Ácido Pentadecílico	Ácido Pentadecanoico	
8.861	ω -7	Ácido Palmitoleico	Ácido 9-Hexadecenoico	C18:1
11.422	ω -9	Ácido Oleico	Ácido 9-Octadecenoico	C18:1
12.283	ω -6	Ácido Linoleico	9,12-Octadecadienoico	C18:2
13.613	ω -3	α Linoléico	9,12,15-Octadecatrienoico	C18:3
13.858		Homogamma Linoleico	11,14,17-Eicosatrienoico	C20:3
14.954		Ácido Araquídico	Ácido Eicosanoico	
15.584			Cis 13-Eicosanoico	

Observando la composición de ésteres metílicos de ácidos grasos del biocombustible obtenido con aceite residual hay predominio de ácido linoleico, ácido pentadecílico y ácido α linoleico: ácidos esenciales que pueden ser extraídos del aceite de lino, oliva o canola que sirven para realizar funciones metabólicas, el último ácido obtenido en una de las

mayores proporciones es el alfa linoleico, un derivado de los dos aceites mencionados anteriormente.

Los tiempos de retención y los ácidos grasos encontrados en esta investigación, coinciden con los ácidos grasos que se obtuvieron en 2010 por (Orduña, 2010) utilizando aceite residual proveniente de la cafetería de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

A continuación, se presentan las estructuras de cada uno de los ácidos grasos mencionados en la tabla anterior:

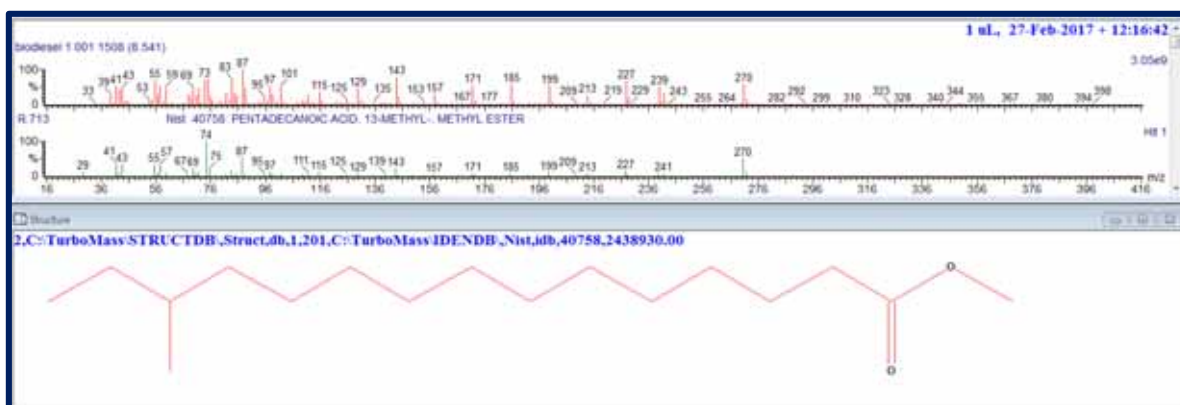


Figura 26. Espectro de masas y estructura del Ácido Pentadecílico ($C_{15}H_{30}O_2$)

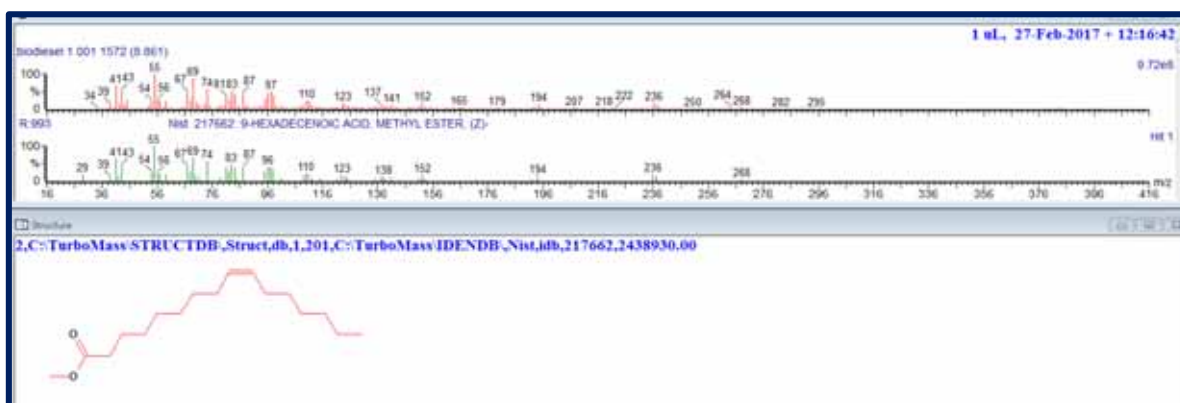


Figura 27. Espectro de masas y estructura del Ácido Palmitoleico ($C_{16}H_{30}O_2$)

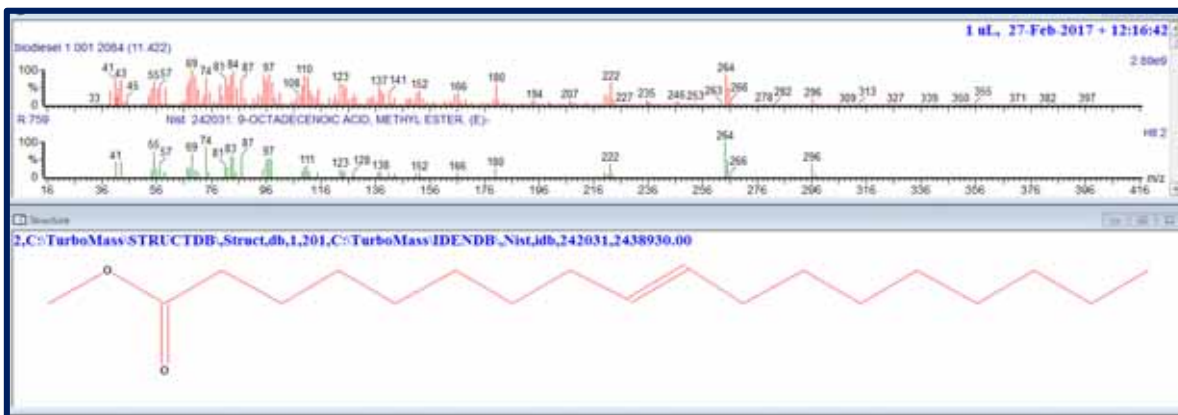


Figura 28. Espectro de masas y estructura del Ácido Oleico (C₁₈H₃₄O₂)

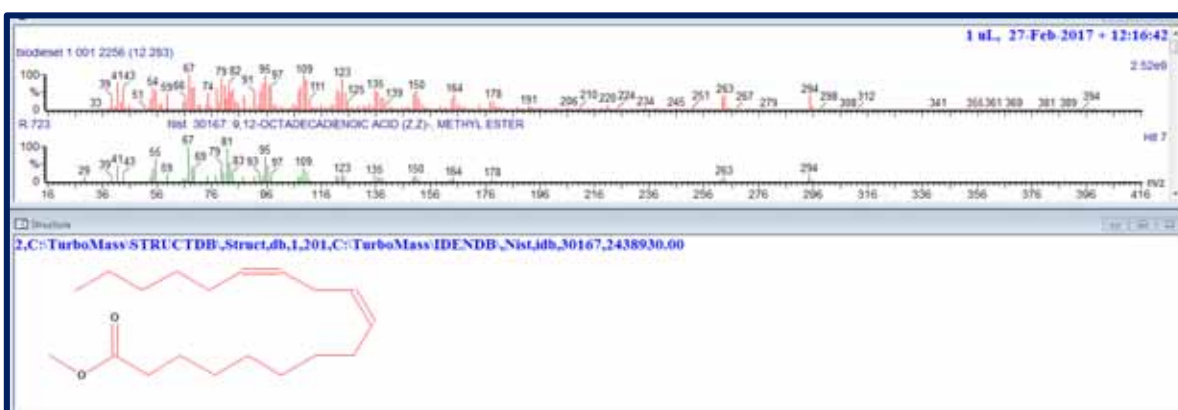


Figura 29. Espectro de masas y estructura del Ácido Linoleico (C₁₈H₃₂O₂)

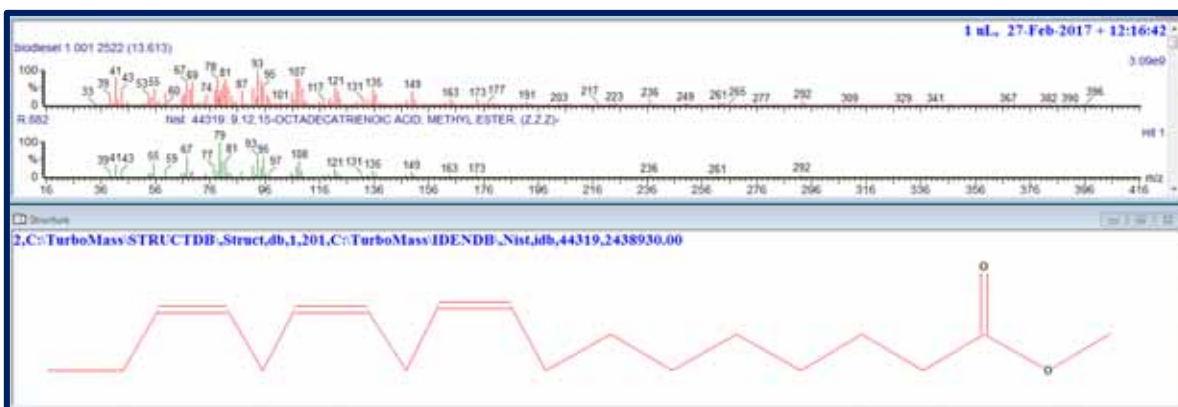


Figura 30. Espectro de masas y estructura del Ácido α-Linolénico (C₁₈H₃₀O₂)

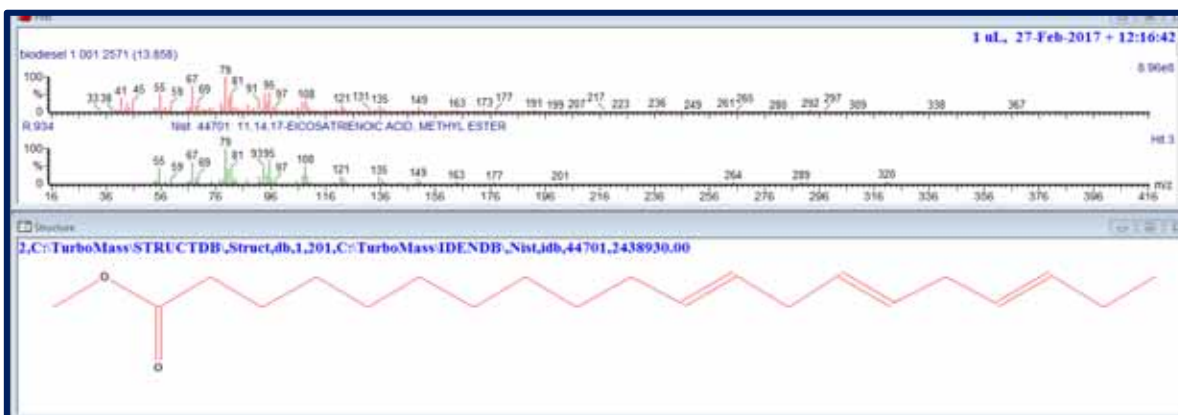


Figura 31. Espectro de masas y estructura del Ácido Homogamma Linoleico (11,14,17 Eicosatrienoico)

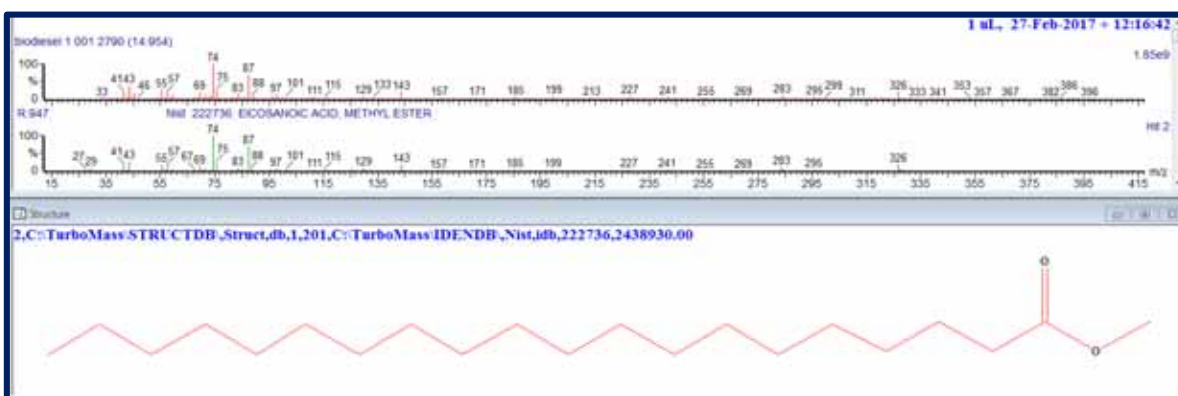


Figura 32. Espectro de masas y estructura del Ácido Araquídico (C₂₀H₄₀O₂)

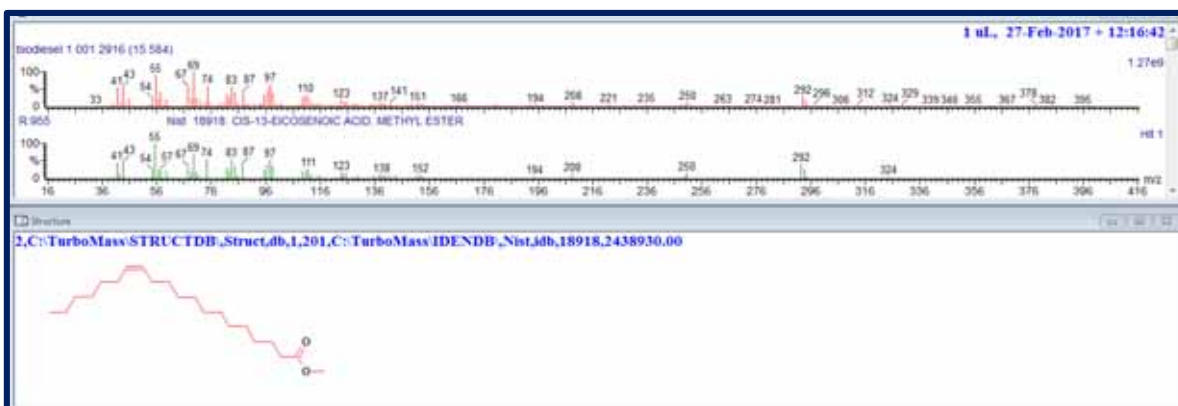


Figura 33. Espectro de masas y estructura del Ácido Cis 13-Eicosanoico

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Los objetivos planteados al inicio de esta investigación se cumplieron satisfactoriamente: se logró hacer una producción de biodiésel con aceite residual proveniente de la cafetería de la UAM-A para después por medio de destilación optimizar el proceso a una temperatura de 100°C con una presión de 200 Pa para la producción de bioturbosina. Utilizando técnicas analíticas como la espectroscopia infrarroja se identificaron los grupos orgánicos a través del análisis de la intensidad de los picos característicos del biodiésel y de la bioturbosina.

La caracterización fisicoquímica del aceite permitió conocer su pH, temperatura, densidad, índice de acidez y su porcentaje de ácidos grasos libres (ver Tabla 16 y Tabla 17) para así poder ser utilizado como materia prima para la producción de biodiésel y bioturbosina.

Una vez que se realizó la producción de metil esterres a 65°C con un tiempo de reacción de 3 horas se obtuvo biodiésel el cual se caracterizó obteniendo una densidad de 0.893 g/ml, un pH de 7 y una masa de 137 g, estos valores están dentro de la norma de la ASTM D6751.

La optimización de las variables de temperatura y presión en el proceso de destilación del biodiésel permitieron obtener una producción de 140 ml de bioturbosina con una masa de 111 g, y que los parámetros de pH, densidad y temperatura se encontraran dentro de los rangos de la norma de la ASTM D1655.

Al realizar las mezclas B5, B10 y B20 de la bioturbosina producida con turbosina convencional se logró conocer que la propiedad de densidad

para cada una aumenta (ver Tabla 18), pero se sigue manteniendo en el rango de la norma de la ASTM D7566 dicha norma permite el uso de la realización de mezclas.

Con espectroscopia infrarroja se analizó la bioturbosina, así como las mezclas B5, B10 y B20. La muestra de bioturbosina fue comparada con el espectro IR de la turbosina en donde se encontró el pico intenso correspondiente al grupo carboxílico C=O propio de los ésteres, encontrando una diferencia mínima en la altura de dicho pico con la turbosina. En cuanto a las mezclas se encontró que al aumentar la concentración de bioturbosina hay una pequeña disminución en la altura y área del pico del grupo carboxílico.

En cuanto al biodiésel que fue analizado mediante cromatografía de masas se encontró que los ácidos más predominantes fueron ácido linoleico, ácido pentadecílico y ácido a linoleico esto debido a que el aceite que se utilizó para la experimentación fue de canola, en el cual estos ácidos se encuentren presentes.

Todo el proceso desde la recolección del aceite residual hasta la producción de cada uno de los biocombustibles, permitió concluir que las mejores condiciones de reacción del proceso de destilación del biodiésel para la producción de bioturbosina fueran a; una temperatura de 100°C, una presión de 200 Pa y un tiempo de 3 horas para obtener así un rendimiento experimental del 80.71% y una relación bioturbosina:aceite de 1.75 g/ml.

En la actualidad existen pocos trabajos de investigación y desarrollo enfocados en la producción de bioturbosina con aceite residual, este biocombustible está prometiendo reemplazar la turbosina total o parcialmente para disminuir las grandes cantidades de compuestos

contaminantes que se liberan a la atmósfera al momento de su combustión.

Este tipo de proyectos permite darle un nuevo uso a lo que muchas personas consideran un desecho que en algunas ocasiones arrojan al drenaje llegando a contaminar millones de litros de agua o en algunas ocasiones dificultando la operación en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

BIBLIOGRAFÍA

Albarracín, P., Colqui Garay, F., Di Bacco, V., González, M., L.

Tereschuk, M., Chauvet, S., & D. Genta, H. (2010). Estudios de caracterización de aceites usados en frituras para ser utilizados en la obtención de jabon. San Miguel de Tucumán, Argentina.

ATAG. (Mayo de 2016). *Air Transport Action Group*. Recuperado el 1 de Abril de 2017, de Facts and Figures of Air Transport: <http://www.atag.org/facts-and-figures.html>

Auxiliares, A. y. (2013). *Biocombustibles Sustentables de Aviación en México*. México.

Betanzos, A. (2011). Estudio de la obtención de biodiesel por catálisis

enzimática a partir de aceites comestibles usados. (U. A. Metropolitana, Ed.) México, Azcapotzalco.

Boatella, J., & Codony, R. (2000). Recycled cooking oils; Assment of risk for public health. (D. G. Research, Ed.) Luxembourg, European Parliament.

Bolaños, N., Lutz, G., & Herrera, C. (2003). *Química de Alimentos: Manual de laboratorio*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Castells, X. E. (2009). *Reciclaje de residuos industriales* (2da ed.).

Madrid: Díaz de Santos.

Chiaramonti, D., & Prussi, M. (2014). Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial demonstration activities in aviation biofuels. *Applied Energy*, 767-774.

Chien, Y., Lu, M., Chai, M., & Boreo, F. J. (2009). Characterization of biodiesel and biodiesel particulate matter by TG, TG-MS, and FTIR. (23), 202-206. *Energy Fuels*.

Duarte, G. (22 de Abril de 2017). *Facultad de Química UNAM*.

Obtenido de Espectrometría de Masas:
http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/4.1InstrumentacionEspectrometriadeMasas_2462.pdf

Fuels, G. (1 de Febrero de 2017). *Green Fuels*. Obtenido de Green Fuels:

<http://greenfuels.com.ar/er-biodiesel.php>

Gasca Quezada, V., & Salinas Callejas, E. (2009). Los biocombustibles.

El Cotidiano, 76-77.

Gomis, V. (24 de Octubre de 2008). *Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante*. Obtenido de Cromatografía de gases:
<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/8247>

Gomis, V. (24 de Octubre de 2008). *Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante*. Obtenido de Espectrometría de masas:
<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/8249>

Guerrero, C., Osorio, I., & Sierra, F. (20 de Junio de 2010). Evaluating the effect of temperature on biodiesel production from castor oil. Bogota, Colombia.

Gutiérrez, C., Romero, A., Gómez, F., & Hernández, S. (2016). Simultaneous energy integration and intensification of the hydrotreating process to produce biojet fuel from *Jatropha Curcas*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 134-145.

Hernández, K. F. (Abril de 2017). Uso de microalgas oleaginosas para la producción exógena de lípidos precursores de hidrocarburos. México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.

ICAO. (2013). *International Civil Aviation Organization*. Recuperado el 1 de Abril de 2017, de ICAO Environmental Report 2013: Aviation and Climate Change: <http://cfapp.icao.int/Environmental-Report-2013>

Knothe, G. (2010). Biodiesel fuel quality and the ASTM standard. *Palmas*, 31 (Especial), 162-171. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/1563/1563>

Leung, D., & Lenung, X. (April de 2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87, 1083-1095.

Lewis, E., Lee, E., & Kidder, L. (2004). Near-Infrared Chemical Imaging . *Microscopy Today*, 6-11.

Linde, A. (24 de Abril de 2017). *Abello Linde*. Obtenido de Linde Cromatografía de gases: <http://www.abellolinde.es/es/index.html>

López, A. (Agosto de 2012). Optimización en la coversión de biodiesel a partir de triglicéridos con un catalizador básico. México, México.

Medina Ramírez, I. E., Chávez Vela, N. A., & Jáuregui Rincón, J.

(Mayo-Agosto de 2012). Biodiesel, a renewable fuel. *Investigación y ciencia*(55), 62-69.

Morrison, R., & Boyd, N. (1987). *Organic Chemistry*. Massachusetts, EUA: Prentice-Hall.

Mundo, E. (11 de Diciembre de 2011). Un combustible eficiente y limpio. *El mundo*.

Murga, J. (2002). *Determinación de estructuras mediante métodos físicos*. España: Universidad Jaume.

Orduña, M. (Agosto de 2010). Estudio preliminar de producción de

biodiésel a partir de aceites residuales de la cafetería de la UAM-AZC. Distrito Federal, México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Ortega, G., Angulo, E., & Cardozo, B. (20 de Mayo de 2014). Transesterification vegetable oils using heterogeneous catalyst. *12*. Barranquilla, Colombia: Prospect. Recuperado el 15 de Abril de 2017, de <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a10.pdf>

Pascencia, G. (Junio de 2003). *Espectrometría de masas*. Cuernavaca, Morelos, México.

Romero Izquierdo, A., Gómez de la Cruz, A., & Gutiérrez Antonio, C.

(2016). Bioturbosina: retos y oportunidades. *Ciencia*, 1-6. Recuperado el 3 de Febrero de 2017

Sanlı, H., Canackci, M., & Alptekin, E. (8 de May de 2011).

Characterization of waste frying oils obtained from different facilities. (B. Technology, Ed.) Golcuk, Turkey. Recuperado el 25 de March de 2017, de http://www.ep.liu.se/ecp/057/vol1/064/ecp57vol1_064.pdf

Solomons, T. W. (2000). *Química Orgánica* (Segunda ed.). Florida: Limusa.

Stashenko, E., & Martínez, J. R. (2012). *Scientia Chromatographica*.

Obtenido de La cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas como herramienta de alta selectividad para caracterizar fósiles químicos en el petróleo:

<http://www.scientiachromatographica.com/files/v4n2/v4n2a10.pdf>

Stuart, J. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*.

Sylvester, O. (September de 2013). A review on the Spectroscopic Analyses of Biodiesel. *European International Journal of Science and Technology*, 2(7), 137-146.

Triplenlace. (2012). Espectroscopía infrarroja (II): En el laboratorio.

Obtenido de tripenlace.com/2012/12/30/espectroscopia-infrarroja-ii-en-el-laboratorio/

Valcárcel, M., & Gómez, A. (1988). *Técnicas analíticas de separación*.

España: Reverté.

Vicente, G. (2005). Kinetics of sunflower oil methanolysis. *15(44)*, 5447-5454. *Industrial and Engineering Chemistry Research*.