

**APROVECHAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS GRASOS  
DEL POLLO PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOCOMBUSTIBLE  
(BIODIESEL)**

**CRISTHIAN ALFREDO GALEANO LEÓN**  
**Cod. 1088250718**  
**ESTEBAN GUAPACHA MARULANDA**  
**Cod. 1112761617**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**  
**FACULTAD DE TECNOLOGÍAS**  
**ESCUELA DE TECNOLOGÍA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL**  
**PEREIRA**  
**2011**

**APROVECHAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS GRASOS  
DEL POLLO PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIODIESEL  
(BIODIESEL)**

**CRISTHIAN ALFREDO GALEANO LEÓN  
Cod. 1088250718  
ESTEBAN GUAPACHA MARULANDA  
Cod. 1112761617**

**TRABAJO DE GRADO  
Requisito parcial para optar al título de Químico Industrial**

**Director  
JUAN PABLO ARRUBLA VÉLEZ  
Químico MSc en Química  
Grupo de investigación en Oleoquímica**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS  
ESCUELA DE TECNOLOGÍA QUÍMICA  
PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL  
PEREIRA  
2011**

## RESUMEN

En esta investigación se llevó a cabo el estudio del posible uso de los residuos grasos de pollo (grasa subcutánea) como potencial materia prima para la producción de biodiesel. El estudio se dividió en cuatro etapas. La primera, caracterización de la materia prima utilizada, determinando parámetros comunes en el análisis de alimentos, tales como, grasa total, humedad, cenizas y proteína. La segunda, caracterización del aceite extraído (extracción con agua a presión y en ebullición) mediante métodos físicos: viscosidad, densidad e índice de refracción. Los químicos: índice de acidez, índice de saponificación, índice de peróxidos e índice de yodo. En la tercera etapa se llevó a cabo la reacción de transesterificación (obtención del biodiesel) utilizando metanol (relación molar metanol/aceite fue 7:1) e hidróxido de potasio como catalizador (1 % en masa, con relación a la cantidad de aceite empleado), con reflujo y agitación constante.

La cuarta y última etapa consistió en la caracterización del biodiesel (ésteres metílicos) por medio de la determinación de algunos parámetros físicos y químicos relacionados en la norma ASTM D6751, tales como, densidad, índice de refracción, viscosidad cinemática, contenido de agua, calor de combustión, punto de inflamación, índice de yodo, contenido de metales, corrosión a la lámina de cobre y cuantificación de los metilésteres obtenidos mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

Adicionalmente, el biocombustible se sometió a una prueba de estabilidad en vacío (sin carga) en un motor diesel. En el ensayo realizado se determinó tanto la estabilidad de funcionamiento en caliente como el grado de opacidad de los humos (gases de combustión) emitidos empleando el opacímetro LUKAS SMOKEMETER.

Todos los resultados de la caracterización fueron comparados con las especificaciones técnicas estipuladas en las normas internacionales para biocombustibles, concluyéndose que se obtuvo un biocombustible con propiedades físico-químicas dentro de los intervalos aceptados por la norma ASTM D6751, contribuyendo al aprovechamiento de este subproducto industrial y a la reducción del impacto ambiental que este pueda causar.

## TABLA DE CONTENIDO

**INDICE DE TABLAS**

**INDICE DE FIGURAS**

**INDICE DE ANEXOS**

**RESUMEN**

<b>1. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>9</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	9
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	9
<b>3. MARCO DE REFERENCIA</b> .....	<b>10</b>
3.1. ANTECEDENTES .....	10
3.1.1. Biodiesel en Colombia .....	17
3.2. MARCO TEÓRICO .....	19
3.2.1. Biodiesel.....	19
3.2.2. Obtención de Biodiesel .....	19
3.2.3. Reacción de Transesterificación .....	20
3.2.4. Materias Primas para la Producción de Biodiesel.....	30
3.2.5. Grasa de Pollo como Materia Prima Potencial .....	34
3.2.6. Propiedades del Biodiesel .....	35
3.2.7. Ventajas del Biodiesel.....	35
3.2.8. Desventajas del Biodiesel .....	37
3.2.9. Emisiones del Biodiesel .....	38
3.2.10. Recuperación del Glicerol.....	39
3.2.11. Caracterización de la Materia Prima .....	40
3.2.12. Caracterización del Aceite Empleado para la Obtención del Biodiesel.....	42
3.2.13. Caracterización de Metilésteres (Biodiesel).....	44

3.2.14. Evaluación del desempeño del biodiesel obtenido en un motor diesel en condiciones de vacío.....	52
3.2.15. Análisis Estadístico.....	52
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>54</b>
4.1. MUESTRA DE ANÁLISIS.....	54
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	54
4.2.1. Humedad.....	54
4.2.2. Cenizas.....	55
4.2.3. Proteína.....	55
4.2.4. Grasa Total.....	55
4.2.5. Fibra Bruta.....	55
4.3. EXTRACCIÓN DEL ACEITE.....	55
4.4. LIMPIEZA DEL ACEITE EXTRAÍDO.....	55
4.5. ACONDICIONAMIENTO DEL ACEITE LIMPIO.....	55
4.6. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DEL BIODIESEL.....	56
4.6.1. Análisis Físico del Aceite Extraído.....	56
4.6.2. Análisis Químico del Aceite Extraído.....	56
4.7. Obtención del Biodiesel.....	57
4.8. SEPARACIÓN Y LIMPIEZA DEL BIODIESEL OBTENIDO.....	57
4.9. CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL OBTENIDO.....	58
4.9.1. Análisis Físico del Biodiesel Obtenido.....	58
4.9.2. Análisis Químico del Biodiesel Obtenido.....	59
4.9.3. Evaluación del desempeño del biodiesel obtenido en un motor diesel en condiciones de vacío.....	61
<b>5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>62</b>
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA COMO RESIDUO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL.....	62
5.1.1. Humedad.....	62
5.1.2. Cenizas.....	63
5.1.3. Proteína.....	63

5.1.4.	Grasa Total .....	64
5.1.5.	Fibra Bruta .....	65
5.1.6.	Contenido de Proteína en la Materia Prima Desengrasada .....	65
5.2.	CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DEL BIODIESEL.....	65
5.2.1.	Análisis Físico del Aceite Extraído.....	66
5.2.2.	Análisis Químico del Aceite Extraído .....	69
5.3.	CARACTERIZACIÓN DE LOS METILÉSTERES OBTENIDOS (BIODIESEL) 73	
5.3.1.	Análisis Físico del Biodiesel.....	73
5.3.2.	Análisis Químico del Biodiesel Obtenido.....	78
5.3.3.	Evaluación del desempeño del biodiesel obtenido en un motor diesel en condiciones de vacío.....	86
5.3.4.	Discusión General .....	89
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>92</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>93</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>108</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción mundial por países año 2009. ....	16
Tabla 2. Plantas para la producción de biodiesel en Colombia.....	18
Tabla 3.Cadenas carbonadas más comunes de ácidos grasos. ....	22
Tabla 4. Interpretación del coeficiente de variación. ....	53
Tabla 5.Condiciones de elución .....	61
Tabla 6.Humedad del residuo graso de pollo.....	62
Tabla 7.Contenido de cenizas del residuo graso de pollo .....	63
Tabla 8.Contenido de proteína del residuo graso de pollo.....	63
Tabla 9.Contenido de grasa de la materia prima.....	64
Tabla 10.Contenido de proteína de la materia prima desengrasada.....	65
Tabla 11.Densidad del aceite extraído .....	66
Tabla 12.Índice de refracción del aceite extraído .....	67
Tabla 13.Viscosidad del aceite extraído.....	67
Tabla 14. Rendimiento de extracción.....	68
Tabla 15.Acidez del aceite extraído .....	69
Tabla 16.Índice de saponificación del aceite extraído .....	70
Tabla 17.Índice de peróxidos del aceite extraído.....	71
Tabla 18.Índice de yodo del aceite extraído.....	72
Tabla 19.Densidad del biodiesel obtenido. ....	73
Tabla 20.Índice de refracción del biodiesel obtenido. ....	74
Tabla 21.Contenido de agua del biodiesel obtenido .....	74
Tabla 22.Viscosidad cinemática del biodiesel obtenido .....	75
Tabla 23.Punto de inflamación del biodiesel obtenido .....	76
Tabla 24.Calor de combustión del biodiesel obtenido .....	77
Tabla 25.Índice de yodo del biodiesel obtenido.....	78
Tabla 26. Resultado y comparación corrosión a la lámina de cobre.....	80
Tabla 27. Contenido de potasio y magnesio en el biodiesel obtenido a partir de residuos grasos de pollo. ....	80
Tabla 28. Metilésteres identificados en el estándar de metilésteres.....	82
Tabla 29. Metilésteres identificados en el biodiesel obtenido a partir de grasa de pollo.....	84
Tabla 30.Concentración de los metilésteres (biodiesel) obtenidos a partir del aceite de pollo .....	85
Tabla 31.Perfil de ácidos grasos del biodiesel obtenido y su comparación con otros estudios.....	85
Tabla 32. Lecturas de opacidad.....	88

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de Transesterificación [2].....	21
Figura 2.Reacciones indeseadas en el proceso de transesterificación.....	23
Figura 3.Mecanismo de transesterificación con catalizador ácido.....	28
Figura 4.Mecanismo de transesterificación con catalizador básico.....	29
Figura 5.Viscosímetro de Ostwald.....	43
Figura 6. Montaje copa abierta de Cleveland [116].....	47
Figura 7. Esquema bomba calorimétrica.....	48
Figura 8. Estándar ASTM D130.....	49
Figura 9. Analizador de cuadrupolo.....	52
Figura 10. Residuos grasos de pollo.....	54
Figura 11. Montaje de reacción para la obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de pollo.....	57
Figura 12. Lavado del biodiesel a partir de residuos grasos de pollo.....	58
Figura 13. Composición química del estándar de metilésteres marca RESTEK Código 35078 (Tomado del catálogo RESTEK, referencias de materiales analíticos).....	60
Figura 14. Montaje empleado para la extracción del aceite a partir de residuos grasos de pollo.....	69
Figura 15. Lámina de cobre después de la prueba.....	79
Figura 16. Cromatograma estándar metilésteres.....	82
Figura 17. Cromatograma biodiesel a partir de aceite de pollo.....	83
Figura 18. Motor diesel serie RY 110.....	87
Figura 19. Opacímetro marca Lucas.....	88

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Espectros de masas.....	108
ANEXO 2. Especificaciones motor diesel serie RY 110.....	114

## 1. JUSTIFICACIÓN

Globalmente, el uso de combustibles amigables con el medio ambiente está siendo fomentado. La energía extraída a partir de la biomasa es quizás la fuente más antigua de energía renovable. La biomasa puede ser generada a partir de varias fuentes, tales como semillas oleaginosas, algas y bacterias, residuos forestales, residuos provenientes del procesamiento de alimentos, residuos de cocina, residuos sólidos municipales, etc. La biomasa obtenida de tales fuentes puede ser convertida a combustibles líquidos y gaseosos. Los biocombustibles más importantes generados a partir de la biomasa son el biodiesel y el bioetanol.

El desarrollo del biodiesel es especialmente relevante para países tales como la India que no son ricos en reservas de petróleo y tienen que importar el crudo, productos del petróleo y gas para satisfacer las crecientes necesidades energéticas, frecuentemente a altos precios. La búsqueda de opciones alternativas de energía ha impulsado la investigación para la producción de biodiesel [1].

La situación descrita anteriormente cobija a la gran mayoría de países latinoamericanos en vía de desarrollo, entre ellos Colombia, por lo cual se hace necesario innovar en los procesos de producción de biodiesel y la diversificación de las materias primas a partir de las cuales se lleva a cabo dicha transformación.

En el desarrollo de la producción de biodiesel para el año 2008 según el reporte de International Grains Council indicó, que se emplearon principalmente materias primas de origen vegetal, tales como el aceite de girasol, colza, soya y palma; que mundialmente se ha convertido en la fuente por excelencia para este propósito, utilizándose en menor proporción las fuentes de origen animal [2], que pueden llegar a ser un potencial recurso para tal fin.

Colombia enfrenta una difícil situación en el campo petrolero por la disminución de las reservas y la ausencia de nuevos hallazgos del crudo. Ante esta situación, el biodiesel se presenta como una de las mejores opciones para frenar la difícil situación que enfrenta Ecopetrol a la hora de producir combustibles.

Según Fedepalma, federación encargada de la calidad en la producción de biocombustible a partir del aceite de palma, la difícil situación que presenta Ecopetrol en la actualidad se debe a tres aspectos fundamentalmente: La “utilización plena de la capacidad nacional para producir combustible diesel, también conocido como ACPM”, la “disminución de las

reservas probadas de hidrocarburos pertenecientes a la nación” y “el alto contenido de azufre del diesel, el cual supera ampliamente los niveles establecidos internacionalmente”, [3].

Siguiendo este orden de ideas y teniendo en cuenta el alto costo de la materia prima de origen vegetal (entre el 60-80% del costo total en la producción del biodiesel [4]), este trabajo pretende aprovechar los residuos grasos producidos en la industria del pollo que actualmente se generan en la ciudad de Pereira, utilizándolos como una fuente alternativa para la producción de biodiesel, así como evaluar el rendimiento en la obtención del producto, determinar sus principales propiedades fisicoquímicas y caracterizar los subproductos generados, con el fin de establecer sus potenciales usos.

El desarrollo de esta investigación aportará información sobre la producción de biodiesel a partir de fuentes de origen animal que han sido poco estudiadas hasta el momento en la región cafetera, ya que hasta el momento solo se han realizado estudios sobre este proceso a partir de residuos grasos de origen bovino y aceite residual de frituras, desarrollados en la Universidad Tecnológica de Pereira. De esta manera, el aprovechamiento de los residuos grasos de pollo como materia prima para la producción de biocombustibles, convierte este subproducto pecuario en una materia prima potencialmente alternativa para la industria del biodiesel en la ciudad de Pereira.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Obtener y caracterizar un biocombustible a partir de los residuos grasos del pollo, en la búsqueda de fuentes alternativas de energía renovable para la ciudad de Pereira.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Caracterizar la materia prima (residuo graso de pollo) determinando: humedad, cenizas, proteína, grasa total y fibra bruta.
- Determinar las principales características fisicoquímicas del aceite extraído: densidad, índice de refracción, humedad, viscosidad, índices de acidez, de saponificación, de peróxidos, y de yodo.
- Obtener biodiesel a partir del aceite extraído mediante reacción de transesterificación.
- Caracterizar cuantitativamente los metilésteres del biodiesel obtenido, por medio de técnicas cromatográficas.
- Determinar las principales características físicas y químicas del biocombustible producido (según legislación colombiana).
- Comparar los valores obtenidos de las distintas características estudiadas, con las especificaciones reportadas para biodiesel en la norma ASTM D6751.

### **3. MARCO DE REFERENCIA**

#### **3.1. ANTECEDENTES**

La presente crisis de energía ha reactivado a nivel mundial el interés por los biocombustibles (el término biocombustible engloba a todos aquellos combustibles derivados de la biomasa animal y/o vegetal, que pueden ser líquidos, gaseosos o sólidos), particularmente en aquellos que se encuentran en vía de desarrollo y dependen de la importación de productos derivados del petróleo y pueden tener en términos de disponibilidad, terreno y condiciones climáticas potenciales, para la producción de biomasa a gran escala. Varios métodos de transformación pueden ser utilizados para la conversión de biomasa en combustible para transporte. Se hace énfasis en biocombustibles de primera generación, tales como el biodiesel y el bioetanol, dado que los biocombustibles de segunda generación que utilizan biomasa en bruto como materia prima, se encuentran todavía en un temprano estado de desarrollo y requerirán aportes económicos fuertes y prolongados del sector público, para llegar a estar disponibles a escala industrial. Una consideración mayor es el abastecimiento de biomasa, dado que este recurso puede afectar la disponibilidad de terreno y competir con la producción de alimentos y forrajes. El mayor obstáculo para el desarrollo de biocombustibles es económico, debido a la necesidad de adelantar investigaciones en la búsqueda de materias primas alternativas y nuevas tecnologías de producción. De todos modos estimar el costo de un biocombustible no resulta fácil, porque debido a que el stock (valor) del alimento destinado a biomasa incide como la mayor parte del costo total de producción del biocombustible, por lo tanto la producción de éste último, dependerá enormemente de políticas nacionales y escenarios de subsidios.

El abastecimiento de energía mundial es en su mayor parte dependiente de productos convencionales derivados del petróleo y la mayoría de los incrementos esperados en la demanda por este combustible fósil en el mediano plazo, provendrá del sector transportador, dado que su mayor crecimiento está siendo originado en los países en vía de desarrollo. Consecuentemente, el sector transporte será responsable de aproximadamente un tercio del crecimiento mundial en la emisión de gases de efecto invernadero en el futuro y el precio del petróleo puede alcanzar un nivel dramáticamente alto. Numerosos combustibles alternativos para el transporte están potencialmente disponibles y actualmente están siendo usados e investigados en todo el mundo con diferentes etapas de desarrollo [5].

Como combustible renovable, el aceite vegetal es una alternativa. El aceite vegetal es una fuente potencialmente inagotable de energía, con un contenido energético similar al del combustible Diesel. Los aceites vegetales no han sido aceptados como biocombustibles

debido a su alto precio en comparación con los combustibles derivados del petróleo. El principal problema asociado con el uso de aceites vegetales puros como combustible, en motores Diesel, es el causado por la alta viscosidad del combustible en el encendido por compresión. Hay más de 350 cultivos de oleaginosas identificados, entre los cuales sólo el de girasol, cártamo, soya, semilla de algodón, colza y aceites de maní son considerados como posibles combustibles alternativos para motores Diesel.

El uso directo de los aceites vegetales como combustible para motores es problemático, debido a su alta viscosidad (alrededor de 10-20 veces mayor que la del combustible diesel) y baja volatilidad, que provocan su combustión incompleta y la formación de depósitos en los inyectores de los motores Diesel. Diferentes vías, tales como, la dilución, micro-emulsión, pirólisis, craqueo catalítico y transesterificación, han sido consideradas para disminuir la alta viscosidad de los aceites vegetales. Entre todas estas alternativas, la transesterificación parece ser la mejor opción, ya que el proceso es relativamente simple y además, las características físicas exhibidas por los ésteres alquílicos de los ácidos grasos, son similares a las presentadas por el Diesel convencional [6].

Hoy, el término biocombustible se refiere mayoritariamente al etanol y al aceite vegetal esterificado. Nuevos productos tales como el metanol, el dimetileter, diesel FT (Fischer-Tropsch) y etanol proveniente de materia prima ligno-celulósica, llamados biocombustibles de segunda generación, se están beneficiando de programas activos de I&D (investigación y desarrollo). La investigación a largo plazo encara los biocombustibles de tercera generación tales como hidrógeno para celdas de combustible entre otros.

Los procesos de producción de biocombustibles para transporte son numerosos y la tecnología elegida se encuentra estrechamente ligada al tipo de biomasa que se considera. De cualquier manera la mayoría de los biocombustibles pueden tener las interesantes ventajas de:

- Ser compatibles con la maquinaria existente en los vehículos, en contraste con el gas natural comprimido o licuado.
- Ser susceptible de combinarse con combustibles convencionales dentro del equipamiento e infraestructura ya existente.

Dentro del uso de diferentes tipos de aceites y derivados se reserva el término de biodiesel a un conjunto de combustibles oxigenados basados en ésteres de fuentes biológicas renovables (aceites vegetales, aceites animales, aceites reciclados y grasas usadas). Como terminología general, su empleo en motores de combustión interna puede realizarse puro

(B100) o en mezclas de proporciones variables con gasoil (Ej. B20) 20 % biodiesel 80 % gasoil [5].

Este combustible tiene una serie de ventajas respecto del diesel derivado de petróleo. Lo que constituye la mayor fuerza impulsora para su utilización, es el considerablemente menor impacto ambiental. Al ser producido a partir de aceites vegetales o grasas de cualquier origen, es decir, recursos renovables, produce una ventaja neta en lo que al ciclo de carbono se refiere, disminuyendo la acumulación del mismo en el ambiente, dado que la cantidad generada al usarlo como combustible, se reutiliza en la fotosíntesis de por ejemplo la oleaginosa. Este es un aspecto que genera divisas, porque la disminución de CO<sub>2</sub> liberado al ambiente se comercializa en el mercado de bonos de carbono, siguiendo lo establecido en el protocolo de Kioto [7].

Los planes expansivos del Biodiesel a nivel mundial abarcan países de primera línea (Ver tabla 1). Europa inicio la producción de biodiesel desde comienzos de la década de los 90's. La situación de biocombustibles varía enormemente a través de Europa. Alemania y Francia, por ejemplo, son los países más activos. Un notable incremento del 93% en la producción de biocombustibles fue registrado entre 1997 y 1999, debido a las decretadas exenciones tributarias por su consumo en Alemania, Austria, Italia, Francia, Suiza, Dinamarca y Checoslovaquia. Adicionalmente la Unión Europea premia el desarrollo de los cultivos destinados a la producción de oleaginosas industriales.

En Austria se siguieron dos líneas paralelas. En primer lugar se obtuvieron metilésteres de aceite de colza en cooperativas de los propios agricultores, destinadas a producir un combustible que pudieran utilizar en sus tractores, por otro lado, la obtención de carácter "industrial" permitió la comercialización del "biodiesel". Se lo utilizó, especialmente, como carburante para motores de vehículos que tenían que circular en grandes núcleos de población (colectivos y taxis). La utilización del biodiesel en los tractores agrícolas de los agricultores que lo produjeron, provocó que algunos fabricantes de tractores europeos, y de manera especial el grupo Same & Lamborghini & Hurlimann, se preocuparan en adaptar sus motores a éste combustible, de manera tal que pudieran funcionar indistintamente con gasoil o con biodiesel.

Austria, fue uno de los primeros países en establecer un programa de bioenergía. La primera planta de producción inició operaciones en 1991 en Aschach, (Provincia del norte). El programa austriaco contempla una política energética integrada en la diversificación, reorientación e innovación del sector agrícola. En 1999, la producción del biodiesel fue de 18 mil toneladas/año y se incrementó a 30 mil toneladas en el año 2000. Alemania es actualmente el segundo gran productor de biodiesel. Su producción en 1999 fue de 130 mil

toneladas, superándose ésta en el año 2002, al incrementar hasta 250 mil toneladas. En Suecia, la Administración Nacional de Energía de este país, programó alcanzar un incremento del 10% en el mercado de los biocombustibles en los próximos diez años.

En Francia, en el año 1991, se adelantó un importante programa para acelerar la producción de biodiesel vinculando a empresas productoras de semillas de aceite, productores de aceites, productores de maquinaria y autoridades públicas y privadas relacionadas con la industria Oleo-química. Como resultado de este programa y de la creación de incentivos fiscales para proyectos pilotos productores de ésteres alquílicos de colza y girasol, se logró alcanzar un nivel en el cual, se empezó a utilizar la mezcla B5 con diesel convencional.

En Italia, la producción fue de 96 mil toneladas en 1999. El plan nacional para el uso de biomasa anticipa la producción de bioetanol, biodiesel y ETBE (Etil t-butiléter) de aproximadamente 1000 TEP (Toneladas Equivalentes de Petróleo). En la próxima década. En España, la producción para el año 2000 fue de 50 mil toneladas. Los biocombustibles líquidos son incluidos en el Plan Nacional (Plan de Fomento de las Energías Renovables en España), fomentando el desarrollo rural y la generación de empleo.

Los Estados Unidos incentivó la producción de biodiesel mediante subsidios que alcanzan los 300 millones de dólares, lo cual representa el 40 % del precio de la materia prima. La producción actual alcanza aproximadamente las 100.000 toneladas (el cual es utilizado en autobuses, automóviles gubernamentales, la marina, flotas pesqueras, embarcaciones turísticas, tránsito en aeropuertos, parques nacionales, etc.) con proyecciones a 800.000 para el año 2010. Existen grandes empresas que comercializan biocombustibles y derivados provenientes del aceite de soya, como es el caso de la West Central Soy, que produce una gama de productos denominada Soy-Power (aceite hidráulico, grasa, ésteres, aditivos, etc.) [5,8].

En el ámbito centroamericano por ejemplo, están presentes, en distintos niveles de importancia, todos los factores de estímulo referidos a los biocombustibles. Esta región importa prácticamente todo el crudo que necesita. Aunque la caña de azúcar y otros productos agrícolas de interés para la producción de combustibles sean extensamente cultivados y procesados, se requiere una evaluación correcta de los contextos tecnológicos agrícola e industrial, de la disponibilidad de los factores básicos de producción, de la competitividad y eventuales requisitos de soporte, así como de los marcos institucionales. Las cuestiones económicas, tributarias y regulatorias son igualmente relevantes para la introducción de los biocombustibles en el mercado. Los acuerdos y tratados comerciales internacionales pueden desempeñar un papel importante en la promoción de las exportaciones de los biocombustibles, en cualquiera de sus formas.

Los biocombustibles avanzan no sólo en volumen sino en aspectos tecnológicos, que permiten tanto su obtención, como el mejoramiento de su calidad a partir de fuentes cada vez más diversas. En un comunicado de la Agencia Internacional de Energía (AIE) se menciona: “El uso de biocarburantes líquidos, como el etanol y el biodiesel, en el sector del transporte de todos los países, puede reducir la dependencia del petróleo y en muchos países se podría utilizar para cocinar y para necesidades agrícolas”, concluyéndose que de esta manera se beneficiarían los países del Cono Sur, especialmente Argentina y Brasil, que son los principales productores de los cultivos que los originan [5].

Argentina presenta grandes ventajas para la producción de biodiesel, debido a que en la totalidad de su territorio se cuenta con algún producto agropecuario para su transformación en aceite: soja, girasol, maní, colza, palma, lino, cártamo, nabo, aceites usados, grasa animal y otros cultivos oleaginosos cuya semilla contiene aceite [7].

Actualmente, Argentina viene trabajando en un gran número (doce) de proyectos relacionados con la producción de biodiesel a gran escala. Dichos proyectos se encuentran en diferentes niveles de implementación.

La primera planta de producción continua de biodiesel de Argentina ya funciona en la provincia de la Esperanza y fue desarrollada por la compañía FIMACO. La planta llegará a producir 20 mil litros diarios con base en aceite de soya. El biodiesel obtenido ya es utilizado de manera experimental en automóviles particulares y camionetas. El proyecto surgió como una planta piloto experimental para desarrollar la tecnología de obtención del biodiesel bajo un sistema de proceso continuo. Actualmente la planta obtiene el producto listo para comercializar bajo las estrictas normas ASTM (EEUU), con una capacidad de producción de 20 mil litros diarios [8].

Uruguay hasta la fecha, cuenta con tres plantas productoras de biodiesel; una en la localidad de Paysandú que obtiene el biodiesel a partir de aceite de girasol, otra en Montevideo, donde el biodiesel es obtenido a partir de aceites de fritura usados, pero su producción es baja debido a la disminución en la recolección de dichos aceites. La tercera planta es la más grande del país y también se ubica en la capital, tiene capacidad de producción de 300.000 litros mensuales con materias primas obtenidas a partir de sebo vacuno proveniente de la faena. Esta planta es un orgullo para Uruguay, cumple con estrictas normas de calidad supervisadas por la universidad de la República y pretende ser quien sustituya al menos el 1% del gasoil de petróleo utilizado en el país. Además, pretende ampliar sus mercados a diferentes países del mundo, generando con ello, nuevas vacantes de empleo y crecimiento de la industria nacional [9].

Según el periódico el Clarín, Brasil viene desarrollando desde la década del 70, una política energética que busca depender cada vez menos del petróleo e incrementar la producción de biocombustible, particularmente de etanol. De hecho, uno de los temas estratégicos de la política de seguridad energética de Brasil, es convertirse en la mayor potencia mundial energéticamente hablando del siglo XXI, gracias al desarrollo continuo de la tecnología necesaria para producir etanol. En este sentido, el Plan de Reducción de Dependencia Energética, busca lograr la autosuficiencia en la producción de energía en Brasil [10].

Brasil no solo considera estratégica la producción de etanol en su política de seguridad energética, sino que además el biodiesel, ocupa un espacio importante en sus proyecciones futuras. En el 2005, el Gobierno Federal autorizó la adición del 2% (B2) de biodiesel a todo el diesel convencional que se consume en el país y a partir del año 2008 esta mezcla se hizo obligatoria. A partir de 2013, será obligatoria la utilización de la mezcla B5, pero es posible que esta meta se alcance antes, según información del Gobierno Federal, lo que supone el punto de partida para el desarrollo de políticas públicas en el marco del Programa Nacional de Producción y Uso de Biodiesel (SAGPyA-IICA 2005). Otro elemento que se debe considerar de este programa nacional, es que se encuentra enmarcado en una política estratégica de agro-energía como respuesta a las proyecciones de escasez de petróleo y a su vez, como impulso al incremento de la productividad agrícola (Ministerio da Agricultura, Pecuaria e Abastecimiento, 2006) [10].

Son formidables las condiciones de Brasil para el desarrollo de materia prima destinada a la obtención de biodiesel (soja, palma africana, girasol, pinhao manso, colza y ricino, entre otras), gracias a su favorable clima y amplia disponibilidad de agua y tierras. Se puede utilizar un área de 90 millones de hectáreas totalmente cultivables, sin causar daño alguno a las reservas forestales. Por otro lado, Brasil es pionero en la producción de biocombustibles debido a su experiencia en el Programa Nacional de Alcohol (Proálcohol, por su sigla en portugués), que ya se ha convertido en una referencia mundial.

Se ha creado la Central Experimental de Biodiesel I (UEB-01) para su obtención a partir de aceites vegetales, con enfoque en el aceite de ricino. La central puede utilizar tanto el etanol como el metanol en el proceso de producción. En enero de 2005, se probaron sus instalaciones con la preparación de la primera carga de biodiesel producido con aceite de ricino, en la que se empleó el etanol en la reacción. El resultado fue un combustible que no sólo atendió los requerimientos de la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP), sino que también logró probarse en un vehículo movido a diesel que circuló por cerca de 2.000 Km con la mezcla B2.

En junio de 2006, la central dio inicio a sus actividades regulares. Su capacidad de producción es de 600 litros de biodiesel de ricino por carga (cantidad previamente definida) u 800 litros de biodiesel obtenido a partir de otros aceites. Durante esa primera fase se produjeron más de 50.000 litros de biodiesel, principalmente a partir de aceite de ricino y mezclas de éste con aceite de soja [11].

Los mercados internacionales siguen creciendo, aunque la capacidad instalada globalmente continúa creciendo más rápidamente aún. Esto solamente puede resultar en más conflictos comerciales entre países al continuar creciendo la presión de obtener un retorno adecuado a una inversión.

Por segundo año consecutivo, Alemania, lejos el mayor productor de biodiesel del mundo, redujo su producción en 2009, esta vez en un 10% comparado con el 2008, llegando a un total de 2,5 millones de toneladas. Francia continúa siendo uno de los mercados más eficientes del mundo en términos de biodiesel, con un mercado sólido y uno de los índices de producción más altos del mundo. Su producción creció un 8% a casi dos millones de toneladas y subió de tercer a segundo productor del mundo, quitándole el espacio de #2 a los EEUU, quien lo mantenía desde el 2006. Brasil continuó como cuarto productor con 1,4 millones de toneladas en 2009 y subió al tercer puesto mundial en 2010, reflejando el crecimiento sólido del mercado nacional de biodiesel en ese país. La Argentina mantuvo el quinto puesto del mundo en 2009 y subió al cuarto lugar en 2010. La producción nacional subió un 31% a 1,2 millones de toneladas en 2009 y ya son miembros del “club de los millonarios”, países que producen más de un millón de toneladas por año de biodiesel.

A continuación se presenta la producción mundial de biodiesel por países para el año 2009 [12]:

**Tabla 1. Producción mundial por países año 2009.**

<b>País</b>	<b>Millones de Litros</b>
<b>Alemania</b>	2.539
<b>Francia</b>	1.959
<b>Estados Unidos</b>	1.682
<b>Brasil</b>	1.415
<b>Argentina</b>	1.255
<b>España</b>	859
<b>Italia</b>	737
<b>Malasia</b>	540
<b>Bélgica</b>	416
<b>Polonia</b>	332

### **3.1.1. Biodiesel en Colombia**

En Colombia, el desarrollo del biodiesel es incipiente y se está en proceso de reglamentación de precios, producción y consumo, así como en la definición de estrategias tecnológicas eficientes, que permitan alcanzar una óptima sustitución del diesel tradicional por biodiesel, sin efectos traumáticos en el mercado de los aceites para la industria de alimentos [13].

El país se encuentra en un período de transición debido a la disminución de las reservas de petróleo y a la ausencia de nuevos hallazgos. Ecopetrol enfrenta una situación difícil en el campo de los combustibles por tres razones:

1. Utilización plena de la capacidad nacional para producir combustible diesel, también conocido como ACPM
2. Disminución de las reservas probadas de hidrocarburos pertenecientes a la nación
3. El alto contenido de azufre del diesel, el cual supera ampliamente los niveles establecidos

Debido a que la demanda de ACPM ha tenido un incremento considerable al punto de estar desplazando a la gasolina en el transporte de pasajeros y de carga [14], Colombia se ha visto obligada a importar Diesel de bajo contenido de azufre, el cual es utilizado en Bogotá, cuya regulación ambiental exige el uso de este combustible con una concentración de azufre inferior a 500 ppm [15]. Debido a este panorama, el gobierno Colombiano expidió la Ley 939 de 2004, por medio de la cual, se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal, para uso en Motores diesel en las calidades que establezcan el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Esta Ley, también otorga estímulos tributarios para la producción de Biocombustibles; como se observa en el artículo 8, donde el biocombustible de origen vegetal o animal para uso en motores diesel de producción Nacional con destino a la mezcla con ACPM, estará exento del impuesto a las ventas e impuesto global al ACPM.

El gobierno expidió además, la Resolución 1289 de 2005, en la cual, se establecen los requisitos técnicos y ambientales del biodiesel y sus mezclas con el ACPM que se distribuye en el país desde el tercer y cuarto trimestre del año 2007 [16].

El beneficio ambiental del biodiesel fue ratificado con las pruebas que se realizaron en el Sistema de Transporte Masivo de Bogotá, donde se encontraron reducciones de opacidad y de material particulado en todas las mezclas evaluadas de diesel-biodiesel de palma.

En la actualidad se está llevando a cabo otra prueba de larga duración con camiones NPR en carreteras, que ya han recorrido cerca de 20.000 kilómetros sin presentar ningún problema con mezclas de biodiesel de hasta del 20%. En este proyecto participan GM Colmotores, Ecopetrol S.A. y Cenipalma [15].

Las perspectivas de producción de biodiesel en el país atraen la atención de muchos inversionistas nacionales y del mundo. Se estima que para el año 2020 se deberán producir alrededor de 2.271,45 Ton/día de la mezcla B10 y 4.542,89 Ton/día de B20 (con biodiesel de cualquier fuente que cumpla especificaciones técnicas establecidas por la ley) para cubrir las necesidades energéticas del país. La demanda actual y futura de biodiesel es muy alta lo que hace muy atractivo este mercado. Además si se toma en cuenta las exenciones arancelarias expedidas por el gobierno, los posibles inversionistas tendrían otra razón más para iniciar la construcción de plantas productoras de biodiesel que satisfagan las necesidades del mercado.

Según la tabla 2, en Colombia se produjeron 321.000 Ton/año de biodiesel hasta marzo del año 2008. Dicha cantidad cubrió el 57% de la demanda de biodiesel para una mezcla B10 en ese mismo año. Si se toma el año 2010 donde la mezcla B20 empezó a utilizarse, la misma producción de biodiesel solo cubrió el 27% de la demanda [17]. Del total de los proyectos nombrados en la siguiente tabla, solo dos no están integrados con el sector palmicultor [15].

**Tabla 2. Plantas para la producción de biodiesel en Colombia.**

<b>Proyecto</b>	<b>Región</b>	<b>Ton/año</b>	<b>Fecha producción</b>
Oleoflores S.A.	Norte	50000	Julio 2007
Odin Energy Santa Marta Corp.		36000	Octubre 2007
Biocomb. Sostenibles del Caribe S.A.		100000	Enero 2008
Biocastilla S.A.	Oriental	35000	Enero 2008
Bio D S.A.		100000	Marzo 2008
Aceites Manuelita S.A.		100000	Noviembre 2008
Ecodiesel Colom. S.A.	Centro	100000	Diciembre 2008
Diesel de Colombia S.A.	Occidental	100000	2009
Biocosta S.A.	Norte	100000	2009
<b>Total</b>		721000	2010

En Colombia se han realizado varias investigaciones a nivel de laboratorio y planta piloto, con el fin de obtener biodiesel a partir de diversas materias primas, tales como aceite de palma, aceite de higuera, aceites residuales de frituras y subproductos de la industria pecuaria (residuos de origen bovino) [18,19,20,21]. De la misma forma, se han desarrollado estudios que evalúan los efectos de las variables que imperan en el proceso de transesterificación [18]. Dichos procesos se deben optimizar con el objetivo de obtener biocombustibles que tengan costos de producción competitivos, y que además posean la calidad adecuada [19]. La clave de la economía de producción del biodiesel, se encuentra en las materias primas utilizadas, ya que éstas representan la mayor parte del costo total de su producción, además de competir con la industria alimenticia, gran crítica que se le ha hecho a materias primas tales como la palma (principalmente), maíz, caña, soya entre otras, que se utilizan como insumos para este fin [22].

## **3.2. MARCO TEÓRICO**

### **3.2.1. Biodiesel**

El biodiesel como objeto de estudio es definido por la American Society for Testing Materials (ASTM) como un combustible compuesto de esteres monoalquílicos de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, se presenta en estado líquido, y además, reúne las especificaciones de la norma ASTM D6751 (ASTM 2008a), para ser empleado en motores de ignición por compresión o motores Diesel [2,23]. Puede ser usado puro B100, o mezclado con diesel de petróleo en diferentes proporciones, el más común el B20, tiene 20% de biodiesel y 80% de diesel [16]. También se encuentran otras mezclas, como lo son el B5, B10, B30, etc [24].

### **3.2.2. Obtención de Biodiesel**

Actualmente uno de los métodos más empleados en la industria para la producción de biodiesel consiste en la transesterificación de los triglicéridos presentes en aceites vegetales y/o grasas animales con alcoholes de cadena corta, en presencia de un catalizador con características químicas ácidas o básicas, y que puede estar en fase homogénea o heterogénea [2, 25, 26, 27, 28]. De esta manera se obtiene una mezcla de esteres alquílicos (Biodiesel) y glicerol, el cual tiene un alto valor agregado como subproducto en la industria [27, 29, 30, 31]. Este método está basado en el procedimiento descrito por Freedman et al. 1984 [32], en el cual son especificadas las condiciones clásicas de alcoholisis. La reacción de transesterificación es una reacción de equilibrio, en la cual, el triglicérido (TAG) es convertido paso a paso a diglicérido, monoglicérido y finalmente a glicerol. Un mol del

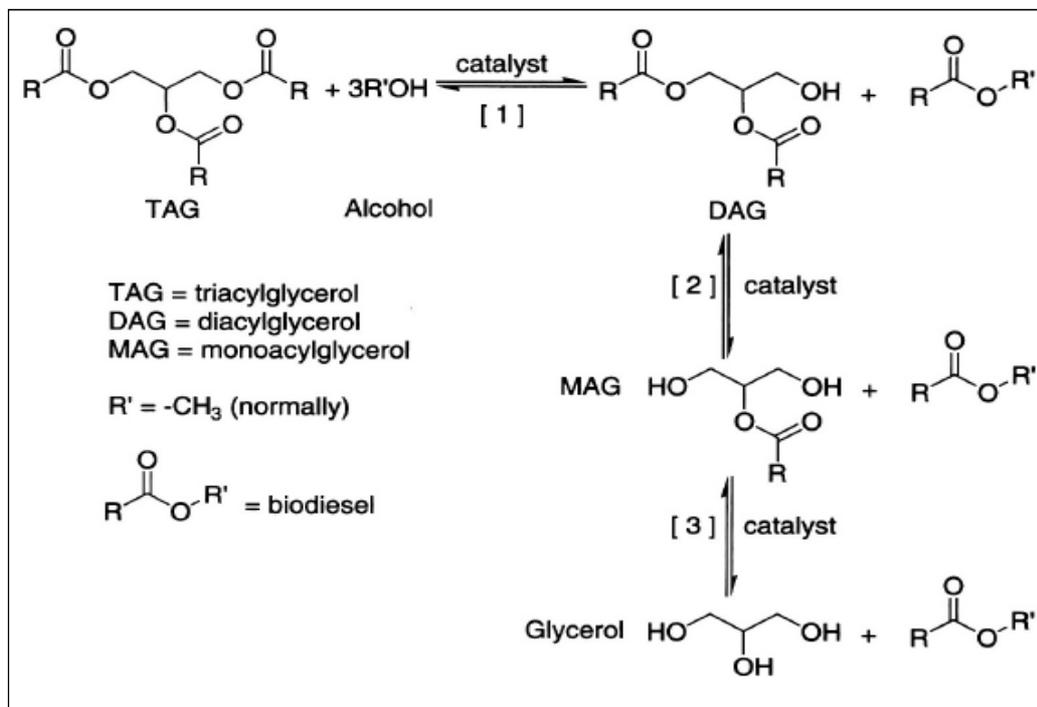
éster es liberada en cada paso [33]. Normalmente, se adiciona un exceso del alcohol para desplazar el equilibrio hacia el producto de interés, en este caso los ésteres alquílicos [29]. Además, de los catalizadores tradicionales básicos y ácidos, se pueden encontrar catalizadores muy variados como lo son azúcares, lipasas, resinas de intercambio iónico, zeolitas entre otros materiales heterogéneos [2].

En la actualidad, casi todo el biodiesel que se produce es obtenido a partir de aceites vegetales comestibles [25]. Importantes investigaciones se han realizado con relación a los aceites vegetales como fuente para la obtención de biodiesel, contrario a las grasas animales, que son mencionadas frecuentemente como una materia prima potencial, pero no han sido estudiadas en la misma medida. Algunos métodos aplicables a los aceites vegetales no son aplicables a las grasas de origen animal debido a las diferencias en sus propiedades naturales [33]. Existen una gran variedad de grasas animales y aceites vegetales de bajo costo que también pueden ser convertidas en biodiesel. El problema con dichas materias primas, es que con frecuencia tienen un alto contenido de ácidos grasos libres (AGL), que no pueden ser convertidos empleando catálisis alcalina [34].

Uno de los principales impedimentos para obtener altos rendimientos en la producción de biodiesel a partir de materias primas sin refinar, es la presencia de ácidos grasos libres en dicho material [32, 35].

### **3.2.3. Reacción de Transesterificación**

El proceso químico mediante el cual se obtiene el biodiesel es conocido como reacción de transesterificación. Este proceso implica la reacción de una molécula de triglicérido (TAG) con otra de un alcohol monohídrico de cadena corta, generalmente en presencia de un catalizador y a temperatura elevada para formar ésteres alquílicos (EA) y glicerol como productos. La conversión de los triglicéridos (TAG's) a biodiesel es un proceso que se da paso a paso, en el cual, inicialmente el alcohol en forma de anión alcóxido reacciona con el TAG para producir FAAE y diglicéridos (DAG's), los cuales reaccionan con moléculas de alcóxido nuevamente para liberar otra molécula de FAAE y generar monoglicéridos (MAG's). Por último, los MAG's experimentan alcoholólisis para producir glicerol y EA, que combinados son conocidos colectivamente como biodiesel. Tres moles de biodiesel y un mol de glicerol son producidos por cada mol de TAG que experimenta una conversión completa [2]. Ver figura 1.



**Figura 1. Mecanismo de Transesterificación [2].**

En la metodología descrita por Freedman et al. 1984 [32], una molécula de TAG reacciona con un exceso de seis equivalentes molares de metanol (respecto al TAG) y 0.5% en masa (respecto al TAG) de un catalizador básico a 60°C y 1 hora de reacción. El exceso de alcohol se usa para incrementar el rendimiento de la reacción, al desplazar el equilibrio hacia los productos, además, de ayudar a obtener una mejor separación de las fases [36, 37].

La figura 1 muestra una forma simple de la reacción de transesterificación, en donde R, son cadenas largas de átomos de carbono e hidrógeno, algunas veces llamadas cadenas de ácidos grasos. Las cadenas carbonadas más comunes entre los ácidos grasos vegetales y animales son (ver tabla 3) [38]:

**Tabla 3. Cadenas carbonadas más comunes de ácidos grasos.**

Nombre	Estructura	Características
<b>Ácido palmítico</b>	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_{14}\text{-COOH}$	16 carbonos, saturado
<b>Ácido esteárico</b>	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_{16}\text{-COOH}$	18 carbonos, saturado
<b>Ácido Oléico</b>	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_7\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_7\text{-COOH}$	18 carbonos, 1 doble enlace, insaturado
<b>Ácido Linoléico</b>	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_4\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_7\text{-COOH}$	18 carbonos, 2 dobles enlaces, insaturado
<b>Ácido Linolénico</b>	$\text{HOOC-(CH}_2\text{)}_7\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH}_3$	18 carbonos, 3 dobles enlaces, insaturado

Generalmente, en la reacción de transesterificación, se emplean alcoholes monohídricos, primarios o secundarios, alifáticos y con un contenido de entre 1 hasta 8 átomos de carbono [33]. Entre los alcoholes que pueden ser usados para la reacción de biodiesel están el metanol, etanol, propanol, butanol y alcohol amílico [29].

El metanol es el alcohol que prevalece a nivel mundial para la producción de biodiesel. Las razones por las cuales se elige como alcohol para la reacción de transesterificación son varias, entre ellas, está el hecho de que, el metanol es el más barato de los alcoholes. En Estados Unidos su precio es tan solo la mitad del precio del etanol, su más cercano competidor [29, 39]. Sin embargo, una situación inversa se presenta en Brasil, ya que en esta región es más utilizado el etanol por su menor costo comparado con el metanol [2]. Los ésteres metílicos de ácidos grasos (EMAG), producidos por medio de transesterificación, son utilizados con gran frecuencia en la vasta mayoría de laboratorios, bancos de pruebas para motores y pruebas de rendimiento de conversión de triglicéridos a metilésteres (biodiesel) [29, 39].

Como se mencionó anteriormente, los catalizadores son utilizados para acelerar la reacción de transesterificación. Algunas, de las distintas metodologías desarrolladas para la producción de los ésteres alquílicos (biodiesel), reciben su nombre de acuerdo a la naturaleza química del catalizador que se use [36]. Dentro de este grupo encontramos la catálisis alcalina, ácida, enzimática, con bases no iónicas, etc. Existe una gran variedad de catalizadores, estos pueden ser ácidos homogéneos ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y heterogéneos (zeolitas, resinas sulfónicas,  $\text{SO}_4/\text{ZrO}_2$ ,  $\text{WO}_3/\text{ZrO}_3$ ), básicos heterogéneos ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,

Na/NaOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y homogéneos (NaOH, KOH) o enzimáticos (lipasas) [2, 33, 40]. Actualmente, se desarrollan metodologías en donde no se hace uso de algún tipo de catalizador, en cambio, se emplean alcoholes en condiciones supercríticas, es decir, sometidos a altas temperaturas y presiones [29].

### 3.2.3.1. Variables que Afectan la Reacción de Transesterificación

#### 3.2.3.1.1. Acidez y Humedad

La calidad de la materia prima determina en gran parte qué tipo de catalizador o proceso es requerido para producir los ésteres alquílicos (EA) que satisfagan los estándares pertinentes al biodiesel tales como ASTM D6751 o EN14214. Si la materia prima contiene un porcentaje significativo de ácidos grasos libres (>3 % en masa), los típicos catalizadores básicos tales como el metóxido o hidróxido de sodio o potasio, no serán efectivos, dando como resultado reacciones secundarias no deseadas, en las cuales, el catalizador reaccionará con los ácidos grasos libres para formar jabón (sal de sodio) y agua (o metanol en el caso de metóxido de sodio) (Ec a), acabándose así el catalizador, obteniéndose de esta manera una indeseable mezcla de ácidos grasos libres, triglicéridos diglicéridos y monoglicéridos sin reaccionar, agua y/o metanol, jabón, biodiesel y glicerol. Por otro lado, el agua que posiblemente contengan tanto el alcohol como la materia prima, promoverá la hidrólisis de los ésteres alquílicos (Biodiesel) formados previamente (Ec b) [41]. Ver figura 2.

En efecto, la reacción de transesterificación catalizada por base, no se dará o será significativamente retrasada si el contenido de ácidos grasos libres de la materia prima es 3 % en masa o mayor [2, 34, 41].

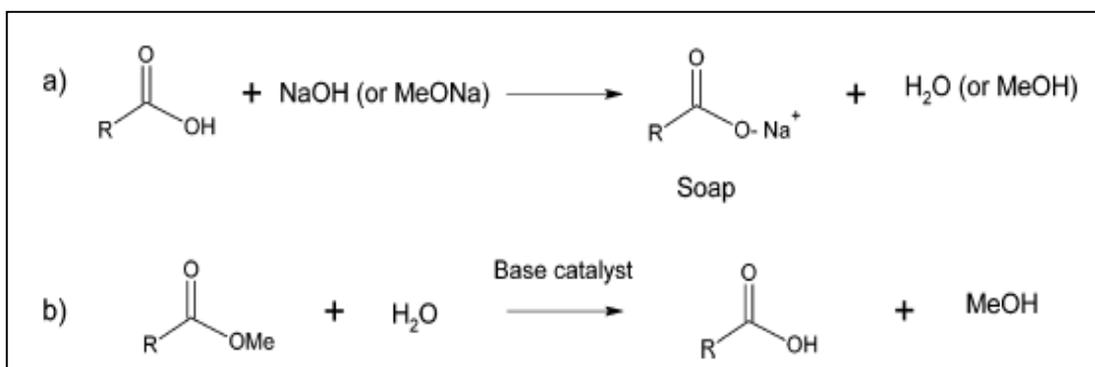


Figura 2. Reacciones indeseadas en el proceso de transesterificación [41].

Hasta cerca del 5% en contenido de AGL en la materia prima, la reacción puede continuar siendo catalizada usando catalizadores básicos, pero una mayor cantidad de catalizador debe ser adicionada para compensar la pérdida de catalizador en la formación de jabón [42, 43]. Cuando el contenido de AGL en la materia prima es superior al 5%, la formación de jabón inhibe la separación de los ésteres alquílicos y el glicerol. Para estos casos, un catalizador ácido, tal como el ácido sulfúrico, puede ser usado para esterificar los AGL y convertirlos en ésteres alquílicos [32, 43].

Adicionalmente, la presencia de agua en la grasa o en el aceite, también puede ocasionar problemas. Cuando el agua está presente, particularmente a altas temperaturas, puede hidrolizar los triglicéridos a di-glicéridos y posteriormente formar un ácido graso libre (AGL) [38], potenciando la formación de sales, mayor consumo del catalizador y reducción de su efectividad. Viéndose de esta manera afectada la producción de los ésteres alquílicos [32].

Ma et al. 1998 [44], demostró que ambos factores generan efectos negativos sobre la reacción de transesterificación. Adicionalmente, cuando ambos están presentes en la reacción, presentan un tipo de sinergia, que potencia su efecto negativo. Ambos parámetros se analizaron por separado, encontrándose que la presencia de agua tiene mayores impactos negativos en comparación con los ácidos grasos libres.

### **3.2.3.1.2. Tipo de Alcohol y Relación Molar Alcohol/Aceite**

Una de las variables más influyentes en el rendimiento de la producción de ésteres alquílicos, es sin duda, la relación molar entre el alcohol y el aceite y/o grasa empleada. Según Freedman et al. 1984 [32], la estequiometría de esta reacción requiere tres moles de alcohol por una mol de triglicérido, para obtener tres moles de éster por un mol de glicerina. En estudios realizados sobre la alcoholólisis básica del aceite de girasol, se evaluaron los rendimientos de la reacción cuando se empleaba una relación molar de 3:1 metanol/aceite, en comparación con una relación molar de 6:1 metanol/aceite. Después de una hora de reacción, se observó una conversión alrededor del 88% para la relación molar 3:1, mientras que la relación molar 6:1, mostró rendimientos por el orden del 98%.

Además, Freedman et al. 1984 [32], estudió la influencia de la relación molar en el rendimiento de la reacción de transesterificación, pero usando catalizadores ácidos, e identificó que los mejores rendimientos se obtenían, cuando se tenía una relación 30:1 y temperaturas por el orden de los 120°C. Con relaciones 6:1 y 20:1, la reacción fue insatisfactoria.

Estos resultados confirman la importancia de adicionar un exceso de alcohol para desplazar la reacción hacia los productos. Sin embargo, Meher et al. 2004 [37], recomienda considerar, que al aumentar esta relación molar se aumenta igualmente la solubilidad, afectándose de esta manera, la separación de las dos fases obtenidas.

Varios investigadores [29, 32, 45, 46], han estudiado la reacción de transesterificación empleando alcoholes tales como etanol, propanol, butanol, entre otros. Estos investigadores, han convergido en la observación sobre la formación de emulsiones durante el proceso de transesterificación y su permanencia hasta finalizada la reacción. Dichas emulsiones, en el caso de la metanólisis, se separan fácil y rápidamente, para formar una capa inferior rica en glicerol y una capa superior rica en ésteres alquílicos [37,47]. Este fenómeno se presenta fundamentalmente, debido a la naturaleza química de dichos alcoholes, ya que a medida que se aumenta el número de carbonos, disminuye la polaridad de la molécula [48].

Otro factor, que se debe considerar a la hora de aumentar el número de carbonos en el alcohol empleado para la reacción de transesterificación, es el aumento de la viscosidad en los alquilésteres resultantes. Hecho que se traduce en una ligera disminución en la potencia y el torque en el motor [29].

### **3.2.3.1.3. Cantidad y Tipo de Catalizador**

Los catalizadores usados para la transesterificación de triglicéridos pueden ser alcalinos, ácidos, enzimas o catalizadores heterogéneos. De estos, los que más sobresalen son los alcalinos; tales como los hidróxidos y metóxidos de sodio y potasio respectivamente, que han demostrado mayor efectividad [33]. Si los aceites o grasas, tienen un elevado contenido de FFA, la catálisis ácida es la más adecuada [34, 37, 47].

Varios investigadores, entre ellos Sulistyó et al. 2009 [49], han estudiado el efecto del catalizador sobre la transesterificación, y han notado que la conversión de los triglicéridos aumenta a medida que aumenta la concentración y cantidad del catalizador. Tanto en catálisis alcalina, como en catálisis ácida, se ha encontrado dependencia de la conversión de triglicéridos con la cantidad de catalizador usado [31, 50]. Se debe tener cuidado con la cantidad adicionada de catalizador, puesto que un exceso de catalizador conlleva a la formación de emulsiones. Posteriormente, se da la formación de un gel. La formación de este gel interfiere en la separación de las fases líquidas resultantes [49].

Aunque la transesterificación con catálisis enzimática (bio-catálisis) no se ha desarrollado de forma comercial, un gran número de nuevos resultados y patentes son reportados. Se han

realizado estudios sobre aspectos enfocados a la optimización del proceso (tales como: solvente, pH, microorganismos generadores de las enzimas, etc.) [51, 52, 53, 54], con el fin de establecer condiciones adecuadas para su posterior aplicación a nivel industrial. Sin embargo, los rendimientos de la reacción, así como los tiempos de reacción, siguen siendo desfavorables en comparación con la catálisis alcalina [55].

#### **3.2.3.1.4. Tiempo de Reacción**

Ma et al. 1998 [44], estudió el efecto de varios factores que influyen en la reacción de transesterificación, entre ellos el tiempo de reacción. Para el estudio se empleó sebo vacuno como fuente de grasa para la reacción. Se observó, que durante el primer minuto, la reacción transcurrió muy lentamente, obteniéndose bajas conversiones de triglicéridos a ésteres alquílicos, pero durante los siguientes cinco minutos la reacción tuvo un incremento del 1 al 38% de conversión en triglicéridos.

El retraso inicial se debió en gran parte a la mezcla y dispersión del alcohol en el sebo vacuno. Dado que la reacción solo ocurre en la interfase alcohol-triglicéridos, a mayor superficie de contacto, más rápida será la reacción. A medida que transcurre la reacción se forman compuestos intermediarios como los diglicéridos y monoglicéridos. Los di y monoglicéridos son buenos agentes emulsificantes y convierten las dos fases inmiscibles en una emulsión estable. Después de la ruptura de dicha emulsión la reacción transcurre con mayor rapidez.

Estudios similares fueron reportados por Freedman et al. 1986 [56], estudiando la transesterificación de aceites de maní, algodón, girasol y soya con metanol, empleando una relación molar 6:1 metanol/aceite, con 0,5% de metóxido de sodio como catalizador a 60°C por una hora. Rendimientos del 80% fueron observados en solo un minuto, para los aceites de soya y girasol. Después de una hora los rendimientos fueron casi los mismos para los cuatro aceites, entre 93-98%. Otros investigadores, entre ellos Kalbande et al. 2008 [57], no han obtenido los mismos resultados empleando otras fuentes de aceites, como por ejemplo en la transesterificación del aceite obtenido de *Jatropha curcas*, donde el tiempo de reacción se extiende hasta una hora y media, para obtener buenos rendimientos.

#### **3.2.3.1.5. Temperatura de Reacción**

Las temperaturas requeridas para la transesterificación varían en función de la composición de los ácidos grasos de la materia prima. Por ejemplo, aceites y/o grasas que tengan un elevado contenido de ácidos grasos saturados, requieren temperaturas de reacción más altas, en comparación con aquellas grasas y/o aceites que tengan un bajo contenido de estos

ácidos. Por el contrario, un contenido en ácidos grasos insaturados alto, necesitará una menor temperatura de reacción [33]. Así mismo, Bhatti et al. 2008 [50], lo confirmó en su estudio, donde residuos grasos de cordero y pollo, se utilizaron para la producción de biodiesel. El estudio reveló, que el sebo de cordero, (con un contenido elevado de ácidos grasos saturados) requirió mayor temperatura de reacción (60°C) para obtener una conversión del 93% de los triglicéridos, en comparación con los residuos grasos de pollo (alto contenido de ácidos grasos insaturados), donde se obtuvo una conversión de triglicéridos del 99%, a menor temperatura (50°C). Ambas reacciones se realizaron usando catálisis ácida, debido al alto contenido de ácidos grasos libres de las materias primas [34].

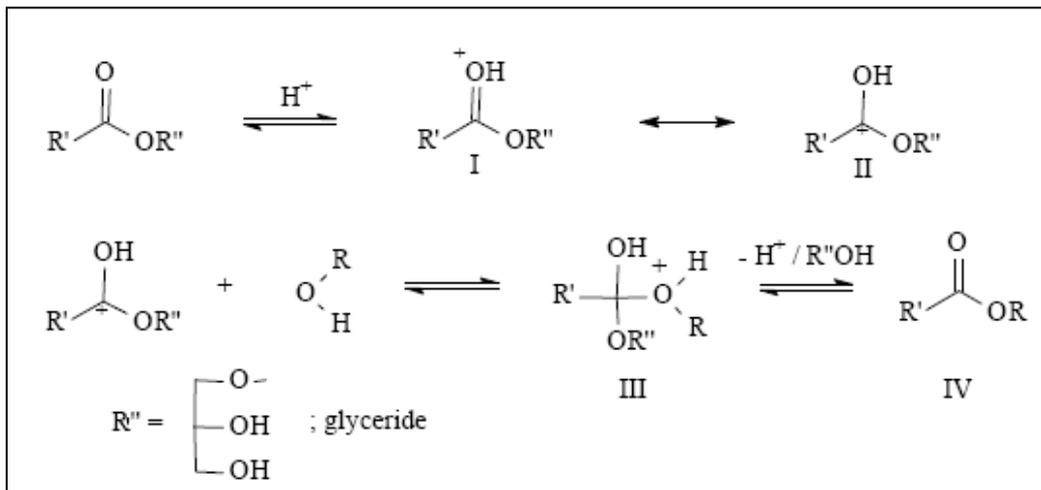
Generalmente, la reacción con catalizador básico se lleva a cabo a una temperatura cercana a la temperatura de ebullición del alcohol empleado [32].

### **3.2.3.2. Tipos de Catálisis**

#### **3.2.3.2.1. Procesos con Catalizadores Ácidos**

El proceso de transesterificación puede ser catalizado por ácidos, preferiblemente sulfónico o sulfúrico. Estos catalizadores otorgan altos rendimientos de alquilésteres, pero la reacción es muy lenta. Además, se lleva a cabo a temperaturas superiores a los 100°C [32]. Pryde et al. 1986 [56], demostró que la metanolisis del aceite de soya empleando un 1% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> como catalizador, una relación molar alcohol/aceite de 30:1 y una temperatura de 65°C, tardó cerca de 50 horas para alcanzar una conversión superior al 99%, mientras que la butanolisis (a 117°C) y la etanolisis (a 78°C) usando las mismas cantidades de alcohol y catalizador, tardaron 3 y 18 horas respectivamente.

El mecanismo de transesterificación con catalizador ácido se muestra en la figura 3. La protonación del grupo carbonilo del éster forma un carbocatión (II), el cual, después del ataque nucleofílico del alcohol, produce un intermediario tetrahédrico (III), que elimina el glicerol, formándose un nuevo éster (IV) y regenerándose el catalizador H<sup>+</sup>. De acuerdo a este mecanismo, ácidos carboxílicos pueden formarse por la reacción del carbocatión (II) con agua presente en la mezcla. Lo anterior, sugiere que el proceso de catálisis ácida debe desarrollarse en ausencia de agua, para evitar reacciones competitivas (no deseadas) y bajos rendimientos de ésteres alquílicos [55].



**Figura 3. Mecanismo de transesterificación con catalizador ácido [36].**

### 3.2.3.2.2. Procesos con Catalizadores Básicos

La transesterificación de aceites y/o grasas con catalizadores básicos es más rápida que la reacción con catalizadores ácidos. Debido a esta razón, junto con el hecho de que los catalizadores alcalinos son menos corrosivos que los compuestos ácidos, los procesos industriales están a favor de los catalizadores básicos, tales como los alcóxidos metálicos alcalinos, los hidróxidos y los carbonatos de sodio y potasio.

El mecanismo de transesterificación con catalizador básico se muestra en la figura 4. El primer paso (Ec 1) describe la reacción de la base con el alcohol, produciendo un alcóxido y el catalizador protonado. El ataque nucleofílico del alcóxido al grupo carbonilo del TAG genera un intermediario tetrahédrico (Ec 2), a partir del cual, el éster alquílico y el correspondiente anión del diglicérido son formados (Ec 3). Este último desprotona el catalizador, regenerándose así las especies reactivas (Ec 4). El catalizador está ahora disponible para reaccionar con una segunda molécula de alcohol, empezando otro ciclo catalítico. Los diglicéridos y monoglicéridos son convertidos por la misma vía, en ésteres alquílicos y glicerol [55].

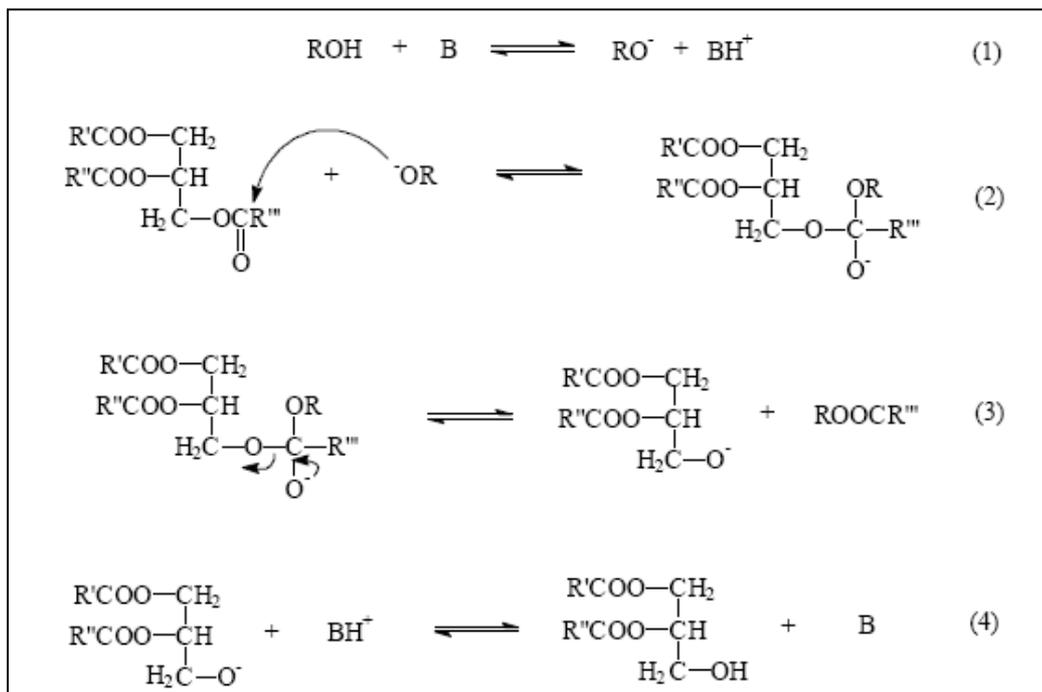


Figura 4. Mecanismo de transesterificación con catalizador básico [36].

### 3.2.3.2.3. Procesos con Catalizadores Homogéneos

Son muchos y variados los catalizadores heterogéneos con los que diversos autores intentaron la transesterificación de aceites vegetales. Principalmente se probaron óxidos, carbonatos, hidróxidos, metóxidos, y fosfatos de metales como potasio, calcio, hierro, bario, zinc y magnesio. Otros trabajos incluyen sólidos bimetálicos Sn-Ni, resinas de intercambio, zeolitas y compuestos órgano-metálicos.

Las ventajas de un proceso con catalizadores heterogéneos, adicional a las altas velocidades de reacción, se deben a las características frecuentes del catalizador heterogéneo: insolubilidad en el medio de reacción, larga vida de duración, resistencia a altas temperaturas, gran área superficial, mayor facilidad en las etapas de separación y purificación y la posibilidad de recuperación. El carácter heterogéneo conduce a una disminución en el número de etapas en el proceso de transesterificación, reduce la cantidad de productos no deseados y facilita la separación de la mezcla post-reacción. Al final de la reacción, cuando se emplea un catalizador sólido, el producto se encuentra libre de catalizador y no se requiere agua de lavado, facilitando la operación de separación y purificación del producto y el catalizador, este último con la posibilidad de reutilizarse [58].

Varios investigadores [58, 59, 60], han realizado estudios para evaluar la actividad catalítica del hidróxido de bario y óxido de calcio en la reacción de transesterificación, encontrando que presentan menor actividad que los catalizadores homogéneos usados industrialmente debido a su menor carácter básico y a los problemas difusionales característicos de los catalizadores heterogéneos, sin embargo, se encontró que por catálisis heterogénea si se pueden obtener ésteres metílicos del aceite de palma, con conversiones superiores al 80%.

#### **3.2.3.2.4. Procesos Catalizados por Lipasas**

Debido a su alta disponibilidad y la facilidad con la que pueden ser manipuladas, las enzimas hidrolíticas han sido ampliamente aplicadas a la síntesis orgánica. No requieren algún tipo de coenzimas y son razonablemente estables, y con cierta frecuencia toleran solventes orgánicos. Su potencial para la regio-selectividad y en especial para la síntesis enantioselectiva las hace herramientas valiosas en los procesos que ellas catalizan [55].

#### **3.2.4. Materias Primas para la Producción de Biodiesel**

En general, existen cuatro grandes categorías de materias primas para la producción de biodiesel: algas, semillas oleaginosas, grasas animales y varios materiales de bajo costo, tales como aceites de cocina usados, grasas y residuos de jabón [2].

Los principales aceites vegetales producidos mundialmente durante el 2008 año fiscal (octubre 1, 2008 a septiembre 30, 2009) son; aceite de palma (43,20 MMT), aceite de soya (37,81 MMT), aceite de colza (19,38 MMT), y aceite de girasol (11.68 MMT) (USDA 2008) [2]. No es sorprendente que la producción de aceite vegetal y su uso como materia prima para biodiesel, estén íntimamente relacionados. Las materias primas para la producción de biodiesel varían según el lugar, de acuerdo al clima y disponibilidad. Generalmente los aceites y grasas más abundantes en una determinada región, son las materias primas más comunes. Así, los aceites de colza y girasol son los principalmente utilizados para la producción de biodiesel en Europa, el aceite de palma predomina en los países tropicales y el aceite de colza junto con las grasas animales son los más comunes en los Estados Unidos. Sin embargo, incluso combinando estas materias primas no basta para reemplazar completamente el volumen de petrodiesel convencional. Por lo tanto, la búsqueda de materias primas alternativas para la producción de biodiesel ha ido ganando importancia [2, 26, 39, 40, 61].

Entre las materias primas más comunes para la producción del biodiesel se tienen:

#### **3.2.4.1. Aceites de Semillas Oleaginosas: colza, soya, girasol, coco, algodón, higuierilla, maní, canola, etc**

Dentro de este grupo de semillas oleaginosas, la de colza, es quien lleva la delantera a nivel mundial, como materia prima para la producción de biodiesel, seguida muy de cerca por la de soya, según reportes realizados por la Asociación Mundial de Soya en el 2005 [23]. Por otro lado, la región nordeste de Brasil y algunos sectores rurales de Argentina, han visto una gran oportunidad para la obtención de biodiesel a partir de aceite de algodón [46, 40, 62]. Además de lo anterior, según estudios realizados en esta zona (Brasil), se tiene que, el aceite de soya es una fuente que ya se produce a una escala proporcionada para la producción de biodiesel. Sin embargo, otras fuentes, tales como el girasol, maní, algodón, coco, aceite de palmiste o de babasú y especialmente, el aceite de ricino, se pueden utilizar en un futuro próximo, una vez que su cultivo pueda alcanzar un realce económico [40]. Así mismo, el aceite de higuierilla está incluido dentro de un grupo que ha sido considerado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, como materias primas potencialmente estratégicas para la producción de biodiesel en el país, de acuerdo con el proyecto *transición de la agricultura* impulsado por este mismo ente gubernamental [63].

La investigación en materias primas es liderada principalmente por Estados Unidos, China, Japón, India, Alemania y Turquía, que trabajan primordialmente la soya, la colza, el girasol y la palma. En cuanto al uso de aceite de palma cabe destacar que Japón y Malasia lo consideran dentro de sus marcos de informe [23].

#### **3.2.4.2. Aceites de Frutos Oleaginosos: Palma Africana**

El aceite de palma africana según reportes de la Asociación Mundial de Soya en el 2005, es la segunda materia prima usada para la producción de biodiesel, pero según el mismo reporte, en corto plazo se podría ver relegada al tercer puesto por la soya [23]. Mientras tanto, en Colombia este fruto oleaginoso es la materia prima con mayor potencial para la producción de biodiesel [16], dadas las condiciones del cultivo, el cual, cuenta con los mayores rendimientos por hectárea entre las oleaginosas, así como el gran aumento de áreas cultivables en los últimos años [30, 64]. Además, la palma es el cultivo más extenso y tecnificado que aporta más del 50% de la demanda interna de aceites vegetales del país, como lo reporta Carlos Ariel Cardona profesor de la Universidad Nacional de Colombia (sede Manizales) en su libro “BIODIESEL”. No obstante, se menciona que, actualmente no sólo los aceites vegetales y las grasas animales son excelente fuente de triglicéridos para la producción de biodiesel, además de ellos, los aceites residuales de fritura desechados por la industria de los alimentos y que generan un problema ambiental, son materias primas

utilizadas para este propósito [65], sin olvidar que éste último tiene poca disponibilidad y requiere pre-tratamiento para su uso como fuente de triglicéridos.

#### **3.2.4.3. Aceites de Semillas Oleaginosas Alternativas: *Brassica carinata*, *Camelina sativa*, *Pogianus*, *Cynara cardunculus*, *Crambe abyssinica*, *Pongamia glabra*, *Jatropha curcas*, etc**

Quizás, es la *Jatropha curcas* la semilla oleaginosa más destacada de este grupo; en gran medida a que es adaptable a terrenos marginales improductivos. Tiene un amplio ciclo de vida (más de 50 años), sus semillas contienen alrededor del 35% de aceite no comestible, entre otras sustancias tóxicas que podrían afectar la aceptación del aceite de *Jatropha* para la producción de biodiesel [66, 67]. Es de considerar, el hecho de que es particularmente resistente a climas áridos y no está destinada a la producción de alimentos, inclusive se le puede usar como control para la erosión y el mejoramiento del suelo [23, 68, 69, 70].

Además, de la *Jatropha curcas* sobresale también la *Cynara cardunculus*, comúnmente conocida como cardo. Pertenece a la familia de las *Asteraceae*, donde también están incluidos el girasol, el cardamo, la alcachofa, etc. Sus semillas tienen un contenido de aceite por el orden del 25%; el cual guarda grandes similitudes con el aceite de girasol. Su cultivo ha sido fomentado por la Unión Europea, quien aprobó su siembra en reemplazo de tierras de cultivo tradicionales. En España se han adelantado varios estudios, donde se evidencia su gran adaptabilidad al clima de la Península Ibérica [31].

#### **3.2.4.4. Aceites de Fritura usados**

El biodiesel producido a partir de aceites residuales ofrece una atractiva fuente alternativa de energía. Además, este posee similares características al biodiesel producido empleando aceites vírgenes, tal como lo evidencian los resultados obtenidos en un estudio realizado en el laboratorio de Oleoquímica de la Universidad Tecnológica de Pereira [20]. Al mismo tiempo, emite menos material particulado y compuestos orgánicos volátiles [71]. Por otro lado, el uso de aceite residual podría ayudar a solucionar el problema de su disposición como residuo [72]. Encontrar y recolectar estos aceites usados, es quizá el mayor reto de esta materia prima [71].

#### **3.2.4.5. Microalgas Como Fuente de Aceite**

Numerosos investigadores apoyan la idea de que las algas serán la materia prima ideal para la producción de biocombustibles. Por un lado, su contenido oleico puede ser convertido en

biodiesel, mientras que su contenido en carbohidratos puede ser fermentado y convertido en bioetanol [47, 73].

Las microalgas tienen un elevado contenido lipídico, cerca del 60%, tienen altas tasas de crecimiento, su producción de aceite por hectárea, supera de 10 a 100 veces la producción de aceite vegetal. Asimismo, no compiten con alimentos o materias primas [73, 74].

Las algas verdes oleaginosas pueden dar un promedio total de contenido lipídico alrededor del 25%. Dicho contenido puede ser considerablemente variado si la célula se encuentra expuesta a condiciones ambientales que le resulten desfavorables, como lo es, el estrés foto-oxidativo o la falta de nutrientes. Bajo estas condiciones, el promedio total de lípidos se eleva hasta cerca del 46% [75, 76].

Hay distintas maneras para producir algas a escala industrial. Existe el uso de tanques de canalización, fotobioreactores de sistema cerrado, fotobioreactores de sistemas abiertos, entre otros [73]. Los fotobioreactores de sistemas abiertos, son los más implementados en casi toda la producción comercial de algas, así lo afirma John Benemann, un consultor con sede en Walnut Creek, California, Estados Unidos, quien se ha visto involucrado en la investigación de microalgas en casi todos los niveles por más de 40 años [76].

#### **3.2.4.6. Grasas Animales**

- Sebo de distintas calidades
- Residuos grasos avícolas

Sus bajos precios en el mercado, en comparación con los aceites vegetales, hacen de estas grasas, una materia prima muy llamativa para la industria del biodiesel. Además, se les considera peligrosas para la salud humana, una de las principales razones de su bajo costo [77, 78]. Existen varias formas de clasificar este tipo de residuos, una de ellas, hace referencia al contenido de ácidos grasos libres (AGL), de la cual se generan tres categorías para nombrarlas. Estas son: grasas animales grado alto, con un contenido de AGL alrededor del 2%, estas grasas son usadas para consumo humano, alimento para animales y la industria cosmética, grasas animales grado medio, con un contenido de AGL entre el 3-5%, son utilizadas principalmente como forraje para aves de corral. Por último, se encuentran las grasas animales grado bajo, en estas el contenido de AGL, es generalmente superior al 5%. Estas últimas, son las que generalmente se emplean para la producción de biodiesel [34, 39, 50, 79].

### **3.2.5. Grasa de Pollo como Materia Prima Potencial**

A nivel mundial, la materia prima más común para la producción de biodiesel es el aceite vegetal refinado. El primer inconveniente con estas materias primas de origen vegetal (aceites de soja, colza, canola, girasol etc), es su relativo alto costo, el cual representa del 70-85% del presupuesto total en la producción de biodiesel, haciendo al biodiesel de origen vegetal no competitivo económicamente frente al petrodiesel [35]. Además, el uso de estas materias primas por un tiempo prolongado es potencialmente perjudicial para la sociedad y el medio ambiente. El principal problema que frecuentemente enfrenta la industria del biodiesel es la disponibilidad de materia prima de alta calidad, abundante y barata. En consecuencia, la búsqueda de materias primas alternativas, es considerada una necesidad para la industria [80].

Por lo tanto, debido a los altos precios de las materias primas, el biodiesel es más caro que el diesel de petróleo generando esta situación una posible solución, la cual puede ser, producir el biocombustible a partir de grasas menos costosas, incluyendo el sebo no comestible, manteca de cerdo y grasa amarilla. Estas materias primas podrían ser adecuadas para dicho proceso [81].

Un estudio previo ha demostrado que la grasa de pollo es una materia prima favorable para la producción de biodiesel debido a su bajo costo y alto rendimiento. Entre los factores que dominan la viabilidad económica de la producción de biodiesel se incluyen, el costo de la grasa o el aceite y el rendimiento alcanzado a partir de estas materias primas.

De acuerdo con datos técnicos y económicos relacionados con diversos productos agrícolas para la producción de biodiesel tales como aceite de soja, aceite de salvado de arroz y grasa de pollo se determinó que “la grasa de pollo es una materia prima atractiva desde la perspectiva de su bajo costo y bajo riesgo en el precio de los demás insumos” [35].

Para finalizar, según un estudio realizado en la universidad Federal de Rio de Janeiro, una fuente adecuada para la producción de biodiesel debe cumplir en lo posible dos requisitos: bajo costo de producción y producción a gran escala, sin dejar de lado algo tan importante como el análisis y las características del mercado de los aceites ya que una materia prima apropiada para este fin, no debe competir con otras aplicaciones que alcancen precios más altos, como por ejemplo, materias primas para la industria farmacéutica, aunque la demanda de materia prima farmacéutica sea inferior a la de las fuentes de combustible [40].

### **3.2.6. Propiedades del Biodiesel**

Las propiedades de los diferentes ésteres grasos que componen el biodiesel, determinan en totalidad sus propiedades como combustible. Así mismo, las propiedades de los diferentes ésteres grasos son determinadas por las características estructurales tanto de los ácidos grasos como del alcohol que los componen. Las características estructurales que influyen en las propiedades físicas y combustibles de una molécula de éster graso son; la longitud de la cadena, sus ramificaciones y el grado de insaturación. Las propiedades combustibles más importantes que son influenciadas por el perfil de ácidos grasos, y a su vez, por las características estructurales de los ésteres grasos son [82]:

- El número de Cetano
- Las emisiones de escape
- El calor de combustión
- Fluidez a bajas temperaturas
- Estabilidad oxidativa
- Viscosidad
- Lubricidad.

Los estudios relacionados con la influencia de la composición de los triglicéridos en la calidad del biodiesel son escasos. Muniyappa *et al.* (1996) reportaron densidad, viscosidad y punto de nube de dos biocombustibles (biodiesel) sintetizados a partir de aceite de soja y aceite de sebo vacuno. El punto de nube alto de los ésteres metílicos del aceite de sebo vacuno fue indicativo de una alta concentración de ésteres grasos saturados [83]. Además, se han realizado otras investigaciones similares relacionadas con la determinación y comparación de algunas propiedades físicas y combustibles del biodiesel obtenido a partir de diferentes fuentes vegetales [82, 83, 84].

### **3.2.7. Ventajas del Biodiesel**

El biodiesel es miscible con el petrodiesel en cualquier proporción y posee varias ventajas técnicas con respecto al diesel de ultra-bajo contenido de sulfuros (ULSD, <15 ppm S), tales como [2, 27, 30, 61, 85, 86]:

- Biodegradable en solución acuosa, el 95% desaparece en 28 días.
- No requiere mayores modificaciones para su uso en motores diesel convencionales.
- Tiene gran poder de lubricación y minimiza el desgaste del motor alargando su vida útil.
- No emite óxidos de azufre durante su combustión ( $\text{SO}_x$ ).
- Su contenido de oxígeno ayuda para una combustión completa.
- Mayor índice de cetano (velocidad de ignición) en comparación con el diesel convencional.
- Puede utilizarse en mezclas con diesel convencional en cualquier proporción (B5, B10, B20 etc).
- Disminuye la concentración de partículas en suspensión emitidas de, metales pesados, monóxido de carbono, hidrocarburos aromáticos policíclicos y compuestos orgánicos volátiles.
- Reduce emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
- Reduce el humo visible del arranque hasta un 30%.
- No incide negativamente en la contaminación de suelos.
- Ayuda a la eliminación de residuos, ya que éstos pueden ser utilizados como materia prima para su producción (por ejemplo, aceites usados de fritura, residuos grasos de animales, etc.).
- Constituye una fuente de energía renovable y limpia.
- Su utilización contribuye a disminuir la dependencia energética de los combustibles fósiles tradicionales y otorga una mayor seguridad en cuanto al abastecimiento energético.
- Constituye una alternativa para las tierras agrícolas ya que, contribuye a la fijación de población en el ámbito rural, manteniendo niveles de trabajo y renta, fomentándose a su vez la creación de diferentes industrias agrarias.

- Punto de inflamación superior al diesel convencional, lo cual otorga mayor seguridad para su manejo y almacenamiento.
- Ha sido probado satisfactoriamente por más de 20 años en Europa y es el único combustible alternativo que cumple con los requisitos de la agencia de protección ambiental (EPA).

### **3.2.8.Desventajas del Biodiesel**

Las desventajas más importantes del biodiesel incluyen [2, 81, 82, 87, 88]:

- El alto costo de la materia prima, lo cual no lo hace competitivo frente a los demás combustibles tradicionales.
- Menor tiempo de almacenamiento (es aconsejable periodos inferiores a 6 meses).
- Baja estabilidad oxidativa.
- Bajo contenido de energía volumétrica.
- En algunos casos, mayores emisiones de NO<sub>x</sub> frente a diesel y biodiesel.
- Poder calorífico menor.
- Presenta problemas de fluidez a bajas temperaturas.
- Su poder solvente lo hace incompatible con una serie de plásticos y elementos derivados del caucho natural, y a veces obliga a sustituir mangueras en el motor.
- Residuos de glicéridos, glicerol, ácidos grasos libres y catalizador pueden traer consecuencias desfavorables para el desempeño del motor, por ejemplo, depósitos de hollín en los inyectores.
- Alta viscosidad en comparación con el diesel convencional.
- Más sensible a altas temperaturas y
- Reporta menor potencia eficaz en motores.

### 3.2.9. Emisiones del Biodiesel

Las investigaciones sobre el biodiesel derivado de aceites vegetales y grasas animales se mantienen a fin de alternar este tipo de combustibles con el diesel derivado del petróleo. Se ha concluido por muchos estudios que, el biodiesel como un combustible alternativo para este tipo de motores, reduce las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), hidrocarburos aromáticos policíclicos nitrogenados (nPAH) y material particulado (PM), pero aumenta las emisiones de NO<sub>x</sub> en los gases de escape frente al petrodiesel [81, 89, 90,].

Varios estudios, entre ellos el de Wang et al. 2000 [91], han mostrado reducciones del 25% en las emisiones de PM<sub>10</sub> (material particulado de 10 micras de tamaño) en motores no modificados al usar mezclas de 35% de biodiesel de soja con diesel de petróleo (0.002% S, 0% aromáticos, 11% O<sub>2</sub>), en comparación con las emisiones generadas por el diesel convencional (0.04% S, 30% aromáticos, 0.006% O<sub>2</sub>). Los estudios sugieren que la reducción en la emisión de material particulado se debe al contenido de oxígeno de la mezcla biodiesel-Diesel, el cual sustituye al oxígeno del aire en las regiones ineficientes de mezcla combustible-aire. Sin embargo, el contenido de material orgánico soluble, aumenta debido al biodiesel no quemado [92].

Según investigaciones realizadas por la USEPA (United States Environmental Protection Agency) en el 2002, los impactos de las emisiones del biodiesel varían en función del tipo de materia prima de la cual procede, ya sean fuentes vegetales, animales u otras [93].

En cuanto a las emisiones de óxidos de nitrógeno, se presentan leves incrementos en comparación al diesel tradicional debido principalmente a la edad del motor. Además, la formación de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), se encuentra ligada a las altas temperaturas y presiones dentro de la cámara de combustión del motor. Estas altas temperaturas producidas durante la combustión del biodiesel, sumadas al contenido de oxígeno del mismo, facilitan la formación de dichos óxidos [40]. Estos incrementos aunque leves, pueden llegar a ser problemáticos por la formación de ozono; uno de los principales contaminantes ambientales, debido a su alto poder fotoquímico. Por los rayos ultravioleta el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) forma el O<sub>3</sub>, produciendo lo que se conoce con el nombre de smog fotoquímico, asociado este último a una gran variedad de enfermedades respiratorias entre ellas el asma [94].

### 3.2.10. Recuperación del Glicerol

Aunque los ésteres de ácidos grasos son principalmente el producto deseado en la producción de biodiesel, la recuperación del glicerol como subproducto también es importante. El glicerol tiene una gran cantidad de aplicaciones industriales. Se ha hecho una estimación de acuerdo a que el costo del proceso de transesterificación se pagaría por sí mismo si se encuentran mercados adecuados para el glicerol. Bradshaw notó que el glicerol producido mediante alcoholólisis de grasas refinadas es anhidro y puede ser utilizado directamente sin necesidad de ser refinado [32].

La glicerina representa aproximadamente el 11% del total del biodiesel crudo producido [36]. Cerca del 90% de las plantas que producen Biodiesel no purifican la glicerina, la cual se encuentra en un grado de pureza entre el 30% y el 60%, el resto lo constituyen sales minerales, agua y compuestos inorgánicos provenientes del biodiesel. Los fabricantes de biodiesel se ven obligados a retener la glicerina y después retirarla como residuo o peor aún quemarla, lo que puede traer problemas ambientales adicionales [95]. Esto debido, a que el proceso actual para purificación de la glicerina, es la destilación, la cual es energéticamente demandante y consecuentemente costosa.

Min et al. 2010 [96], realizó un estudio sobre el empleo de la glicerina como fuente de energía en la dieta de aves de corral, empleándose glicerina obtenida como subproducto en la producción de biodiesel. En dicho estudio se concluyó que la glicerina de esta calidad puede ser una fuente aceptable de energía para este tipo de aves. Se debe recordar que la glicerina juega un papel crítico en el metabolismo del cuerpo celular. Si la calidad de la glicerina cruda puede ser controlada efectivamente y además en combinación con un costo moderado, esta puede sustituir a fuentes de energía convencionales tales como el maíz, grasas y aceites, incluyéndose además, una nueva fuente de energía en la dieta de alimentación de las aves de corral.

Giraldo et al. 2009 [97], estudiaron la síntesis de aditivos para mejorar las características del biodiesel a bajas temperaturas, lo que constituye el principal problema para su uso en regiones y en épocas donde la temperatura ambiente es baja. Dichos estudios se centraron en la producción de acetales y cetales a partir de modificaciones químicas de la glicerina. Los acetales y cetales son compuestos útiles para los combustibles, en tanto que mejoran sus propiedades de combustión ya que son compuestos oxigenados, lo que disminuye las emisiones y mejora las Propiedades de flujo a baja temperatura (PFTB). En la investigación se concluyó que la fase de glicerina de los procesos de obtención de biodiesel podría ser una fuente alternativa de materia prima para la producción de los cetales. Hecho que conduciría a mejorar la rentabilidad del proceso de producción del biodiesel, ya que se

emplearía un subproducto con alto volumen de producción. Sin embargo, se hace necesario adecuar esta glicerina para obtener mejores resultados.

Cárdenas et al. 2006 [98], evaluó la producción de 1,3-propanodiol (1,3-PD) a partir de glicerol USP y glicerol industrial proveniente del proceso de producción del Biodiesel. El 1,3-PD, es empleado en la producción de polímeros tipo polítrimetilentereftalatos (PTT) reconocidos por sus grandes cualidades de elasticidad. Estas propiedades son conocidas desde hace varias décadas, pero sus altos costos de producción dificultaron su entrada al mercado. A principios de los 90 se desarrolló una ruta biotecnológica basada en procesos fermentativos a partir del glicerol, que hizo posible la producción de PTT para aplicaciones de alto valor agregado. Adicionalmente, a su uso para el PTT, el 1,3-PD puede reemplazar a los glicoles tradicionales en la fabricación de otros sistemas poliméricos, mejorando la estabilidad térmica e hidrolítica sin que se vean afectadas otras propiedades claves, encontrando que este último (glicerol), podría ser usado para la producción de 1,3-PD a nivel industrial, mediante la optimización de las condiciones de fermentación. La transformación de este residuo en un producto rentable, podría dar valor agregado a la producción de biodiesel en Colombia.

### **3.2.11. Caracterización de la Materia Prima**

#### **3.2.11.1. Humedad**

Método gravimétrico que consiste en determinar indirectamente cantidad de humedad de una muestra alimenticia por medio de una diferencia de masa. El agua es el único ingrediente de los alimentos que está prácticamente presente en todos ellos y su cantidad, estado físico y dispersión en los alimentos afectan su aspecto, olor, sabor y textura. Los alimentos en general pueden considerarse integrados por dos fracciones primarias: su materia seca y cierta cantidad de agua o humedad; esta agua no está solamente adherida a la superficie de los alimentos sino que también se encuentra íntimamente asociada como tal a ellos y por tanto incorporada a su naturaleza y composición química [99,100].

#### **3.2.11.2. Cenizas**

Método gravimétrico que consiste en determinar indirectamente la materia inorgánica o cenizas en la muestra por medio de la destrucción de la materia orgánica después de incineración a  $525\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El concepto de residuo de incineración o de cenizas se refiere al residuo que queda tras la combustión (incineración) completa de los componentes orgánicos de un alimento en unas condiciones determinadas. Una vez que se eliminan otras posibles impurezas y partículas de carbono procedentes de una combustión incompleta, este

residuo se corresponde con el contenido en minerales del alimento. La determinación de las cenizas proporciona un índice que se utiliza junto con otros para caracterizar y evaluar la calidad del alimento en cuestión [101,102].

#### **3.2.11.3. Proteína**

El término proteína total se aplica a gran número de compuestos nitrogenados, clasificados como alimentos plásticos. Estructuralmente, son polímeros cuyas unidades básicas son aminoácidos, unidos por un enlace característico que recibe el nombre de enlace peptídico [99]. Como consecuencia de su estructura a base de aminoácidos individuales, el contenido en nitrógeno de las proteínas varía solo entre unos límites muy estrechos (15 a 18 %; en promedio 16%). Para la determinación analítica del contenido en proteína total o “proteína bruta”, se determina por lo general el contenido de nitrógeno tras eliminar la materia orgánica con ácido sulfúrico (método kjeldahl), calculándose finalmente el contenido de proteína con ayuda de un factor (en general  $F= 6,25$ ) [103,104].

#### **3.2.11.4. Grasa Total**

Método gravimétrico que tiene como objetivo determinar indirectamente el contenido de materia grasa en una muestra por medio de una extracción con solvente y posterior medida de la masa restante [105]. El término grasa total se refiere a las sustancias extraídas con solventes apolares que incluyen el grupo de nutrientes llamados lípidos y son todos los ésteres de los ácidos grasos con el glicerol a los fosfolípidos, las lecitinas, los esteroides, las ceras, los ácidos grasos libres, vitaminas liposolubles, etc [99].

#### **3.2.11.5. Fibra Bruta**

Método gravimétrico que consiste en la digestión ácido-alcalina de la muestra bajo condiciones específicas. La finalidad del método es la de eliminar las proteínas, carbohidratos solubles, residuos de grasas, vitaminas y otros compuestos diferentes que interfieren en su determinación; el fundamento del método es asemejar este proceso al que desempeña el organismo en su función digestiva [101,105]. La fibra bruta constituye un índice de las sustancias presentes en los alimentos de origen vegetal cuyo valor alimenticio es igual al del heno. Está constituida fundamentalmente por celulosa, lignina y pentosanas, suberina, cutina, alginatos, pectinas y otras estructuras celulares de los vegetales. Aunque la fibra no posee un valor nutritivo apreciable, su función en el tracto intestinal es la de aumentar el volumen de las materias nutritivas y estimular el peristaltismo intestinal [99].

### **3.2.12. Caracterización del Aceite Empleado para la Obtención del Biodiesel**

#### **3.2.12.1. Métodos Físicos**

##### **3.2.12.1.1. Densidad**

Es la medida del volumen que ocupa determinado peso del aceite y se expresa en g/ml según la Norma colombiana ICONTEC N.432. Grasas y Aceites Comestibles [106]. Es una constante que no varía mucho para un aceite determinado cuando está puro y fresco, pero es afectada por la edad, rancidez y cualquier tratamiento especial que se le haga al aceite [101].

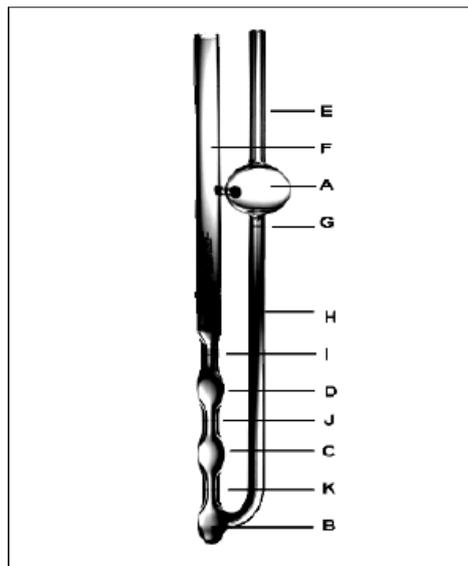
##### **3.2.12.1.2. Índice de Refracción**

Se define como el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción de la luz monocromática al pasar del aire a un medio ópticamente más denso y se denota  $n_D^t$ . El índice de refracción depende de la composición de la muestra, la temperatura y la longitud de onda de la radiación utilizada. Generalmente se mide a 20, 25 o 40 grados Celsius, tomando como referencia la línea D del sodio (589 nm), y se realizan como mínimo dos mediciones de donde se toma la media, por lo general con cuatro cifras decimales en un Refractómetro de Abbe. Su utilidad radica en casos como la identificación y caracterización de líquidos puros, grasas y aceites, entre otras [107].

##### **3.2.12.1.3. Viscosidad Cinemática**

Una propiedad general de un fluido (líquido o gas), es precisamente como su palabra lo indica, la característica que tiene un gas o un líquido a desplazarse cuando se le aplica a éste, una fuerza tangencial que produce un movimiento longitudinal en el mismo y a la cual, se le opone una fuerza proporcional al gradiente en la velocidad de flujo. Este fenómeno se conoce como viscosidad.

La norma ASTM D 445 es el método más sencillo para medir viscosidades. En este se utiliza un viscosímetro de Ostwald (tubo capilar calibrado mediante el cual se lleva a cabo la medición precisa del flujo entre dos puntos marcados en este) véase Figura 5. En este tipo de viscosímetros generalmente construidos en vidrio, se determina la viscosidad de un líquido, midiendo el tiempo de flujo ( $t$ ) de un volumen dado ( $V$ ) del líquido, entre dos puntos calibrados del tubo capilar, bajo la influencia de la gravedad [108].



**Figura 5. Viscosímetro de Ostwald.**

### **3.2.12.2. Métodos Químicos**

#### **3.2.12.2.1. Índice de Acidez**

El índice de acidez representa la cantidad en mg de hidróxido potásico necesaria para la neutralización de los ácidos grasos libres presentes en un gramo de grasa. El resultado de la titulación con álcali en presencia de fenolftaleína se puede expresar también como porcentaje de ácido oléico ( $C_{18}H_{34}O_2$ ) [109].

El índice de acidez es una medida del contenido en ácidos grasos libres presentes en grasas y ácidos grasos; además de los ácidos grasos libres, se determinan los ácidos minerales que pudiera haber. El conocimiento del contenido de ácidos grasos libres sirve como prueba de pureza y en ocasiones permite extraer conclusiones acerca del tratamiento o reacciones de degradación que se hayan producido [104].

#### **3.2.12.2.2. Índice de Saponificación**

El índice de saponificación (*IS*) representa la cantidad en miligramos de KOH necesaria para la saponificación de un gramo de aceite o grasa. El *IS* es una medida de los ácidos grasos libres y combinados que existen en la grasa y es directamente proporcional a su masa molecular media: cuanto menor sea la masa molecular media de los ácidos grasos presentes (es decir, cuanto mayor sea la proporción de ácidos grasos de cadena corta), tanto

mayor será el índice de saponificación. Se utiliza para comprobar la pureza de las grasas y aceites [104,110].

#### **3.2.12.2.3. Índice de Peróxidos**

Esta prueba es empleada para cuantificar la alteración del aceite causada por el enranciamiento, en el cual se determinan los miliequivalentes de oxígeno activo contenidos en un kilogramo de grasa, calculados a partir del yodo liberado del yoduro de potasio, operando en las condiciones especificadas. Las sustancias que oxidan al yoduro de potasio en las condiciones descritas, se consideran peróxidos u otros productos similares provenientes de la oxidación de las grasas, por lo cual el índice obtenido es considerado, con una aproximación bastante aceptable, como una expresión cuantitativa de los peróxidos de la muestra grasa. Este valor se expresa en miliequivalentes de peróxido por kilogramo de muestra y es aplicable a todas las sustancias grasas [104,111].

#### **3.2.12.2.4. Índice de Yodo**

El índice de yodo representa la cantidad en gramos de halógeno, referidas al yodo elemental, que resulta ligada por cada 100 g de grasa. El yodo se adiciona a los enlaces dobles de los ácidos insaturados cuantitativamente bajo condiciones controladas. El punto final se registra por la desaparición del complejo azul de yodo con el almidón. Esta determinación es quizá el mejor método para clasificar los aceites, pues permanece casi inalterable por ligeros cambios en el estado del mismo, además, permite caracterizar la muestra dando una base para saber si es pura o se encuentra mezclada [101]. El índice de yodo es una medida del grado de insaturación de los componentes de una grasa. Será tanto mayor cuanto mayor sea el número de dobles enlaces por unidad de grasa, utilizándose por ello, para comprobar la pureza y la identidad de las grasas. A la vez que los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados se determinan también las sustancias acompañantes insaturadas, por ejemplo, los esteroides [104,112].

#### **3.2.13. Caracterización de Metilésteres (Biodiesel)**

Para la determinación de los parámetros tanto físicos como químicos de los metilésteres (biodiesel) obtenidos, se realizarán algunos análisis que de igual manera se llevan a cabo en la caracterización de grasas y aceites.

### **3.2.13.1. Métodos Físicos**

#### **3.2.13.1.1. Densidad**

La densidad absoluta, también llamada densidad real, expresa la masa por unidad de volumen, depende tanto del estado en el que se encuentre el elemento como de la temperatura del mismo. La densidad se define como el cociente entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. Así, como en el sistema internacional la masa se mide en kilogramos (Kg) y el volumen en metros cúbicos ( $m^3$ ) la densidad se mide en kilogramos por metro cúbico ( $kg/m^3$ ) o en gramos por centímetro cubico ( $g/cm^3$ ) y da idea del contenido en energía del combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una mejor economía de combustible. Los límites establecidos por la norma NTC 5444 respecto a la densidad para el uso de biocombustibles en motores diesel debe estar entre (0,860 – 0,900) g/mL [113].

#### **3.2.13.1.2. Índice de Refracción**

Se tiene en cuenta el mismo fundamento teórico del numeral **3.2.12.1.2** previamente citado para grasas y aceites [107].

#### **3.2.13.1.3. Contenido de Agua**

Se define como la relación de la masa del agua presente en el biodiesel, o agua libre, y la masa dada de material respecto a su peso anhidro, expresada en tanto por ciento. Esta se determina por medio de una diferencia de peso después de haber puesto por tres horas y  $100^\circ C$  un determinado peso de la muestra [104,114]. El límite máximo establecido por la norma ASTM D203 es 0,0500 % [115].

El biodiesel puede absorber hasta 40 veces más agua que el diesel, la presencia de esta, hidroliza sus moléculas constituyentes (alquilésteres de ácidos grasos) causando su degradación, además de darle al combustible propiedades de lubricidad menores. El agua se puede presentar en el tanque de dos formas:

- Disuelta en el combustible: La cantidad de agua depende de la solubilidad de esta en el biodiesel.
- Separada de la fase de combustible en forma libre: La cantidad de esta depende de cómo se manipule y transporte el combustible.

Al hacer presencia el agua en el motor, esta puede provocar dos problemas de alta gravedad:

- Corrosión en los componentes del motor, generalmente herrumbre. El agua se acidifica y acaba atacando a los tanques de almacenamiento.
- Contribuye al crecimiento de microorganismos, Los cuales Forman lodos y limos que pueden colmatar los filtros. Además, algunos de estos microorganismos pueden convertir el azufre que posea el combustible en ácido sulfúrico, que corroe la superficie metálica del tanque [115].

#### **3.2.13.1.4. Viscosidad Cinemática**

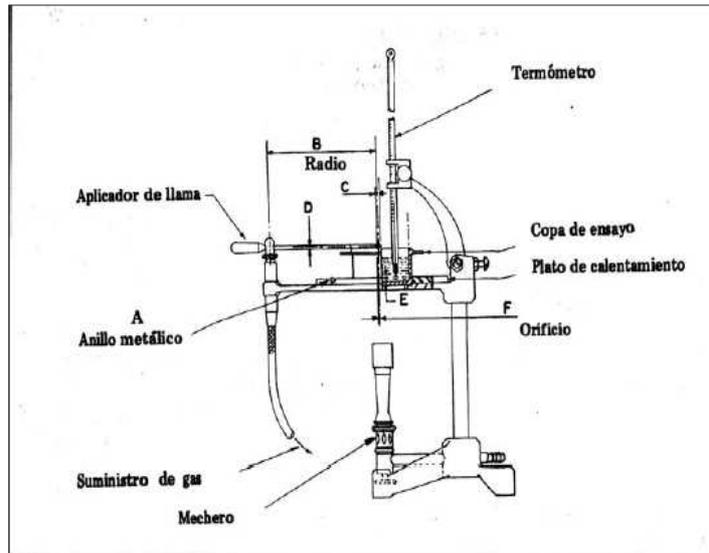
El fundamento teórico para el concepto de viscosidad cinemática es el mismo planteado para la caracterización del aceite de pollo utilizado (ver numeral **3.2.12.1.3**) [108].

El biodiesel debe poseer una viscosidad cinemática mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible. Por la otra parte también se limita la viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño de los motores, y en las características del sistema de inyección los límites para las normas EN ISO 3104, ISO 3105 son de 3,5 límite inferior y 5 límite superior mm<sup>2</sup>/s y en ASTM D 445 de 1.9 - 6 mm<sup>2</sup>/s [115].

#### **3.2.13.1.5. Punto de Inflamación**

Se define como la mínima temperatura a la cual los vapores originados en el calentamiento de una cierta cantidad de combustible se inflaman (encienden) al ponerse en contacto con la llama piloto de una forma determinada. Lo anterior, en lo que a combustibles líquidos se refiere. El punto de inflamación da una idea acerca de la cantidad de compuestos volátiles o muy volátiles que pueda tener un combustible.

Teniendo en cuenta el punto de inflamación se puede estimar cuáles serán las condiciones de almacenamiento de dicho combustible. Según como vayan a ser las condiciones de almacenamiento, el punto de inflamación se determina en vaso abierto Cleveland o en vaso cerrado Perski-Maters. Para esta investigación se determinó por medio del método de copa abierta de Cleveland (Ver figura 6) [116], utilizando el montaje que se muestra a continuación:



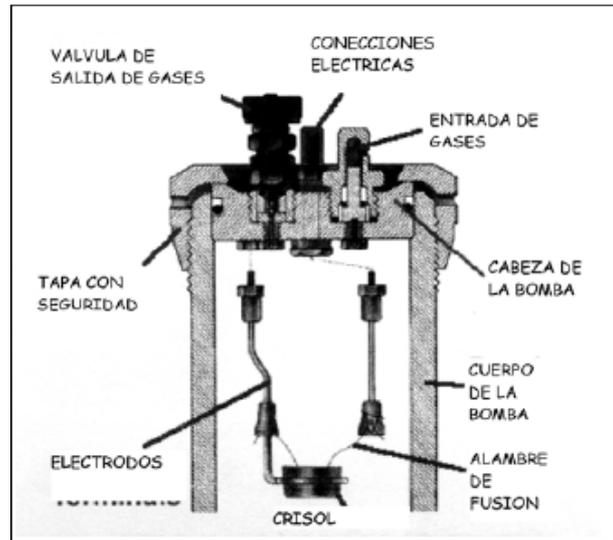
**Figura 6. Montaje copa abierta de Cleveland [116].**

Este parámetro generalmente se determina para satisfacer temas legales relacionados con la seguridad de las personas que manipulan los combustibles. También es útil para determinar la existencia de alguna cantidad excesiva de alcohol no reaccionado en el proceso de obtención. En el caso del biodiesel, para la norma EN ISO 3679 el límite mínimo es de 120 °C y para la norma ASTM D 93 es de 100 °C [115].

### **3.2.13.1.6. Calor de Combustión**

La unidad que se emplea para medir la cantidad de calor generada en la combustión, se la denomina poder calorífico. Se entiende por poder calorífico de un combustible, la cantidad de calor producida por la combustión completa de un kilogramo de esa sustancia. Tal unidad se mide en kJ/kg de combustible.

El poder calorífico se mide empleando la bomba calorimétrica [117], cuyo esquema se muestra a continuación:



**Figura 7. Esquema bomba calorimétrica.**

El límite mínimo establecido por la norma ASTM D240 para este parámetro es 39.500 kJ/kg.

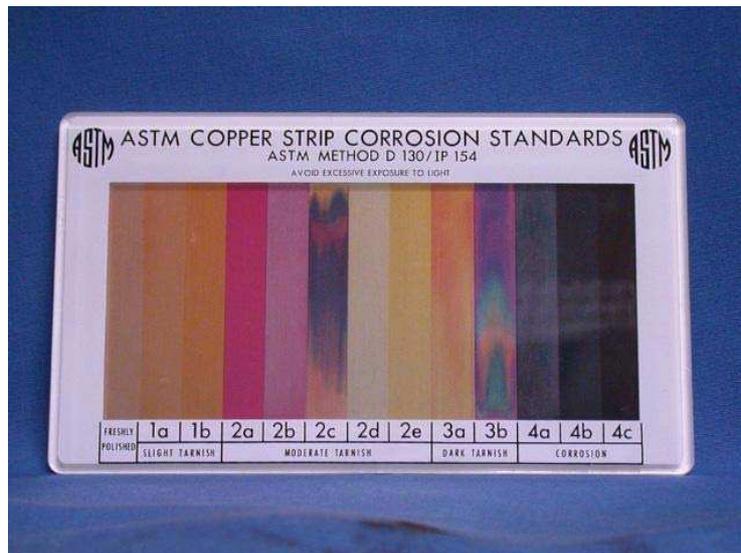
### **3.2.13.2. Métodos Químicos**

#### **3.2.13.2.1. Índice de Yodo**

Indica la tendencia a la oxidación del biodiesel, ya que está relacionado directamente con el grado de Insaturación que poseen sus ésteres alquílicos. El fundamento para su definición es el mismo referenciado en el numeral **3.2.12.2.4**, anteriormente citado para grasas y aceites [112]. Los límites máximos referentes al índice de yodo son para la norma europea EN 14111 y la americana ASTM D 5554 120 g Yodo/100g de muestra y 110 g Yodo/100g de muestra respectivamente.

#### **3.2.13.2.2. Corrosión a la Lámina de Cobre**

Este procedimiento se utiliza para determinar la acción corrosiva de los diferentes combustibles sobre algunas de las partes de los sistemas de inyección fabricadas en cobre. El ensayo consiste en introducir una tira de cobre pulido en una determinada cantidad de muestra, durante el tiempo (3 horas mínimo) y a la temperatura (100° C) especificados para el producto que se ensaya; al final de este período de tiempo, la tira de cobre se saca, se lava y se compara con las tiras patrón ASTM D130 que se muestran a continuación:



**Figura 8. Estándar ASTM D130**

Para la norma ASTM D130 el límite máximo es 3b (Clase 3b). Para la norma europea EN ISO 2160 el límite máximo es 1b (Clase 1b) en la escala mostrada [118]. La presencia de ácidos o de compuestos azufrados podría deteriorar la lámina de cobre, indicando así, la posibilidad de ataque corrosivo [119].

### **3.2.13.2.3. Contenido de Metales**

Cuando los combustibles son quemados, los metales presentes en ellos, pueden formar compuestos de bajo punto de fusión que son corrosivos para las partes metálicas [120]. De la misma manera, contribuyen al aumento del residuo carbonoso y de las cenizas, generando residuos inorgánicos parcialmente quemados. Adicionalmente, se pueden formar jabones que colmatan los filtros del combustible [115]. Por lo tanto, estos métodos de ensayo pueden ser utilizados para ayudar a determinar la calidad y el valor tanto del combustible como del aceite residual. La metodología para la determinación del contenido de sodio, potasio, calcio y magnesio, se describe en la norma ASTM D5863 que establece como límite máximo 5 mg/kg tanto para sodio y potasio como para calcio y magnesio en combinación. Estas pruebas se realizarán por medio de la técnica espectrofotométrica de absorción atómica (AA), método analítico utilizado para la determinación de pequeñas cantidades de algunos elementos químicos y que está basado en la absorción de energía de radiación por parte de átomos libres en fase gaseosa. Las muestras son introducidas generalmente como líquidos y se nebulizan por medio de la unidad atomizadora que produce una gran cantidad de átomos en estado fundamental que son alcanzados por una determinada radiación con el objetivo de que éstos absorban esa energía, lo cual genera una

señal que posteriormente se detecta y así, dicha energía puede ser medida por el espectrómetro de absorción atómica [120].

#### **3.2.13.2.4. Determinación Cualitativa y Cuantitativa de los Metilésteres Obtenidos por Medio de la Técnica Cromatografía de Gases acoplada a Masas (CG-EM).**

La norma que regula la determinación de este parámetro es la EN 14103 y establece como límite inferior 96,5 % (mol/mol) en contenido de ésteres.

- **Fundamento Teórico de la Técnica CG-EM.**

La cromatografía de gases (CG) es una técnica analítica utilizada para la separación de compuestos volátiles. En la cromatografía de gases la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica. La elución se produce por el flujo de una fase móvil, generalmente un gas inerte. A diferencia de la mayoría de los otros tipos de cromatografía, la fase móvil no interacciona con las moléculas del analito; su única función es la de transportarlo a través de la columna.

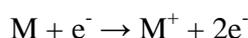
La cromatografía de gases a menudo se combina con otras técnicas selectivas como la espectroscopia y la electroquímica. En los primeros métodos acoplados, los gases efluentes de una columna cromatográfica, después de ser detectados por un detector no destructivo y no selectivo, se recogían como fracciones separadas en una trampa fría. La composición de cada una de las fracciones se investigaba por resonancia magnética nuclear, infrarrojo, o espectrometría de masas, o por medidas electroanalíticas.

CG-EM es el acrónimo más común para la técnica cromatografía de gases en la cual el cromatógrafo de gas es acoplado directamente a un módulo del espectrómetro de masa. Tanto el sistema cromatográfico como el espectroscópico se calientan entre (200 - 300°C), ambos trabajan con compuestos en estado gaseoso y ambos requieren pequeños tamaños de muestra (micro o nanogramos). CG y EM son muy compatibles, el único problema es que la presión atmosférica en la salida del CG debe ser reducida a un vacío de de 10<sup>-5</sup> a 10<sup>-6</sup> torr para la entrada al EM.

Ya en el espectrómetro de masas, las moléculas del analito deben ser primero ionizadas para ser atraídas (o repelidas) por un apropiado campo magnético o eléctrico. Existen numerosas técnicas de ionización, pero impacto electrónico (IE) es el más antiguo, común y simple. La fuente de ionización es calentada y bajo vacío la mayoría de las muestras son fácilmente vaporizadas e ionizadas.

Para el método de ionización por impacto electrónico, el “reactivo” que produce los compuestos iónicos es un haz de electrones enérgicos. Estos son calentados en un filamento incandescente, y viajan a través de la cámara de iones hasta un ánodo (trampa de iones) en el lado opuesto. El flujo de moléculas vaporizadas de la muestra entra a la fuente e interactúa con el flujo de iones para formar una variedad de productos, incluyendo los iones positivos.

Los electrones de alta energía golpean las moléculas neutras del analito, causando la ionización (usualmente pierde un electrón) y fragmentación. Esta técnica de ionización produce en su mayoría exclusivamente iones positivos:

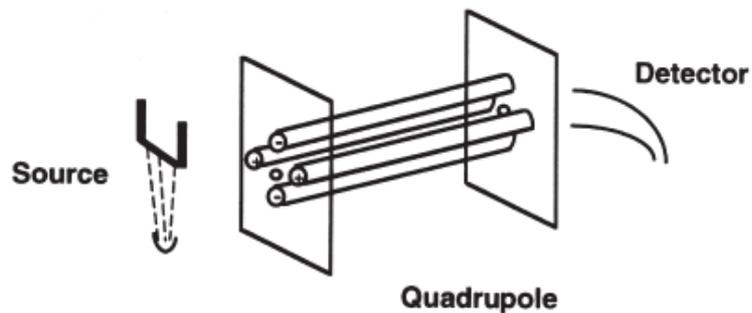


La espectroscopía de masa entonces, es uno de los detectores que brinda más información ya que provee información, tanto para la identificación de compuestos desconocidos (estructura, composición elemental y peso molecular), como para su cuantificación en las muestras. De esta manera el propósito básico de la espectrometría de masas es convertir la muestra en productos que son indicativos de la molécula original. Los productos formados son bastante raros: iones positivos, cuya masa y abundancias relativas son mostrados en el espectro de masa [121, 122, 123].

- **Analizadores y Detectores en Espectrometría de Masas**

Los analizadores típicos para CG-EM son cuadrupolos, trampas de iones o tiempo de trayectoria. Otros analizadores son los de enfoque de sector magnético simple y doble, éstos dan altas resoluciones pero son más costosos.

El analizador cuadrupolo de masa consiste en cuatro barras hiperbólicas con ángulo recto entre sí (ver figura 9). Un voltaje directo es aplicado a todas las barras (las barras adyacentes tienen signos opuestos) y rápidamente los signos del voltaje son invertidos. Los iones de los analitos son atraídos y repelidos rápidamente (nanosegundos) desde cada barra. Además, una frecuencia de radio es aplicada a las cuatro barras. Dependiendo de la combinación de la radiofrecuencia (RF) y de los potenciales de la corriente directa (DC), solo iones con una determinada relación masa-carga ( $m/z$ ) atraviesan las barras y alcanzan el detector. Iones con otras relaciones  $m/z$  son golpeados o succionados por el vacío. La relación RF/DC es modificada rápidamente para permitir que un intervalo secuencial de valores  $m/z$  pasen a través del filtro de masa, golpeando la superficie del detector y generando un espectro.



**Figura 9. Analizador de cuadrupolo.**

El analizador de cuadrupolo tiene ventajas relacionadas con su simplicidad, tamaño, costo moderado y rápido escaneo, lo cual lo hace ideal para el sistema CG-EM [121].

### **3.2.14. Evaluación del desempeño del biodiesel obtenido en un motor diesel en condiciones de vacío.**

El ralentí es el régimen mínimo de revoluciones por minuto a las que se ajusta un motor de combustión interna para permanecer en funcionamiento de forma estable sin necesidad de accionar un mecanismo de aceleración o entrada de carburante.

La opacidad es la capacidad que tienen las emisiones de gases de oponerse al paso de un haz de luz a una frecuencia determinada. La opacidad del humo es una medida indirecta del contenido de hollín que tienen las partículas diesel. El hollín tiende a oxidarse con la presencia del oxígeno en el cilindro, por lo que es de esperarse una disminución del porcentaje de la opacidad del humo en la medida que incrementa el porcentaje de biodiesel en la mezcla [144].

### **3.2.15. Análisis Estadístico**

#### **3.2.15.1. Media de la Muestra**

La media de la muestra es la media o promedio de un conjunto finito de datos. Como  $N$ , en este caso, es un número finito, la media de la muestra difiere, con frecuencia, de la media de la población, y, como consecuencia, difiere del verdadero valor de la cantidad medida. El promedio consiste en la suma de todas las medidas dividida por el número de medidas [124,125].

### 3.2.15.2. Desviación Estándar de la Muestra

La desviación estándar ( $s$ ) para una muestra de datos de un tamaño limitado viene dada por la ecuación:

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

La desviación estándar sirve para dar una interpretación precisa de las observaciones dentro de la distribución, ya que su magnitud esta expresada en términos de distancia, la cual representa la dispersión de cada valor de la variable respecto a un valor central [124,125].

### 3.2.15.3. Coeficiente de Variación

El coeficiente de variación permite estimar con claridad la tendencia al equilibrio o desequilibrio que presenta una medición individual o un conjunto de mediciones. Este valor se obtiene dividiendo la desviación estándar entre el promedio. Cuanto mayor es la cifra de variación más desequilibrio expresa. El coeficiente de variación es típicamente menor que uno pero para su mejor interpretación se lo expresa como porcentaje. A menor coeficiente de variación se considera que la distribución de la variable medida es más homogénea. La siguiente tabla permite una mejor interpretación de este parámetro [124,125]:

**Tabla 4. Interpretación del coeficiente de variación.**

Coeficiente de variación (%)	Interpretación
5<	Muy bueno
5-10	Bueno
10-15	Aceptable
15-25	Malo (utilizar con precaución)
>25	Malo (a desechar)

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. MUESTRA DE ANÁLISIS**

El residuo graso empleado en esta investigación a partir del cual se extrajo el aceite utilizado en la obtención del Biodiesel (figura 10), fue suministrado por la empresa INPRA LTDA. Este residuo es un subproducto procedente de las plantas de procesamiento (beneficio, desposte y desprese) de pollo de la región cafetera. El residuo graso crudo fue caracterizado por medio del análisis proximal mientras que al aceite extraído se le determinaron propiedades tanto físicas como químicas siguiendo las normas técnicas colombianas (NTC) establecidas.



**Figura 10. Residuos grasos de pollo.**

### **4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

A la materia prima cruda, se le realizaron cada una de las siguientes determinaciones por triplicado:

#### **4.2.1. Humedad**

Se determinó por triplicado de acuerdo con el método descrito en la NTC 529 [100].

#### **4.2.2. Cenizas**

Se determinó por triplicado de acuerdo con el método descrito en la NTC 4431 [102].

#### **4.2.3. Proteína**

Se determinó por triplicado de acuerdo con el método descrito en la NTC 1556 [103].

#### **4.2.4. Grasa Total**

Se determinó por triplicado de acuerdo con el método descrito en la NTC 1142 [105].

#### **4.2.5. Fibra Bruta**

Se determinó por triplicado de acuerdo con el método descrito en la NTC 668 [105].

### **4.3. EXTRACCIÓN DEL ACEITE**

La extracción del aceite se llevó a cabo por medio del método de extracción de grasas con agua en ebullición, en el cual, los residuos grasos son depositados en un recipiente de alta presión (olla express) con agua. Posteriormente, la mezcla resultante fue sometida a un calentamiento continuo de 3 horas. El aceite extraído se sometió a un proceso de limpieza y acondicionamiento para ser utilizado en la reacción de transesterificación.

### **4.4. LIMPIEZA DEL ACEITE EXTRAÍDO**

Después de terminada la etapa de extracción, la mezcla obtenida se filtró con ayuda de un colador, con el fin de separar los sólidos de mayor tamaño. Seguidamente se llevó a cabo la separación del agua y el aceite, utilizando embudos de separación. Finalmente el aceite obtenido, fue sometido a un proceso de centrifugación para eliminar el agua y los sólidos finos remanentes.

### **4.5. ACONDICIONAMIENTO DEL ACEITE LIMPIO**

El aceite anteriormente clarificado se trató con una solución de hidróxido de potasio al 0,01 %, con el objetivo de eliminar los ácidos grasos libres presentes en él.

## **4.6. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DEL BIODIESEL**

### **4.6.1. Análisis Físico del Aceite Extraído**

Al aceite extraído se le determinaron las siguientes propiedades físicas:

#### **4.6.1.1. Densidad**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ICONTEC N.432, [106].

#### **4.6.1.2. Índice de Refracción**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ICONTEC N.268, [107].

#### **4.6.1.3. Viscosidad Cinemática**

Se determinó por triplicado utilizando viscosímetro de Ostwald según el método descrito en la norma ASTM D 445, [108].

### **4.6.2. Análisis Químico del Aceite Extraído.**

Al aceite extraído se le determinaron las siguientes propiedades químicas:

#### **4.6.2.1. Índice de Acidez**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ICONTEC N.218, [109].

#### **4.6.2.2. Índice de Saponificación**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ICONTEC N.235, [110].

#### **4.6.2.3. Índice de Peróxidos**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ICONTEC N.236, [111].

#### **4.6.2.4. Índice de Yodo**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ICONTEC N.218, [112].

#### 4.7. Obtención del Biodiesel

La obtención de los metilésteres (Biodiesel) se llevó a cabo mediante la reacción de transesterificación alcalina con una relación molar 7:1 alcohol/aceite, empleando metanol e hidróxido de potasio como catalizador. La cantidad de catalizador adicionada fue del 1 % en masa, con relación a la cantidad de aceite empleado. La reacción se desarrolló bajo condiciones controladas de temperatura (65-70 °C) y agitación constante (300 rpm) durante 2 horas [2, 32, 80]. El montaje utilizado se muestra a continuación (figura 11):



**Figura 11. Montaje de reacción para la obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de pollo.**

#### 4.8. SEPARACIÓN Y LIMPIEZA DEL BIODIESEL OBTENIDO

Una vez finalizada la reacción de transesterificación, la mezcla resultante (biodiesel-glicerina) se trasladó a un embudo de separación, donde permaneció, hasta observarse una óptima separación entre las capas líquidas.

Posteriormente, el biodiesel separado (ver figura 12), fue sometido a lavados sucesivos con agua destilada previamente calentada hasta 45°C, en una cantidad equivalente al 10 % del volumen obtenido [61]. Finalmente, se empleó BIOSIL® (producto utilizado para la

limpieza del biodiesel a nivel industrial) para remover impurezas remanentes en el biocombustible.



**Figura 12. Lavado del biodiesel a partir de residuos grasos de pollo.**

## **4.9. CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL OBTENIDO**

### **4.9.1. Análisis Físico del Biodiesel Obtenido**

Al biodiesel obtenido se le realizaron los siguientes análisis físicos:

#### **4.9.1.1. Densidad**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ICONTEC N 432 [106].

#### **4.9.1.2. Índice Refracción**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ICONTEC N. 268 [107].

#### **4.9.1.3. Viscosidad Cinemática**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ASTM D 445 [108].

#### **4.9.1.4. Punto de Inflamación**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ASTM D 93 [116].

#### **4.9.1.5. Poder Calorífico**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ASTM D 240 [117].

#### **4.9.1.6. Contenido de Agua**

Se determinó por triplicado según la norma técnica colombiana ICONTEC N 254 para grasas y aceites [114].

#### **4.9.2. Análisis Químico del Biodiesel Obtenido**

Al biodiesel obtenido se le realizaron los siguientes análisis químicos:

##### **4.9.2.1. Índice de Yodo**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la Norma ICONTEC N.283 [112].

##### **4.9.2.2. Corrosión a la Lámina de Cobre**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ASTM D 130 [118].

##### **4.9.2.3. Contenido de Metales**

Se determinó por triplicado según el método descrito en la norma ASTM D 5863 [120].

#### 4.9.2.4. Determinación Cualitativa y Cuantitativa de los Metilésteres Obtenidos por medio de la Técnica Cromatografía de Gases acoplada a Masas (CG-EM).

La norma que regula la determinación de este parámetro es la EN 14103 y establece como límite inferior 96,5 % (mol/mol) en contenido de ésteres.

##### 4.9.2.4.1. Estándar

Se utilizó un estándar de 28 metilésteres de ácidos grasos en mezcla marca RESTEK, cuya concentración es 30 mg/mL y código de catálogo 35078. Los metilésteres presentes en el estándar y su concentración en él, se presentan en la figura 13.

NLEA FAME Mix (28 components)			
Chain	% by Weight	Chain	% by Weight
C4:0	1.5	C18:1( <i>trans</i> -9)	2.5
C6:0	1.5	C18:1( <i>cis</i> -9)	15.0
C8:0	2.0	C18:2( <i>all-trans</i> -9,12)	2.5
C10:0	2.5	C18:2( <i>all-cis</i> -9,12)	10.0
C11:0	2.5	C18:3( <i>all-cis</i> -9,12,15)	5.0
C12:0	5.0	C20:0	2.5
C13:0	2.5	C20:1( <i>cis</i> -11)	1.5
C14:0	2.5	C20:5( <i>all-cis</i> -5,8,11,14,17)	2.5
C14:1( <i>cis</i> -9)	1.5	C22:0	2.5
C15:0	1.5	C22:1( <i>cis</i> -13)	1.5
C16:0	10.0	C22:6( <i>all-cis</i> -4,7,10,13,16,19)	2.5
C16:1( <i>cis</i> -9)	5.0	C23:0	1.5
C17:0	2.5	C24:0	2.5
C18:0	5.0	C24:1( <i>cis</i> -15)	2.5

30mg/mL total in methylene chloride, 1mL/ampul  
cat. # 35078 (ea.)

**Figura 13. Composición química del estándar de metilésteres marca RESTEK Código 35078 (Tomado del catálogo RESTEK, referencias de materiales analíticos).**

Por medio del estándar mencionado se realizó la respectiva identificación y cuantificación de cada uno de los metilésteres de ácidos grasos presentes en la muestra de análisis (biodiesel), haciendo uso del cotejo de los tiempos de retención en ambas mezclas (estándar y biodiesel), así como de la normalización de áreas para el posterior cálculo de las concentraciones.

##### 4.9.2.4.2. Condiciones de Elución Utilizadas

En la tabla 5 se detallan las condiciones de elución usadas para garantizar la calidad del estándar.

**Tabla 5. Condiciones de elución**

<b>Tipo de columna</b>	FAMEWAX 30 m, 0,32 mm, 0,25 $\mu$ m.
<b>Gas transportador</b>	Flujo de Helio 40 cm/s
<b>Gradiente de temperatura</b>	Se mantiene en 80°C por 4 minutos. Se eleva hasta 240°C con un incremento de 3°C/min y allí se mantiene durante 10 minutos.
<b>Temperatura del inyector</b>	225°C
<b>Temperatura del detector</b>	240°C
<b>Tipo de detector</b>	masas

#### 4.9.2.4.3. Método instrumental utilizado

La identificación y cuantificación de los metilésteres, se realizó por medio de un cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas marca Shimadzu GCMS QP-2010. El método instrumental utilizado se configuró utilizando una columna FAMEWAX Restek de 30 m de longitud, 0,32 mm de diámetro interno y 0,25  $\mu$ m de espesor, helio como gas transportador a 40 cm/s, gradiente de temperatura mencionado en el numeral 4.9.2.4.2, temperatura de inyección de 225 °C, temperatura del detector de 240 °C, modo de inyección Split y modo de ionización por impacto electrónico (EI) para el detector de masas. La identificación se confirmó por medio del cotejo de espectros de masas relacionados en la Biblioteca Wiley, 7ª edición, 2003, instalada en el equipo.

#### 4.9.3. Evaluación del desempeño del biodiesel obtenido en un motor diesel en condiciones de vacío.

En el laboratorio de máquinas de combustión interna de la Universidad Tecnológica de Pereira se realizaron algunos ensayos relacionados con el desempeño del biodiesel producido a partir de residuos grasos de pollo, en un motor diesel monocilíndrico, de inyección directa, 3600 rpm y 442 cm<sup>3</sup> marca RUGGERINI serie RY 110 (ver figura 18). Los ensayos realizados consistieron en determinar la estabilidad del motor en funcionamiento normal y medición de la opacidad de los humos generados en la combustión. Dichas pruebas se realizaron empleando combustible puro (B100).

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA COMO RESIDUO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL

Los resultados obtenidos para la caracterización de la materia prima utilizada para la obtención de biodiesel y como residuo, se presentan a continuación:

#### 5.1.1. Humedad

**Tabla 6. Humedad del residuo graso de pollo**

Ensayo	Humedad (%)
1	14,03
2	13,82
3	15,01
Promedio	14,29
Desviación estándar	0,63
Coefficiente de variación (%)	4,41

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para la humedad del residuo graso. El valor promedio obtenido fue 14,29 %. Este valor varía en función del tratamiento y del almacenamiento del mismo, ya que para evitar la posible degradación de este residuo, debe ser almacenado a bajas temperaturas (congelado), ganando humedad. Sin embargo, dado que en el método seleccionado para la extracción del aceite del residuo graso, se utilizó agua en ebullición (ver numeral 4.3), el contenido de humedad de éste, tiene relevancia en el proceso de obtención del biodiesel, ya que el agua presente en el aceite extraído, podría reaccionar con el catalizador ocasionando pérdidas en el rendimiento de la transesterificación, además de hidrolizar los metilésteres formados en el caso de quedar remanente en la solución resultante.

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (4,41 %) y para la desviación estándar (0,63 %) en la medición de humedad, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de humedad con relación a un valor medio es baja.

### 5.1.2. Cenizas

**Tabla 7. Contenido de cenizas del residuo graso de pollo**

Ensayo	Cenizas (%)
1	0,1
2	0,1
3	0,1
<b>Promedio</b>	0,1
<b>Desviación estándar</b>	$1 \cdot 10^{-17}$
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	$1 \cdot 10^{-14}$

En la tabla 7 se observa el valor promedio obtenido para el contenido de cenizas del residuo graso, este valor fue del 0,1%, lo cual indica que en general hay poca presencia de minerales tales como, carbonatos provenientes de la materia orgánica [101]. Este parámetro no tiene influencia directa en el proceso para la obtención del biodiesel, sin embargo, puede llegar a influir en su calidad ya que algunos de estos minerales, tales como calcio y magnesio, podrían formar incrustaciones en el sistema de inyección de combustible.

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación ( $1 \cdot 10^{-14}$  %) y para la desviación estándar ( $1 \cdot 10^{-17}$  %) en la determinación del contenido de cenizas, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que además la dispersión entre los valores del % de cenizas con relación a un valor medio es muy baja.

### 5.1.3. Proteína

**Tabla 8. Contenido de proteína del residuo graso de pollo**

Ensayo	Proteína (%)
1	6,97
2	6,79
3	7,15
<b>Promedio</b>	6,97
<b>Desviación estándar</b>	0,18
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	2,58

Como se aprecia en la tabla 8, el valor promedio para el contenido de proteína del residuo graso fue 6,97%. Este resultado es concordante con los valores encontrados en la literatura para este tipo de cortes en cárnicos de aves de corral (5,4%) [126]. Este residuo es empleado comúnmente en la elaboración de concentrados para animales y como fuente de

nitrógeno para fertilizantes orgánicos [80]. Este parámetro no incide en el proceso de obtención del biodiesel ni en la calidad del mismo.

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (2,58 %) y para la desviación estándar (0,18 %) en la medición del contenido de proteína, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores en % de proteína con relación a un valor medio es baja.

#### 5.1.4. Grasa Total

**Tabla 9. Contenido de grasa de la materia prima**

<b>Ensayo</b>	<b>Grasa total (%)</b>
<b>1</b>	49,21
<b>2</b>	48,22
<b>3</b>	48,15
<b>Promedio</b>	48,53
<b>Desviación estándar</b>	0,593
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	1,22

La determinación de este parámetro se hizo según la norma NTC 1142, empleando hexano como solvente de extracción en un equipo Soxhlet. En la tabla 9 se muestra el resultado obtenido (48,53 %) para el contenido de grasa de la materia prima analizada (residuo graso de pollo). La cantidad de lípidos extraídos de un producto alimenticio depende del método de análisis usado, siendo la polaridad del solvente quizás el factor más importante en dicha extracción [126]. Este parámetro es de suma importancia para la obtención de biodiesel ya que da idea del contenido de aceite que está disponible en el residuo graso, para la reacción de transesterificación.

El aceite utilizado en la reacción de transesterificación fue extraído empleando agua en ebullición a presión elevada. Por medio de esta técnica se evita el uso de grandes cantidades de solventes orgánicos y puede someterse a extracción mayor cantidad de muestra.

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (1,22 %) y para la desviación estándar (0,593 %) en la medición del contenido de grasa, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de % de grasa con relación a un valor medio es baja.

### 5.1.5. Fibra Bruta

A pesar de que este parámetro no se aplica en alimentos de origen animal [104] se realizó su determinación con el objetivo de realizar una caracterización integral de los residuos grasos de pollo utilizados en este estudio, sin obtener resultados confiables.

### 5.1.6. Contenido de Proteína en la Materia Prima Desengrasada

**Tabla 10. Contenido de proteína de la materia prima desengrasada**

<b>Ensayo</b>	<b>Proteína (%)</b>
<b>1</b>	7,02
<b>2</b>	6,98
<b>3</b>	7,08
<b>Promedio</b>	7,03
<b>Desviación estándar</b>	0,05
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,71

Como se aprecia en la tabla 10, el valor promedio calculado para el porcentaje de proteína en el residuo desengrasado fue 7,03%. Se observa, que el contenido de proteína es ligeramente mayor al obtenido para el material graso (ver tabla 10). La importancia de la determinación de este parámetro radica en el aprovechamiento integral de los residuos grasos de pollo generados en la región cafetera, ya que además de extraérsele el aceite para la obtención de biodiesel, se adquiere información relevante para su potencial uso en industria agropecuaria (elaboración de concentrados para animales y producción de fertilizantes entre otros).

Un resultado similar se obtuvo en el estudio desarrollado por Narasimharao et al, 2009 [80], el cual sugiere el hecho de que el aumento del contenido proteico es consecuencia de la eliminación de la grasa, dando lugar a un residuo con mayor valor agregado (más saludable y con mayor contenido de nitrógeno) en la industria agropecuaria.

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (0,71 %) y para la desviación estándar (0,05 %) en la medición del contenido de proteína en la materia prima desengrasada, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de % de proteína con relación a un valor medio es muy baja.

## 5.2. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DEL BIODIESEL

## 5.2.1. Análisis Físico del Aceite Extraído

### 5.2.1.1. Densidad

La densidad se determinó por triplicado a 20 °C. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11:

**Tabla 11. Densidad del aceite extraído**

Ensayo	Densidad (g/mL) a 20°C
1	0,9328
2	0,9407
3	0,9290
<b>Promedio</b>	0,9342
<b>Desviación estándar</b>	0,0060
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,64

Como se observa en la tabla 11, el valor promedio obtenido para la densidad del aceite extraído fue 0,9342 g/mL a 15 °C. Un valor similar para este parámetro fue obtenido por Alptekin et al. 2010 (0.932 g/mL) [127] estudiando el mismo aceite utilizado en esta investigación.

Este parámetro influye notablemente en la calidad del biodiesel producido, ya que a mayor densidad en el aceite de partida, mayor será la densidad de los metilésteres (biodiesel) obtenidos. Si la mayoría de las cadenas de los ácidos grasos constituyentes de los triglicéridos (en el aceite) son largas (> C16), la densidad del biocombustible aumentará proporcionalmente, generándose así problemas de fluidez [84].

Con relación al coeficiente de variación (0,64 %) y a la desviación estándar (0,0060 g/mL) obtenidos en la medición de la densidad del aceite extraído, es preciso destacar la baja dispersión entre éstos valores con respecto al valor medio y la homogeneidad en la distribución de la variable medida.

### 5.2.1.2. Índice de Refracción ( $n_D^t$ )

El índice de refracción se determinó por triplicado a 25°C, empleando un refractómetro marca Fisher ABBE 3L. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 12:

**Tabla 12. Índice de refracción del aceite extraído**

Ensayo	$n_D^{25}$
1	1,4675
2	1,4680
3	1,4675
<b>Promedio</b>	1,4677
<b>Desviación estándar</b>	0,0003
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,02

Como se puede observar en la Tabla 12, el valor promedio obtenido experimentalmente para el índice de refracción del aceite de pollo fue 1,4677. Este parámetro no incide en la producción del biodiesel ni en sus propiedades. La determinación del índice de refracción se llevó a cabo con el objetivo de realizar una caracterización integral del aceite estudiado.

Con relación al coeficiente de variación (0,02 %) y a la desviación estándar (0,0003) obtenidos en la medición del índice de refracción del aceite extraído, es importante destacar la muy baja dispersión entre éstos valores con respecto al valor medio y la homogeneidad en la distribución de la variable medida.

### 5.2.1.3. Viscosidad

Este parámetro se determinó por triplicado a 40 °C utilizando un viscosímetro de OSTWALD referencia 350 A. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 13. Viscosidad del aceite extraído**

Ensayo	Viscosidad (mm <sup>2</sup> /s) a 40°C
1	42,9257
2	43,4489
3	43,7818
<b>Promedio</b>	43,3855
<b>Desviación estándar</b>	0,43156
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,99

Como se observa en la tabla 13, el valor promedio obtenido para la viscosidad del aceite de pollo fue 43,3855 mm<sup>2</sup>/s, el cual es menor frente al reportado por Alptekin et al. 2010 (59,20 mm<sup>2</sup>/s) [127] estudiando el mismo aceite utilizado en esta investigación. Este parámetro afecta directamente la calidad del biodiesel, ya que ésta depende directamente de la composición (longitud de las cadenas) de los triglicéridos en el aceite de partida, es decir,

a mayor viscosidad del aceite, más viscoso será el biocombustible producido, generándose así, pérdidas de potencia y disminución en la lubricidad del mismo.

Con relación al coeficiente de variación (0,99 %) y a la desviación estándar (0,43156 mm<sup>2</sup>/s) obtenidos en la medición de la viscosidad del aceite extraído, es importante destacar la baja dispersión entre éstos valores con respecto al valor medio y la homogeneidad en la distribución de la variable medida.

#### 5.2.1.4. Rendimiento de Extracción

Este procedimiento se llevó a cabo por triplicado. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14:

**Tabla 14. Rendimiento de extracción**

<b>Ensayo</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
<b>1</b>	64,9
<b>2</b>	64,6
<b>3</b>	64,5
<b>Promedio</b>	64,7
<b>Desviación estándar</b>	0,21
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,003

A continuación se presenta la expresión utilizada para calcular el rendimiento de extracción del aceite a partir de los residuos grasos de pollo:

$$\% \text{ Extracción} = \frac{(\text{Vol aceite} * \text{densidad del aceite})}{\text{masa del residuo graso}} * 100$$

Este método fue seleccionado debido a la cantidad de material graso que puede ser tratado por lote de extracción (aproximadamente 500 g por litro y medio de agua), ya que por medio de métodos convencionales (soxhlet), esta cantidad es muy limitada (alrededor de 100 g de muestra por litro de solvente), y para efectos de la producción de biodiesel y su caracterización, no es el más adecuado. Además, este procedimiento no requiere el uso de solventes orgánicos tales como hexano, éter de petróleo, entre otros, convirtiéndolo en un método verde (limpio) que contribuye a la disminución del impacto ambiental. Adicionalmente el resultado obtenido en este estudio es comparable al reportado en [126] (63,3 %) utilizando soxhlet como método de extracción para la misma materia prima.

En el desarrollo del proceso de extracción aplicado surgieron dificultades relacionadas con el montaje, puesto que tanto la presión como la temperatura al interior del recipiente utilizado (olla express) no pudieron ser monitoreadas (ver figura 14).



**Figura 14. Montaje empleado para la extracción del aceite a partir de residuos grasos de pollo.**

### 5.2.2. Análisis Químico del Aceite Extraído

La determinación de los siguientes parámetros químicos se realizó por triplicado obedeciendo la respectiva normatividad para cada análisis:

#### 5.2.2.1. Índice de Acidez

**Tabla 15. Acidez del aceite extraído**

Ensayo	Acidez (% ácido oléico)
1	0,355
2	0,356
3	0,374
<b>Promedio</b>	0,362
<b>Desviación estándar</b>	0,011
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	3,04

El valor promedio obtenido para el índice de acidez fue 0,362 % (g ácido oléico/100 g de aceite) (ver tabla 15). Este valor se encuentra dentro del intervalo recomendado (< 3 % en masa) para la obtención de biodiesel, utilizando catalizadores básicos homogéneos tales como hidróxido de sodio o potasio [2].

Las grasas brutas, sin refinar, presentan por lo general un índice de acidez de hasta 5 g de ácido oléico/100 g de aceite, mientras que para los aceites refinados suele ser menor a 0,2 [104].

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, es posible decir que el aceite analizado presenta bajos niveles de impurezas y que ha sufrido pocas reacciones de degradación ya que no ha sido sometido a tratamiento alguno [104]. Además, con relación al valor de índice de acidez obtenido para el aceite de pollo, se puede afirmar que presenta un bajo contenido de ácidos grasos libres, lo cual, es ventajoso para el proceso de transesterificación, ya que se minimiza la formación de jabones y agua que afectan tanto en la separación de la mezcla biodiesel/glicerina como en la hidrólisis y degradación del biocombustible. En cuanto a rendimientos de reacción, según [2, 35, 50, 80] se pueden lograr buenos resultados (> 90 %) con índices de acidez menores o iguales a 0,5 % en masa. Sin embargo, estos rendimientos pueden disminuir un 6 % con un aumento en el contenido de ácidos grasos libres a 5,3 % en masa.

Con relación al coeficiente de variación (3,04 %) y a la desviación estándar (0,011 % ácido oléico) obtenidos en la determinación del índice de acidez del aceite extraído, es significativo destacar la baja dispersión entre éstos valores con respecto al valor medio y la homogeneidad en la distribución de la variable medida.

### 5.2.2.2. Índice de Saponificación

**Tabla 16. Índice de saponificación del aceite extraído**

<b>Ensayo</b>	<b>mg de KOH/g de aceite</b>
<b>1</b>	170,80
<b>2</b>	170,93
<b>3</b>	171,09
<b>Promedio</b>	170,94
<b>Desviación estándar</b>	0,1453
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	0,09

El valor promedio obtenido para el índice de saponificación fue 170,94 mg KOH/g de aceite (ver tabla 16). Este parámetro es directamente proporcional a la masa molecular media de los ácidos grasos presentes en el aceite [104], por lo tanto no tiene relevancia alguna en el proceso de producción del biodiesel. Sin embargo, en cuanto a la calidad de éste, a medida que incrementa el promedio en la longitud de las cadenas de los ácidos grasos, se obtiene un biodiesel con mayor índice de cetano correlacionado con menores

emisiones de NO<sub>x</sub> según estudios realizados por Knothe et al., 2003 [128]; Lee et al., 1998 [129].

El índice de cetano es un parámetro de calidad relacionado con el retraso en el tiempo de ignición del motor y la calidad de combustión del biodiesel. Entre mas alto sea el índice de cetano (mín 47 según norma ASTM D613), se obtendrán mejores propiedades de ignición, mejor rendimiento del motor, mejor encendido en frio y reducción de humos blancos en la emisión [83].

Con relación al coeficiente de variación (0,09 %) y a la desviación estándar (0,1453 mg de KOH/g de aceite) obtenidos en la medición del índice de saponificación del aceite extraído, es importante destacar la baja dispersión entre éstos valores con respecto al valor medio y la homogeneidad en la distribución de la variable medida.

### 5.2.2.3. Índice de Peróxidos

**Tabla 17. Índice de peróxidos del aceite extraído**

Ensayo	meq de O <sub>2</sub> /Kg de aceite
1	2,576
2	2,586
3	2,520
<b>Promedio</b>	2,561
<b>Desviación estándar</b>	0,036
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	1,40

El índice de peróxidos (IPO) es un parámetro de gran importancia por que proporciona información acerca del grado de oxidación de la muestra analizada. Además, permite (con ciertas limitaciones) estimar hasta que punto se ha alterado la grasa o aceite estudiado [104].

En la tabla 17 se muestra el valor promedio obtenido para el IPO (2,561 meq O<sub>2</sub>/Kg aceite). Este valor se encuentra en el intervalo establecido para grasas y aceites vírgenes (0 - 5 meq O<sub>2</sub>/kg aceite). Sin embargo, a pesar de que el valor obtenido es bajo, debe considerarse que su estabilidad varía en función de su almacenamiento, exposición a la luz y al aire. De esta manera entre mas bajo sea el índice de peróxidos del aceite de partida, mayor será la estabilidad oxidativa del biodiesel obtenido, siempre y cuando se almacene en condiciones adecuadas (ambientes frescos, sin exposición directa a la luz y al aire).

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (1,40 %) y para la desviación estándar (0,036 meq de O<sub>2</sub>/Kg de aceite) en la medición del índice de peróxidos del aceite extraído, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de índice de peróxidos con relación a un valor medio es baja.

#### 5.2.2.4. Índice de Yodo

**Tabla 18. Índice de yodo del aceite extraído**

<b>Ensayo</b>	<b>g de I<sub>2</sub>/100 g de aceite</b>
<b>1</b>	105,63
<b>2</b>	104,97
<b>3</b>	105,38
<b>Promedio</b>	105,33
<b>Desviación estándar</b>	0,33
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	0,31

El valor promedio del índice de yodo para el aceite de pollo fue 105,33 g de I/100 g de aceite (ver tabla 18). De acuerdo a este valor, el aceite analizado se clasifica como “no secante” (IY < 110 g I<sub>2</sub>/100 g aceite), es decir, que ha reaccionado poco o nada con el oxígeno del aire para formar peróxidos.

Este parámetro influye directamente en la calidad del biodiesel obtenido, puesto que altos valores de índice de yodo en la materia prima de partida, pueden traducirse en una mayor tendencia a la oxidación (menor estabilidad oxidativa), contribuir a la formación de gomas (polimerización) en el motor y a la disminución en la lubricidad del mismo [84].

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (0,31 %) y para la desviación estándar (0,33 g de I<sub>2</sub>/100 g de aceite) en la medición del índice de yodo del aceite extraído, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores del índice de yodo con relación a un valor medio es baja.

### 5.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS METILÉSTERES OBTENIDOS (BIODIESEL)

#### 5.3.1. Análisis Físico del Biodiesel

##### 5.3.1.1. Densidad

**Tabla 19. Densidad del biodiesel obtenido.**

Ensayo	Densidad (g/mL) a 15°C
1	0,8737
2	0,8769
3	0,8769
<b>Promedio</b>	0,8758
<b>Desviación estándar</b>	0,0018
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,21
<b>Biodiesel grasa de pollo [130]</b>	0,8830

El valor promedio calculado para la densidad del biodiesel fue 0.8758 g/mL (ver tabla 19), el cual se encontró dentro de los límites establecidos por la norma NTC 5444 (0,860 – 0,900) g/mL, para el uso de biocombustibles en motores diesel. Este valor es comparable al obtenido por Canakci et al. 2010 [130] para el biodiesel a partir de grasa de pollo (0,8830 mg/mL). La densidad refleja las propiedades de los compuestos químicos (metilésteres) componentes del biodiesel, además, de proporcionar información acerca del contenido de energía del combustible, es decir, mayores densidades indican mayor energía térmica y una mejor economía de combustible [115].

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (0,21 %) y para la desviación estándar (0,0018 g/mL) en la determinación de la densidad del biodiesel obtenido, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de densidad con relación al valor medio es muy baja.

### 5.3.1.2. Índice de Refracción

**Tabla 20. Índice de refracción del biodiesel obtenido.**

<b>Ensayo</b>	<b><math>n_D^{25}</math></b>
<b>1</b>	1,4515
<b>2</b>	1,4520
<b>3</b>	1,4515
<b>Promedio</b>	1,4517
<b>Desviación estándar</b>	0,0003
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,02

Este parámetro no está incluido en la normatividad vigente que regula la calidad de este tipo de biocombustible. Sin embargo, se llevó a cabo como un parámetro de caracterización (ver tabla 20), ya que proporciona información útil para compararlo con biodiesel elaborado a partir de otras fuentes animales o mediante diferentes procedimientos de obtención.

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (0,02 %) y para la desviación estándar (0,0003) en la determinación del índice de refracción del biodiesel obtenido, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de índice de refracción con relación al valor medio es muy baja.

### 5.3.1.3. Contenido de Agua

**Tabla 21. Contenido de agua del biodiesel obtenido**

<b>Ensayo</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>1</b>	0,1986
<b>2</b>	0,1738
<b>3</b>	0,1985
<b>Promedio</b>	0,1903
<b>Desviación estándar</b>	0,0143
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	7,50
<b>Biodiesel grasa de pollo [80]</b>	0,0188
<b>Biodiesel grasa vacuna [21]</b>	0,2360

El valor promedio obtenido para la humedad del biodiesel fue 0,1903 % (ver tabla 21). Dicho valor se encuentra por encima del valor máximo establecido por la norma ASTM D203 (0,0500 %), situación que puede favorecer la proliferación microbiana, participar en

la formación de emulsiones, causar corrosión del tanque e hidrólisis u oxidación hidrolítica al biodiesel producido. El alto contenido de agua en el biodiesel obtenido se debe principalmente al técnica aplicada para la extracción del aceite utilizado en producción del mismo (agua en ebullición a presión elevada).

Este contenido de agua en el biodiesel debe ser eliminado mediante evaporación de la misma, de lo contrario se pueden presentar grandes inconvenientes, tales como, disminución en el calor de combustión y corrosión a las partes metálicas de los sistemas de inyección, válvulas, entre otras [115, 132].

Este valor es comparable al reportado en [21] para biodiesel de grasa vacuna (0,2360 %), ya que a pesar de tener naturalezas distintas, se empleó el mismo método de extracción (agua en ebullición) y de transesterificación. Por el contrario, el valor obtenido dista considerablemente del reportado por Narasimharao et al. 2009 [80] (0,0188 %), ya que en dicho estudio se emplea un método de extracción de grasa con agua a 70 ° C durante 20 min bajo condiciones atmosféricas (temperatura y agitación controladas).

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (7,50 %) y para la desviación estándar (0,0143 %) en la determinación del contenido de agua en el biodiesel obtenido, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de % de humedad con relación al valor medio es baja.

#### 5.3.1.4. Viscosidad Cinemática

**Tabla 22. Viscosidad cinemática del biodiesel obtenido**

Ensayo	Viscosidad (mm <sup>2</sup> /s) a 40°C
1	4,4607
2	4,6356
3	4,5189
<b>Promedio</b>	4,5384
<b>Desviación estándar</b>	0,0891
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	1,96
<b>Biodiesel grasa de pollo [149]</b>	4,9400

La viscosidad del biodiesel puede variar dentro de un intervalo muy amplio dependiendo de la clase de ácidos grasos a partir de los cuales se haya producido, es decir, incrementa a medida que aumenta la longitud de la cadena carbonada y el grado de saturación en la misma [82,133].

El resultado promedio calculado para el biodiesel a partir de grasa de pollo fue 4,5384 mm<sup>2</sup>/s (ver tabla 22), el cual se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma ASTM D445 (1,9 - 6,0 mm<sup>2</sup>/s), situación favorable para el biodiesel obtenido en este estudio, ya que viscosidades que sobrepasen el límite superior (6 mm<sup>2</sup>/s), pueden ocasionar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección, poca lubricidad y depósitos en el sistema de inyección de combustible, así como combustiones incompletas y mayores emisiones de humos [115,134]. Además, el valor obtenido es comparable al reportado por Canakci et al. 2010 [130] (4,9400 mm<sup>2</sup>/s) para la misma materia prima.

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (1,96 %) y para la desviación estándar (0,0891 mm<sup>2</sup>/s) en la determinación de la viscosidad del biodiesel obtenido, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de viscosidad con relación al valor medio es baja.

### 5.3.1.5. Punto de Inflamación

**Tabla 23. Punto de inflamación del biodiesel obtenido**

Ensayo	Punto de inflamación (°C)
1	178
2	178
3	177
<b>Promedio</b>	178
<b>Desviación estándar</b>	1
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,32
<b>Biodiesel grasa de pollo [149]</b>	171,8
<b>Diesel comercial # 2 [77]</b>	73

El valor promedio obtenido para el punto de inflamación del biodiesel producido fue 178 °C (ver tabla 23), el cual se sitúa por encima del valor mínimo establecido por la norma ASTM D 6751-02 (120 °C), condición que le otorga ventajas frente al diesel comercial relacionadas con requisitos legales y medidas de seguridad involucradas en el manejo y almacenamiento del combustible [119]. Además, la determinación del punto de inflamación está relacionada con el contenido de metanol residual, pues cantidades muy pequeñas de este alcohol reducen notablemente este parámetro. El metanol puede afectar los equipos de bombeo del combustible, sellos y empaques, además de generar problemas de lubricidad. Con un punto de ignición mayor a 130°C se asegura que el metanol está por debajo del 0,2% en peso [135].

El valor obtenido (178 °C) es comparable al reportado por Canakci et al. 2010 [130] (171,8 °C) en su estudio sobre biodiesel a partir de grasa de pollo.

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (0,32 %) y para la desviación estándar (1 °C) en la determinación del punto de inflamación del biodiesel obtenido, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de dicho parámetro con relación al valor medio es relativamente baja.

### 5.3.1.6. Calor de Combustión

**Tabla 24. Calor de combustión del biodiesel obtenido**

<b>Ensayo</b>	<b>Calor de combustión (kJ/kg)</b>
<b>1</b>	-51707,68
<b>2</b>	-52481,12
<b>3</b>	-52878,85
<b>Promedio</b>	-52355,88
<b>Desviación estándar</b>	595,54
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	1,13
<b>Biodiesel grasa de pollo [149]</b>	-40173,00

El valor promedio calculado para el calor de combustión fue -52355,88 kJ/kg (ver tabla 24), el cual cumple satisfactoriamente el límite mínimo establecido por la norma ASTM D240 (39 500 kJ/kg) [119]. Lo anterior indica que con el uso del biocombustible obtenido en este estudio, se pueden evitar tanto pérdidas de potencia en el motor como mayor consumo del mismo, además de disminuir el tiempo de encendido del motor [136].

El valor obtenido en esta investigación (-52355,88 kJ/kg) es superior al reportado por Canakci et al. 2010 [130] (-40173,00 kJ/kg) para el biodiesel a partir de grasa de pollo. Esta discrepancia puede deberse a la diferencia en la composición química de las materias primas utilizadas, ya que a pesar de ser la misma, se originaron en diferentes latitudes (clima, altura, etc) y con diferentes hábitos alimenticios en las aves de corral. El calor de combustión incrementa su valor a medida que aumenta la longitud de la cadena carbonada [82].

Otro factor que pudo interferir en la determinación de este parámetro es el marcado desgaste del equipo (bomba calorimétrica) utilizado en este estudio. Sin embargo, el calor de combustión determinado está dentro del intervalo esperado para ésteres grasos y

triacilglicerol con cadenas carbonadas de entre 8 y 22 átomos (5439,2 kJ/mol - 14644 kJ/mol).

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (1,13 %) y para la desviación estándar (595,54 kJ/kg) en la determinación del calor de combustión del biodiesel obtenido, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de dicho parámetro con relación al valor medio es relativamente baja.

### 5.3.2. Análisis Químico del Biodiesel Obtenido

#### 5.3.2.1. Índice de Yodo

**Tabla 25. Índice de yodo del biodiesel obtenido**

Ensayo	g de I <sub>2</sub> /100 g de biodiesel
1	91,76
2	90,67
3	91,17
<b>Promedio</b>	91,20
<b>Desviación estándar</b>	0,546
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	0,60
<b>Biodiesel grasa de pollo [50]</b>	130,0

El valor promedio calculado para el índice de yodo fue 91,20 g de I<sub>2</sub>/100 g de Biodiesel (ver tabla 25), el cual se sitúa por debajo del valor establecido por la normatividad europea (EN 14214), la cual especifica 120 g de I<sub>2</sub>/100 g de Biodiesel, como límite máximo para este parámetro.

El valor obtenido en este estudio (91,20 de I<sub>2</sub>/100 g de Biodiesel) difiere del reportado por Bhatti et al [50] para residuos grasos de pollo (130 g de I<sub>2</sub>/100 g de Biodiesel). Esta diferencia puede deberse tanto al origen (clima, altura y alimentación de las aves de corral) de los residuos grasos utilizados en cada investigación, como al tiempo transcurrido desde la extracción del aceite hasta la obtención del biocombustible, etapas en las cuales este parámetro se ve afectado por la luz, el calor y el oxígeno del aire [50].

Lo anterior sugiere que el biodiesel obtenido en este estudio, a partir de grasa de pollo tiende a oxidarse con mayor facilidad, disminuyendo su estabilidad ya que este parámetro está relacionado directamente con el grado de insaturaciones o dobles enlaces presentes en las cadenas metílicas [137].

Es importante que el biocombustible obtenido en esta investigación no haya sobrepasado el límite máximo establecido por la norma EN 14214 (120 g de I<sub>2</sub>/100 g de Biodiesel) para este parámetro, ya que según Sulisty et al 2009, altos valores de este índice afectan las propiedades físicas del biodiesel, tales como el punto de nube, el punto de fluidez, entre otros [49]. Lo anterior se debe a que cuando se calienta el biodiesel puede producirse polimerización de glicéridos, favoreciendo la formación de depósitos o el deterioro del aceite lubricante [138].

De acuerdo con el valor obtenido para el coeficiente de variación (0,60 %) y para la desviación estándar (0,546 g de I<sub>2</sub>/100 g de biodiesel) en la determinación del punto de inflamación del biodiesel obtenido, puede decirse que la distribución de la variable medida es homogénea y que la dispersión entre los valores de dicho parámetro con relación al valor medio es relativamente baja.

### **5.3.2.2. Corrosión a la Lámina de Cobre**

La siguiente imagen muestra la lámina de cobre después de ser sometida a la prueba. Como se puede observar, ésta no fue deteriorada por el biodiesel obtenido en esta investigación.



**Figura 15. Lámina de cobre después de la prueba**

En la figura 15 puede observarse el resultado obtenido para el ensayo de la corrosión a la lámina de cobre. Este resultado fue comparado con la tirilla patrón ASTM D130 (ver figura 8) determinándose la clasificación 1a para el biodiesel analizado en este estudio. El mismo resultado fue obtenido por Canakci et al. 2010 [130] (clase 1a) para biodiesel a partir de residuos grasos de pollo (ver tabla 26).

**Tabla 26. Resultado y comparación corrosión a la lámina de cobre.**

Tipo de combustible	Grado de corrosión
Biodiesel grasa de pollo [este estudio]	Clase 1a
Biodiesel grasa de pollo [149]	Clase 1a

La clasificación obtenida en esta prueba (clase 1a) para el biodiesel a partir de residuos grasos de pollo no sobrepasa el límite máximo establecido por la norma ASTM D130 (clase 3b, ver figura 8). Lo anterior evidencia la ausencia de sustancias corrosivas tales como ácidos o compuestos azufrados que pueden deteriorar algunas partes de los sistemas de inyección de combustible fabricadas en cobre, latón o bronce [119]. El cobre o el bronce normalmente no se corroen por el biodiesel pero este combustible puede degradarse y producir sedimentos en contacto prolongado con estos materiales [135].

### 5.3.2.3. Contenido de Metales.

En la tabla 27 se presentan las concentraciones de dos de los metales alcalinos analizados, que se nombran en la norma ASTM D5863 para biodiesel:

**Tabla 27. Contenido de potasio y magnesio en el biodiesel obtenido a partir de residuos grasos de pollo.**

Metal	Técnica	Concentración (mg/kg)	Límite de detección (mg/kg)
Potasio	Absorción atómica,	2,713	0,012
Magnesio	llama acetileno-aire	0,225	0,003

La norma ASTM D5863 establece como máximo contenido de sodio y potasio 5 mg/Kg. De igual manera se estipula este mismo límite para calcio y magnesio. No se realizó la determinación de sodio y calcio debido a inconvenientes relacionados con el método utilizado. Sin embargo, se midió el contenido de potasio y magnesio, encontrándose que ambos están dentro del intervalo establecido por dicha norma (ver tabla 27). Además, se determinó el contenido de algunos metales pesados de importancia ambiental.

Los resultados obtenidos para el contenido de potasio y magnesio en el biodiesel analizado en esta investigación son benéficos, ya que metales como los alcalinos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ ) en cantidades elevadas ( $> 5 \text{ mg/Kg}$ ), contribuyen al aumento del residuo carbonoso y a las cenizas de manera notable, generando residuos inorgánicos parcialmente quemados que junto a la posible formación de jabones, pueden colmatar los filtros del combustible y generar inconvenientes relacionados al flujo y a la limpieza de éste [119,139].

#### 5.3.2.4. Rendimiento de Reacción

Rendimiento teórico:

$$100 \text{ mL aceite} * \frac{0,9322 \text{ g aceite}}{1 \text{ mL aceite}} * \frac{1 \text{ mol aceite}}{857 \text{ g aceite}} * \frac{3 \text{ moles éster}}{1 \text{ mol aceite}} * \frac{286,67 \text{ g éster}}{1 \text{ mol éster}} * \frac{1 \text{ mL Biodiesel}}{0,8758 \text{ g éster}} = 106,81 \text{ mL Biodiesel}$$

Rendimiento experimental: 100 mL

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Dato experimental}}{\text{Dato teórico}} = \frac{100 \text{ mL}}{106,81 \text{ mL}} * 100 = 93,62 \%$$

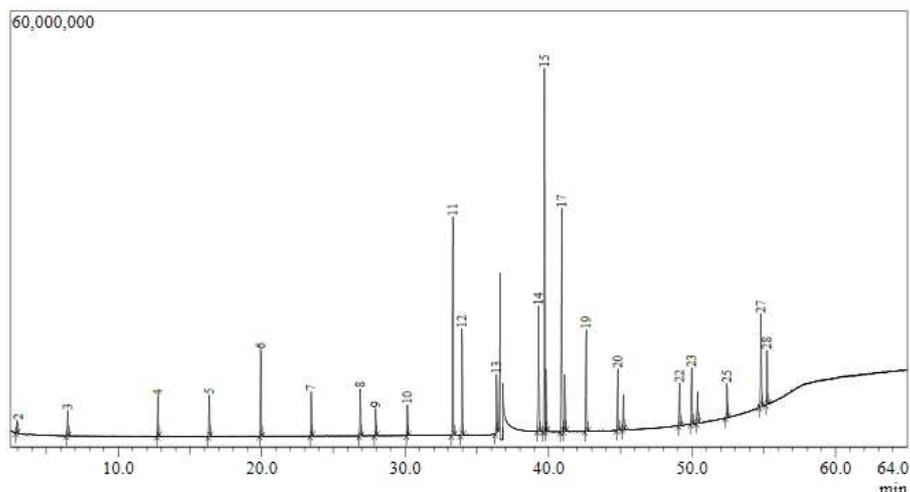
#### 5.3.2.5. Determinación cualitativa y cuantitativa de los metilésteres obtenidos por medio de la técnica cromatografía de gases acoplada a masas (CG-EM).

La determinación cualitativa y cuantitativa de los metilésteres (biodiesel) obtenidos a partir del aceite de pollo, se realizó por comparación con un estándar de concentración conocida (100 mg/L), basándose para su identificación, tanto en el detector de masa utilizado como en los tiempos de retención de cada uno de los analitos presentes en la muestra analizada. Por otra parte, para la determinación de las concentraciones se empleó la normalización de áreas en cada uno de los picos encontrados.

Las condiciones de elución empleadas fueron las especificadas por el fabricante para lograr un buen desempeño tanto del estándar como de la muestra analizada (ver 4.9.2.4.2).

La muestra de biodiesel analizada se diluyó sucesivamente en Diclorometano (grado HPLC) con un factor de 400 (50 µL de muestra en 950 µL de Diclorometano cada vez).

A continuación se presentan los cromatogramas obtenidos tanto para el estándar de metilésteres (Figura 16) como para el biodiesel producido a partir de aceite de pollo (Figura 17):



**Figura 16. Cromatograma estándar metilésteres.**

**Tabla 28. Compuestos identificados en el estándar de metilésteres.**

Quantitative Result Table

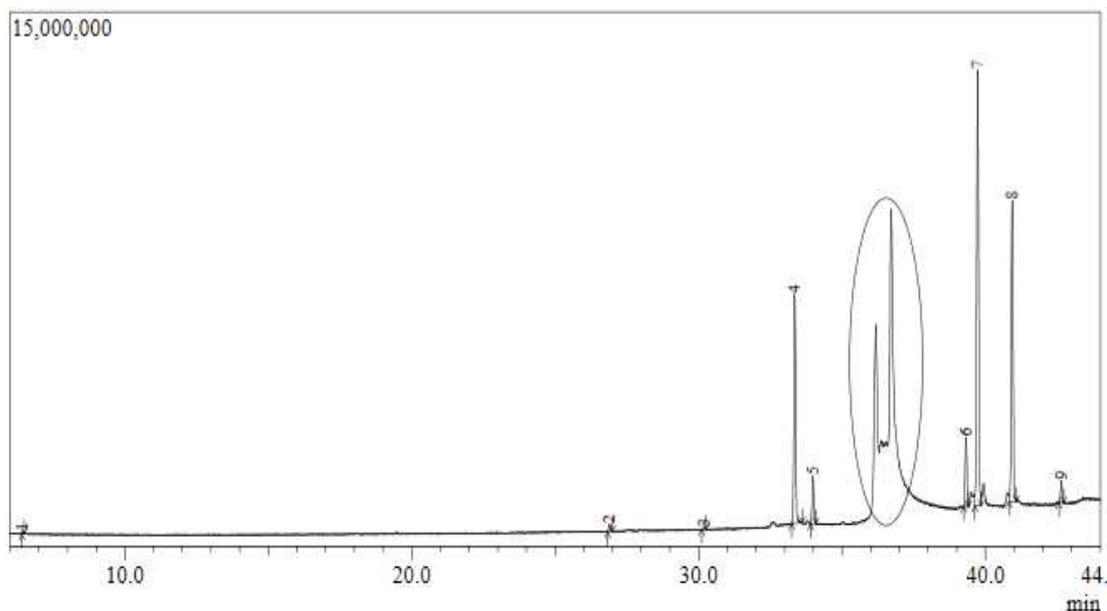
ID#	Name	R.Time	Area	% Area
1	Methyl butyrate	-	---	N.D.(W/B)
2	Hexanoic acid, methyl ester	2.947	2046901	1.338
3	Octanoic acid, methyl ester	6.479	3863221	2.526
4	Decanoic acid, methyl ester	12.773	5520098	3.610
5	Undecanoic acid, methyl ester	16.347	5629462	3.681
6	Methyl laurate	19.938	11403884	7.457
7	Tridecanoic acid, methyl ester	23.461	5800229	3.793
8	Methyl myristate	26.873	6058649	3.962
9	Methyl myristoleate	27.949	1718398	1.124
10	Pentadecanoic acid, methyl ester	30.157	3701602	2.420
11	Methyl palmitate	33.328	26135625	17.090
12	Methyl palmitoleate	33.965	3073606	2.010
13	Heptadecanoic acid, methyl ester	36.365	6614690	4.325
14	Methyl stearate	39.298	13801526	9.025
15	Methyl oleate	39.714	17910366	11.711
16	Methyl elaidate	39.811	1354522	0.886
17	Methyl linoleate	40.916	10864145	7.104
18	Methyl linoelaidate	41.135	2764259	1.808
19	Methyl linolenate	42.624	3857859	2.523
20	Methyl arachidate	44.830	6190988	4.048
21	Methyl eicosenoate	45.210	797109	0.521
22	Methyl eicosapentaenoate	49.127	1315681	0.860
23	Methyl behenate	49.976	5354471	3.501
24	Methyl erucate	50.383	965808	0.632
25	Methyl tricosanoate	52.428	3152350	2.061
26	Methyl lignocerate	-	---	N.D.(Ref)
27	Methyl docosahexaenoate	54.801	1335172	0.873
28	Methyl nervonate	55.223	1701728	1.113

De los 28 analitos listados según el proveedor del estándar, con las condiciones de análisis empleadas se logró separar e identificar 26 de éstos (ver Tabla 28). No fue posible la

separación e identificación del butirato de metilo (C4:0) debido a que la línea base presentó señales entre los 0 y 2 minutos, lo suficientemente agudas como para ocultar (solapar) el pico correspondiente a dicho compuesto. Por otra parte, el lignocerato de metilo no fue detectado, posiblemente por a la alta señal de fondo registrada por el equipo, la cual generó interferencia y no permitió identificar la presencia de este.

Como se puede observar en la figura 16, el análisis cromatográfico para el estándar de metilésteres evidencia en términos generales, una buena separación y resolución entre los compuestos identificados, excepto por encima de los 50 minutos donde se observa una deriva en la línea base debida posiblemente a la temperatura del detector.

En la figura 17 se muestran los metilésteres identificados en el biodiesel obtenido a partir de aceite de pollo y a los 35 minutos se puede observar una señal interferente correspondiente a compuestos poliméricos (ftalatos), que provienen posiblemente de la degradación térmica de algunos empaques en el puerto de inyección. No obstante se lograron identificar 9 compuestos entre los cuales se presenta buena resolución y separación.



**Figura 17. Cromatograma biodiesel a partir de aceite de pollo.**

Los metilésteres identificados en el biodiesel obtenido a partir de residuos grasos de pollo se muestran en la tabla 29.

**Tabla 29. Metilésteres identificados en el biodiesel obtenido a partir de grasa de pollo.**

Quantitative Result Table

ID#	Name	R.Time	Area	% Area
1	Methyl butyrate	-	---	N.D.(W/B)
2	Hexanoic acid, methyl ester	-	---	N.D.(W/B)
3	Octanoic acid, methyl ester	6.435	150932	0.119
4	Decanoic acid, methyl ester	-	---	N.D.(Ref)
5	Undecanoic acid, methyl ester	-	---	N.D.(Ref)
6	Methyl laurate	-	---	N.D.(Ref)
7	Tridecanoic acid, methyl ester	-	---	N.D.(Ref)
8	Methyl myristate	26.895	845002	0.666
9	Methyl myristoleate	-	---	N.D.(Ref)
10	Pentadecanoic acid, methyl ester	30.192	148446	0.117
11	Methyl palmitate	33.351	26927448	21.214
12	Methyl palmitoleate	33.986	5511081	4.342
13	Heptadecanoic acid, methyl ester	-	---	N.D.(Ref)
14	Methyl stearate	39.324	7774669	6.125
15	Methyl oleate	39.729	48366430	38.104
16	Methyl elaidate	-	---	N.D.(Ref)
17	Methyl linoleate	40.936	34959086	27.541
18	Methyl linoelaidate	-	---	N.D.(Ref)
19	Methyl linolenate	42.648	2250899	1.773
20	Methyl arachidate	-	---	N.D.(Ref)
21	Methyl eicosenoate	-	---	N.D.(Ref)
22	Methyl eicosapentaenoate	-	---	N.D.(Ref)
23	Methyl behenate	-	---	N.D.(Ref)
24	Methyl erucate	-	---	N.D.(Ref)
25	Methyl tricosanoate	-	---	N.D.(Ref)
26	Methyl lignocerate	-	---	N.D.(Ref)
27	Methyl docosahexaenoate	-	---	N.D.(Ref)

La determinación de las concentraciones de los analitos (metilésteres) presentes en la muestra, se llevó a cabo empleando la normalización de áreas como método de cálculo, teniendo en cuenta los datos (áreas correspondientes a cada uno de los metilésteres) suministrados por el software de análisis GC/MS SOLUTION.

Cabe resaltar que las concentraciones calculadas corresponden a datos aproximados debido a que el análisis llevado a cabo (normalización de áreas) hace referencia a la proporción en la que se distribuyen los analitos entre si y no a su concentración absoluta en la muestra. No obstante, estos resultados son comparables a los reportados en otros estudios ya que se hace necesario no solo conocer su concentración sino también el tipo de metilésteres que componen el biocombustible y su proporción en él.

Inicialmente se calcularon las concentraciones (en mg/L) de los metilésteres de referencia en la solución madre de 100 mg/L. Posteriormente, se relacionaron tanto áreas como concentraciones haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Area}_{\text{estándar}}}{\text{Concentración}_{\text{estándar}}} = \frac{\text{Area}_{\text{muestra}}}{\text{Concentración}_{\text{muestra}}}$$

En la tabla 30 se presentan las concentraciones calculadas para los metilésteres identificados de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis cromatográfico:

**Tabla 30. Concentración de los metilésteres (biodiesel) obtenidos a partir del aceite de pollo**

Metiléster	Concentración (mg/L)
Octanoato de metilo (C8:0)	31,2
Miristato de metilo (C14:0)	139,6
Pentadecanoato de metilo (C15:0)	24,0
Palmitato de metilo (C16:0)	4120,0
Palmitoleato de metilo (C16:1)	3586,0
Estearato de metilo (C18:0)	1126,8
Oleato de metilo (C18:1)	16204,0
Linoleato de metilo (C18:2)	12872,0
Linolenato de metilo (C18:3)	1166,8

En la tabla 31 se presenta el perfil cromatográfico del biodiesel obtenido y su comparación con algunos estudios realizados internacionalmente:

**Tabla 31. Perfil de ácidos grasos del biodiesel obtenido y su comparación con otros estudios.**

Materia	Proporción de Ácidos Grasos (%)									Referencia
	C8:0	C14:0	C15:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	
Prima	0,12	0,67	0,12	21,21	4,34	6,13	38,10	27,54	1,77	Este estudio
Aceite de pollo	-	0,23	-	24,65	6,92	6,25	45,18	12,58	0,38	Bhatti [50]
	-	0,7	-	20,9	5,4	5,6	40,9	20,5	-	Moser [2]
	-	-	-	24,6	5,8	8,4	46,1	2,4	-	Anitescu [140]
Aceite de palma	-	0,8	-	44,3	0,2	5,0	39,1	10,1	0,1	May [141]
	-	1,2	-	44,1	0,3	4,1	38,4	10,0	0,2	Moser [142]
	-	1,43	-	46,13	-	3,68	37,47	11,02	-	Benjumea[143]

Los picos de los MEAG's fueron identificados por espectrometría de masas y cotejo de los tiempos de retención con un estándar de composición conocida (ver 4.9.2.4.1).

De los resultados obtenidos en este estudio, referentes a la proporción de los metilésteres identificados, puede decirse que existe un desequilibrio entre la cantidad de saturados e insaturados, situación que no es la ideal para esta materia prima, ya que de la composición

química del aceite de partida, se desprenden las características físico-químicas del biocombustible obtenido. Además, estos resultados guardan concordancia con los perfiles cromatográficos reportados en otros estudios (ver Tabla 31) para la misma materia prima. Las diferencias observadas en cuanto a la proporción de ácidos grasos encontrada en cada estudio puede deberse tanto al origen de la materia prima (clima, altura y alimentación de las aves de corral) como al método de extracción utilizado (polaridad del solvente).

Con los datos reportados en la tabla 31, se puede observar que el biodiesel obtenido en este estudio contiene un porcentaje mayor de metilésteres insaturados en comparación con el biodiesel de palma, (principal materia prima utilizada en Colombia para la producción de biodiesel) con 71,75 % y 49,5 % respectivamente. El oleato de metilo ( $C_{18:1}$ ) fue el metiléster mayoritario (38,10 %), seguido por el linoleato de metilo ( $C_{18:2}$ ) (27,54 %) y finalmente el palmitato de metilo ( $C_{16:0}$ ) con 21,21 %.

En el biodiesel obtenido y caracterizado en esta investigación se observó un alto contenido de metilésteres de ácidos grasos poliinsaturados (> 60 %), condición que lo hace más susceptible a la oxidación y que generaría consigo tiempos de estabilidad oxidativa alrededor de 3,5 h, el cual es un valor muy bajo para este parámetro en comparación con biocombustibles provenientes de otras fuentes, tales como el sebo vacuno, en el cual, su estabilidad oxidativa oscila alrededor de 69 h [2]. Cabe recordar, que la estabilidad oxidativa mínima según la normatividad vigente (EN 14112) es de 6 h, por lo que se hace necesario mejorar esta deficiencia según sea requerido. La mejor y más común práctica empleada implica el no almacenamiento del biodiesel y sus mezclas por más de seis meses. Por otro lado, se puede mejorar la estabilidad de almacenamiento adicionando agentes antioxidantes, tales como, t-butilhidroquinona (TBHQ), Tenox 21, tocoferol [38].

### **5.3.3. Evaluación del desempeño del biodiesel obtenido en un motor diesel en condiciones de vacío.**

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio de máquinas de combustión interna de la Universidad Tecnológica de Pereira. En la figura 18 se observa el motor diesel monocilíndrico; con inyección directa, 3600 rpm y 442 cm<sup>3</sup> marca RUGGERINI serie RY 110 usado en esta prueba.



**Figura 18. Motor diesel serie RY 110.**

Los resultados obtenidos para las pruebas de estabilidad se muestran en la tabla 32.

**Tabla 32. Resultados pruebas de estabilidad de un motor diesel operando con biodiesel a partir de residuos grasos de pollo.**

<b>Mínimas revoluciones en ralentí con funcionamiento estable del motor</b>	800 rpm
<b>Máximas revoluciones alcanzadas</b>	3300 rpm

Las observaciones más relevantes realizadas por el equipo de trabajo del laboratorio de máquinas de combustión interna se refieren a la estabilidad presentada por el motor y a la opacidad generada por los humos de combustión tanto en el arranque como en el normal funcionamiento del mismo cuando se aceleraba y desaceleraba sucesivamente. El desempeño observado según este equipo de trabajo, es similar al presentado por el mismo motor operando con diesel comercial. Resultados similares fueron obtenidos por Choo *et al.* [145] quienes mostraron en sus ensayos realizados en estado estacionario con biodiesel de palma (B100), que el desempeño de los motores es bueno, dado que encienden fácilmente y disminuye el ruido característico del encendido del motor, teniendo en cuenta que no hay que realizar ningún cambio en el motor para poder utilizar el biocombustible.

En la tabla 33 se presentan las opacidades medidas para el biodiesel producido a partir de aceite de pollo en este estudio:

**Tabla 33. Lecturas de opacidad.**

Lecturas de opacidad (%) en aceleraciones y desaceleraciones sucesivas					
57,4	50,3	45,4	47,5	43,8	43,3

Las anteriores lecturas se llevaron a cabo bajo el protocolo de operación del opacímetro Lucas Smokemeter (ver figura 19).



**Figura 19. Opacímetro marca Lucas.**

No fue posible encontrar referencias bibliográficas acerca de ensayos mecánicos de estabilidad y opacidad para biodiesel a partir de residuos grasos de pollo, sin embargo, Gafar *et al.* [146] evaluaron biodiesel de palma, B30 y diesel en un motor estacionario. Los resultados mostraron que a medida que aumentaba la cantidad de biodiesel disminuía el grado de opacidad y también disminuían los niveles de gases de emisión.

Otras investigaciones [147,148], afirman que la combustión es mucho mas completa comparada con el diesel comercial, debido a la presencia de oxígeno “extra” que aporta la molécula de biodiesel. En términos generales se observa un tiempo de retraso menor en el encendido con el biodiesel comparado con el diesel.

### **5.3.4. Discusión General**

El principal objetivo de esta investigación fue la obtención y caracterización de un biocombustible a partir de los residuos grasos del pollo generados en la ciudad de Pereira.

Para la caracterización de los residuos grasos de pollo, se determinó su contenido de agua, proteína, grasa y cenizas. En la determinación de fibra no se obtuvo un resultado satisfactorio debido a la poca cantidad de muestra resultante de la extracción por soxhlet. La extracción del aceite de pollo se realizó con agua en ebullición a presión elevada por tres horas. Después de la extracción del aceite, éste se separó del agua y de los sólidos remanentes por medio de embudos de separación y centrifugación respectivamente. Al aceite extraído se caracterizó físico-químicamente determinando su densidad, viscosidad cinemática, índice de refracción, índice de acidez, de saponificación, de peróxidos e índice de yodo. Una vez caracterizado el aceite se llevo a cabo la reacción de transesterificación para la obtención de los metilésteres (biodiesel). El biodiesel obtenido fue separado del glicerol y posteriormente lavado con agua a 45 °C y BIOSIL© con el objetivo de eliminar el metanol residual, trazas de catalizador, mono, di y triglicéridos sin reaccionar. La caracterización del biodiesel a partir de residuos grasos de pollo se realizo por medio de la determinación de su densidad, viscosidad cinemática, índice refracción, humedad, punto de inflamación, calor de combustión, corrosión a la lámina de cobre, índice de yodo, contenido de metales, contenido de metilésteres y pruebas de estabilidad y opacidad en un motor diesel. De todos los parámetros estudiados sobre el biodiesel obtenido, solo el contenido de humedad, sobrepasó el límite establecido por la norma respectiva, debido al método empleado para la extracción del aceite.

En términos generales, la producción de un biocombustible a gran escala debe estar respaldada por una viabilidad tanto técnica como económica. De la técnica, forma parte la disponibilidad de la materia prima con que se cuente, por lo tanto, a pesar de que el biodiesel obtenido y caracterizado en esta investigación cumple con la mayoría de las especificaciones estudiadas y requeridas por la norma ASTM D6751, la obtención de biocombustible a partir de residuos grasos de pollo no debe ser comprendida como la sustitución del diesel comercial sino como un paso en la búsqueda de fuentes alternativas de energía renovable en la ciudad de Pereira.

## 6. CONCLUSIONES

- La caracterización integral de los residuos grasos de pollo permitió la obtención de un biocombustible (biodiesel) que cumple con la mayoría de los parámetros estudiados y establecidos en la norma internacional ASTM D6751 y que presentó un comportamiento estable en el funcionamiento de un motor diesel operando en condiciones de vacío. Además, el material desengrasado mostró un incremento en su contenido protéico que lo hace atractivo para ser aprovechado en el sector agroindustrial de la ciudad de Pereira.
- El biodiesel obtenido a partir de los residuos grasos de pollo cumple con la mayoría de los parámetros evaluados sobre éste consignados en la norma ASTM D6751, tales como densidad (0,8758 g/mL), viscosidad (4,5384 mm<sup>2</sup>/s), punto de inflamación (178 °C), calor de combustión (52355,88 kJ/kg), índice de yodo (91,20 g I<sub>2</sub>/100 g biodiesel), corrosión a la lámina de cobre (clase 1a), contenido de potasio (2,713 mg/kg) y contenido de magnesio (0,225 mg/kg), con excepción del contenido de humedad (0,1903 %) el cual sobrepasó el límite establecido por dicha norma.
- El contenido de grasa (48,53 %) de la materia prima utilizada para la obtención del biodiesel es la característica más relevante que ésta exhibe debido a su considerable valor, situación que hace de los residuos grasos de pollo un subproducto atractivo para la producción de este tipo de combustibles.
- El análisis de proteína sobre la materia prima desengrasada (7,03 %), mostró un ligero aumento en comparación con la misma en estado crudo (6,97 %), dando lugar a un subproducto con mayor valor agregado, más saludable y con mayor contenido de nitrógeno con potencial uso en la industria agropecuaria.
- Las características físico-químicas determinadas sobre el aceite extraído, hacen del residuo graso utilizado en esta investigación una materia prima adecuada para la producción de biodiesel. De acuerdo al valor calculado para el índice de acidez (0,362 % ácido oléico), se puede afirmar que éste presenta un bajo contenido de ácidos grasos libres, lo cual, es ventajoso para el proceso de transesterificación, ya que minimiza la formación de jabones que afectan la separación de la mezcla biodiesel-glicerol.
- Según el análisis cromatográfico realizado, los metilésteres mayoritarios presentes en el biodiesel obtenido son el oleato de metilo (38,10 %), linoleato de metilo (27,54 %) y

palmitato de metilo (21,21 %). El 71,75 % de los metilésteres identificados en el biodiesel obtenido, corresponden a metilésteres insaturados, condición que incide negativamente en su estabilidad oxidativa bajo condiciones atmosféricas.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba desarrollada en el motor diesel serie RY 110 en condiciones de vacío, se puede concluir que el biodiesel analizado presenta un buen arranque y estabilidad en caliente en aceleraciones y desaceleraciones sucesivas operando con biodiesel puro.

## 7. RECOMENDACIONES

- Es recomendable utilizar los residuos grasos en la mayor brevedad de tiempo posible, debido a que pueden degradarse por la proliferación de microorganismos generándose malos olores. En caso de ser necesario su almacenamiento debe realizarse a temperaturas cercanas a los 0°C.
- Con el fin de garantizar la mayor extracción posible del aceite a partir de los residuos grasos, es recomendable homogeneizarlos antes de dicho proceso.
- Se recomienda utilizar otros procesos de extracción más efectivos y amigables con el medio ambiente como la extracción con vapor de agua (sin uso de solventes orgánicos derivados del petróleo), para una mayor eficiencia en cuanto a aceite se refiere.
- El biodiesel obtenido en esta investigación evidenció un alto contenido de humedad, por lo tanto, se recomienda llevar a cabo procedimientos más eficaces en el secado del mismo o modificar el método de extracción del aceite de los residuos grasos, empleando condiciones controladas de temperatura y presión.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. PARAMANIK, T. TRIPATHI, S. Biodiesel: Clean fuel of the future. Hydrocarbon processing 2005, Vol. 2, pp 49-54.
2. MOSER, B. Biodiesel production, properties, and feedstock. In Vitro Cellular & Developmental Biology 2009, Vol. 45, No. 3, pp 229-266. From ProQuest Biology Journals.
3. El Mercado del Biodiesel en Colombia. [En Línea]. Disponible en: [http://www.culturaemedellin.gov.co/sites/CulturaE/SoyEmprendedor/Noticias/Paginas/biodiesel\\_080119.aspx](http://www.culturaemedellin.gov.co/sites/CulturaE/SoyEmprendedor/Noticias/Paginas/biodiesel_080119.aspx). Consultado 3 de Agosto 2009.
4. Researches create biodiesel from chicken fat. Fayetteville, Arkansas University. [En Línea]. RenewableEnergyAccess.com. Disponible en: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/01/researchers-create-biodiesel-from-chicken-fat-updated-50972>. Consultado 3 de Agosto 2009.
5. LOZANOFF, J. HEINICHEN, S. MARCHI, G. RISSO, E. Revisión de tecnologías para la producción de bioenergía en países emergentes. Observatorio de políticas públicas, Jefatura de Gabinete de Ministros, Argentina 2007. Sitio oficial: [www.cag.jgm.gov.ar](http://www.cag.jgm.gov.ar). Consultado 5 de Agosto 2009.
6. DEMIRBAS, A. Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics. Energy Conversion and Management, Vol. 47, 2006, pp 2271–2282.
7. DIAZ, C. SÁNCHEZ, C. BRACHNA, D. OKULIK, N. MATTEA, M. Biodiesel a partir de aceite de algodón: Optimización de parámetros. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, 2005.
8. CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL DE LA BIOTECNOLOGÍA Y PRODUCCIÓN LIMPIA (CORPODIB). Estado del arte de las Tecnologías de producción de biodiesel. pp 323-364.
9. El Biodiesel comienza a tener su espacio en Uruguay. [En Línea]. BIODIESEL URUGUAY. Disponible en:

[http://www.biodieseluruguay.com/biodiesel\\_en\\_uruguay.php](http://www.biodieseluruguay.com/biodiesel_en_uruguay.php). Consultado 5 de Agosto 2009.

10. LORENZO, C. La fiebre del Biodiesel en Argentina. IDICSO, Argentina, 2007.
11. BIOCOMBUSTIBLES. PETROBRAS [En Línea]. Disponible en: [http://www.petrobras.com/ptcm/appmanager/ptcm/dptcm?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=petr\\_com\\_area\\_detalhe&idConteudoPrincipal=area\\_detalhe\\_00004](http://www.petrobras.com/ptcm/appmanager/ptcm/dptcm?_nfpb=true&_pageLabel=petr_com_area_detalhe&idConteudoPrincipal=area_detalhe_00004). Consultado 4 de Agosto 2009.
12. LICHT, F. World biodiesel production. World Ethanol and Biodiesel Report 2006. Vol. 4, No. 16, p 365.
13. CONTRALORÍA GENERAL DE LA REPUBLICA. Bioetanol y Biodiesel: los Combustibles Ecológicos en Colombia. pp 1-38.
14. BIODIESEL. [En Línea]. Disponible en: <http://www.fedepalma.org/biodiesel.htm>. Consultado 4 de Agosto 2009.
15. INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN PALMA DE ACEITE. B10 para toda Colombia en 2010. [En Línea]. Disponible en: [http://www.cenipalma.org/es/B10\\_biodiesel\\_cenipalma](http://www.cenipalma.org/es/B10_biodiesel_cenipalma). Consultado 3 de Agosto 2009.
16. VILLARRAGA, A. Oportunidades de negocio para las empresas de biodiesel a partir de palma en Colombia - Una perspectiva. Revista PUENTE - Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
17. República de Colombia: Ministerio de Minas y Energía Unidad de Planeación Minero Energética. (2008). Proyección de Demanda de Energía para el Sector Transporte Gasolina-Diesel-GNV. Bogotá D.C.
18. BENJUMEA, P. AGUDELO, J. CANO, G. Estudio Experimental de las Variables que Afectan la Reacción de Transesterificación del Aceite Crudo de Palma para la Producción de Biodiesel. Scientia et Technica, Vol. X, No. 24, 2004, pp. 169-174. ISSN 0122-1701.
19. BENAVIDES, A. BENJUMEA, P. PASHOVA, V. El Biodiesel de Aceite de Higuera como combustible alternativo para motores Diesel. Dyna rev fac nac

minas, Universidad Nacional de Colombia Medellín 2007, Vol. 74, No. 153, pp 141-150.

20. HERRERA, J. VELEZ, J. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un biocombustible (biodiesel). Pereira, 2007. 80 p. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Escuela de Química.
21. VIVAS, A. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino. Pereira, 2010. 135 p. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Escuela de Química.
22. CARDONA, C. ORREGO, C. GUTIÉRREZ, L. BIODIESEL 1<sup>a</sup> Ed. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2009. ISBN 9789584455130.
23. OJEDA, Y. SANCHEZ, J. LEON, A. MEDINA, J. Informe de Vigilancia Tecnológica: Tecnologías de Producción de Biodiesel. Programa Nacional de Energía y Minería. Colciencias, 2007. ISBN 978-958-8290-27-0.
24. Biodiesel: Calidad en las mezclas. Centro de debate y marketplace de biocombustibles. [En línea]. Enero de 2008. Disponible en: <http://www.biodieselpain.com/2008/01/07/biodiesel-calidad-en-las-mezclas/>. Consultado 1 de Septiembre 2009.
25. DEMIRBAS, A. Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics. *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, 2006, pp 2271–2282.
26. CERVERÓ, J. COCA, J. LUQUE, S. Production of Biodiesel from Vegetable oils. *Grasas y Aceites*, Vol.59, no.1, 2008, pp.76-83.
27. VAN GERPEN, J. Biodiesel Production and Fuel Quality. University of Idaho. Moscow, ID 83844 (2003).
28. GONZALEZ, A. JIMENEZ, I. RODRIGUEZ, M. RESTREPO, S. GÓMEZ, J. Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes. *rev.ing.* [online]. jul/dic. 2008, no.28 [citado 19 Julio 2010], p.70-82.

29. DEMIRBAS, A. Biodiesel production from vegetable oils by supercritical methanol. *Journal of Scientific & Industrial Research* Vol. 64, November 2005, pp. 858-865.
30. MURILLO, J. Producción de biodiesel a partir de aceite de palma. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Química, 2003.
31. ENCINAR, J. GONZALEZ, J. RODRIGUEZ, J. TEJEDOR, A. Biodiesel Fuels from Vegetable Oils: Transesterification of *Cynara cardunculus* L. Oils with Ethanol. *Energy & Fuels* 2002, Vol 16, pp 443-450.
32. FREEDMAN, B. PRUDE, E. MOUNTS, T. Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils. *JAACS* 1984, Vol.16, No.10.
33. MA, F. HANNA, M. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology* 1999, Vol. 70, pp 1-15.
34. CANAKCI, M. VAN GERPEN, J. Biodiesel Production From Oils and Fats with High Free Fatty Acids. *American Society of Agricultural Engineers* 2001 Vol. 44(6), pp 1429–1436.
35. MATTINGLY, B. Production of Biodiesel from Chicken Fat Containing Free Fatty Acids. University of Arkansas. August, 2006.
36. SCHUCHARDT, U. SERCHELI, R. VARGAS, R. Transesterification of vegetable oils: a review. *Journal of Brazilian Chemical Society* 1998, Vol.9, No. 3, pp. 199-210.
37. MEHER, L. SAGAR, D. NAIK, S. Technical Aspects of Biodiesel production by Transesterification: A review. *Renewable and Sustainable Energy reviews* 2006, Vol. 10, pp.248-268.
38. VAN GERPEN, J. SHANKS, B. PRUSZKO, R. Biodiesel Production Technology. NREL, National Renewable Energy laboratory, Subcontract Report No 510-36244, 2004. US. Department of Energy.

39. HAAS, M. FOGLIA, T. Alternate Feedstock and Technologies for Biodiesel Production. Eastern Regional Research Center (ERRC). Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture.
40. PINTO, A. GUARIEIRO, L. REZENDE, M. RIBEIRO, N. TORRES, E. LOPES, W. PEREIRA, P. ANDRADE, J. Biodiesel: An Overview. Journal of Brazilian Chemical Society 2005, Vol. 16, No. 6B, pp 1313-1330.
41. LOTERO, E. LIU, Y. LOPEZ, D. SUWANNAKARN, K. BRUCE, D. GOODWIN, J. Synthesis of Biodiesel Via Acid Catalysis. Industrial & Engineering Chemistry Research 2005, No.14, pp.5353-5363.
42. TIWARI, P. KUMAR, R. GARG, S. Transesterification, Modeling and Simulation of Batch Kinetics of Non-Edible vegetable oils for biodiesel production. Department of Chemical Engineering, IIT Kanpur, 208 016, India.
43. VAN GERPEN, J. Biodiesel processing and production. Fuel Processing Technology 2005, Vol. 86, pp 1097– 1107.
44. MA, F. CLEMENTS, L. HANNA, M. The Effects of Catalyst, Free Fatty Acids, and Water on Transesterification of Beef Tallow. American Society of Agricultural Engineers 1998, Vol.41, No.5, pp.1261-1264.
45. MARTÍNEZ, O. SÁNCHEZ, F. SUÁREZ, O. Producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD. Ingeniería e Investigación 2007, Vol.27, No.2, pp.34-43.
46. PLENTZ, S. MENEGHETTI, R. WOLF, C. SILVA, E. Ethanolysis of Castor and Cottonseed Oil: A Systematic Study Using Classical Catalysts. Journal of the American Oil Chemist's Society 2006, Vol. 83, No 9, p 819. ProQuest Agriculture Journals.
47. TICKELL, J. From the Fryer to the Fuel Tank. The complete guide to Using Vegetable Oil as an Alternative Fuel. 3 Ed, KAIA ROMAN, United States, 2003. ISBN 0-9707227-0-2.
48. MORRISON, R. BOYD, R. Química Orgánica 5<sup>a</sup> Ed. Addison Wesley Longman de México S.A. de C.V, 1998. ISBN 9684443404.

49. SULISTYO, H. RAHAYU, S. WINOTO, G. SUARDJAJA, I. Biodiesel Production from High Iodine Number Candlenut oil. *International Journal of Chemical and Biological Engineering* 2:2 2009.
50. BHATTI, H. HANIF, M. QASIM, M. REHMAN, A. Biodiesel production from waste tallow. *Fuel* 2008, Vol. 87, pp 2961–2966.
51. WATANABE, Y. SHIMADA, Y. SUGIHARA, A. NODA, H. FUKUDA, H. TOMINAGA, Y. Continuous Production of Biodiesel Fuel from Vegetable Oil Using Immobilized *Candida antarctica* Lipase. *JAOCS* 2000, Vol. 77, No. 4.
52. TALUKDER, M. WU, J. FEN, M. MELISSA, Y. Two-step lipase catalysis for production of biodiesel. *Biochemical Engineering journal* 2010, DOI:10.1016/J.BEJ.2009.12.015.
53. SALIS, A. PINNA, M. MONDUZZI, M. SOLINAS, V. Comparison among immobilised lipases on macroporous polypropylene toward biodiesel synthesis. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 2008, Vol. 54, pp 19–26.
54. DELGADO, C. PASHOVA, V. Producción enzimática de ésteres etílicos del aceite de ricino. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 2010, No.53, pp.9-19.
55. SCHUCHARDT, U. SERCHELI, R. VARGAS, R. Transesterification of vegetable oils: a review. *Journal of Brazilian Chemical Society* 1998, Vol.9, No.3, pp. 199-210.
56. FREEDMAN, B. BUTTERFIELD, R. PRYDE, E. Transesterification Kinetics of Soybean Oil. *JAOCS* 1986, Vol.63, No.10, pp 1375-1380.
57. KALBANDE, S. MORE, G. NADRE, R. Biodiesel Production from Non edible Oils of *Jatropha* and *Karanj* for Utilization in Electrical Generator. *Bioenergy Resources* 2008, Vol. 1, pp 170-178.
58. ALBIS, A. PARRA, J. SANCHEZ, F. Palm oil Transesterification with methanol via heterogeneous catalysis. *Revista de Ingeniería e Investigación, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia* 2005, Vol.25, No.2, pp.71-77.

59. CARDEÑO, F. RIOS, L. FRANCO, A. Producción de biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea. Revista facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia 2010, No. 51, pp.81-86.
60. DEMIRBAS, A. Comparison of Transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. Energy Conversion and Management 2008, Vol. 49, pp 125–130.
61. CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL DE LA BIOTECNOLOGÍA Y PRODUCCIÓN LIMPIA (CORPODIB). Estado del arte de las Tecnologías de producción de biodiesel. pp 323-364.
62. DIAZ, C. SÁNCHEZ, C. BRACHNA, D. OKULIK, N. MATTEA, M. Biodiesel a partir de aceite de algodón: Optimización de parámetros. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, 2005.
63. BENAVIDES, A. BENJUMEA, P. PASHOVA, V. El Biodiesel de Aceite de Higuera como combustible alternativo para motores Diesel. Dyna rev fac nac minas, Universidad Nacional de Colombia Medellín 2007, Vol. 74, No. 153, pp 141-150.
64. CONTRALORÍA GENERAL DE LA REPUBLICA. Bioetanol y Biodiesel: los Combustibles Ecológicos en Colombia. pp 1-38.
65. CARDONA, C. ORREGO, C. GUTIÉRREZ, L. BIODIESEL 1ª Ed. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2009. ISBN 9789584455130.
66. MAKKAR, H. MAES, J. DE GREYT, W. BECKER, K. Removal and degradation of phorbol during Pre-treatment and Transesterification of *Jatropha curcas* oil. Journal of the American Oil Chemist's Society 2009, Vol.86, No.2, pp.173-181.
67. RAO, K. CHAKRABARTI, P. RAO, B. PRASAD, R. Phospholipid Composition of *Jatropha curcas* Seed Lipids. Journal of the American Oil Chemist's Society 2010, Vol. 86, No 2, pp 197-200. From ProQuest Agriculture Journals. (Document ID: 1648903991).
68. KUMAR, N. SHARMA, P. *Jatropha curcas*: A sustainable source for production of Biodiesel. Journal of Scientific & Industrial Research 2005, Vol.64, pp.883-889.

69. KAUL, S. PORWAL, J. GARG, M. Parametric Study of *Jatropha* Seeds for Biodiesel Production by Reactive Extraction. *Journal of the American Oil Chemist's Society* 2010, Vol. 87, No. 8, pp 903-908. From ProQuest Agriculture Journals. (Document ID: 2113765541).
70. DEVAPPA, R. MAES, J. MAKKAR, H. DE GREYT, W. BECKER, K. Quality of Biodiesel Prepared from Phorbol Ester Extracted *Jatropha curcas* Oil. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 87, No 6, pp 697-704. Retrieved August 19, 2010, from ProQuest Agriculture Journals. (Document ID: 2082671221).
71. GREER, D. Recycling Local Waste Oil and Grease into Biodiesel. *BioCycle*, Vol. 51, No. 7, pp 56-59, 2010, from ABI/INFORM Global. (Document ID: 2098107821).
72. ZHANG, Y. DUBE, M. MCLEAN, D. KATES, M. Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, Vol. 89, 2003, pp 1–16. ISSN 0960-8524.
73. STUDDT, T. Algae Promise Biofuel Solutions. *International News on Fats, Oils and Related Materials: INFORM*, Vol. 21, No. 5, 319-321,324. Retrieved August 19, 2010, from ProQuest Science Journals. (Document ID: 2041370911).
74. GOUVEIA, L. OLIVEIRA, A. Microalgae as a raw material for Biofuels production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, Vol. 36, No. 2, 2010, pp 269-74. Retrieved August 19, 2010, from ABI/INFORM Global. (Document ID: 1895049171).
75. HU, Q. SOMMERFELD, M. JARVIS, E. GHIRARDI, M. POSEWITZ, M. SEIBERT, M. DARZINS, A. Microalgal Triacylglycerols as Feedstocks for Biofuel Production: Perspectives and Advances. *The Plant Journal*, Vol.54, 2008, pp.621-639.
76. CRANDALL, L. Algae oil: Biofuels and Beyond. *International News on Fats, Oils and Related Materials: INFORM*, 21(6), pp 373-375. Retrieved February 23, 2011, from Research Library. (Document ID: 2068163631).

77. GURU, M., KOCA, A. CAN, O. ÇINAR, C. SAHIN, F. Biodiesel production from Waste Chicken Fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renewable Energy*, Vol. 35, 2010, pp 637–643. ISSN 0960-1481.
78. ENCINAR, J. GONZÁLEZ, J. RODRÍGUEZ-REINARES, A. Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. *Fuel Processing Technology*, Vol. 88, 2007, pp.513-522. ISSN 0378-3820.
79. LAPUERTA, M. RODRIGUEZ, F. OLIVA, F. CANOIRA, L. Biodiesel from Low-Grade Animal Fats: Diesel Engine Performance and Emissions. *Energy And Fuels*, Vol 23, 2009, pp 121–129.
80. NARASIMHARAO, K. STRULL, J. MISRA, M. SUSANTA, K.M. A Green Process for Producing Biodiesel from Feather Meal: *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. American Chemical Society, Vol. 57, No.14, 2009, pp 6163–6166.
81. CENGIZ, O. SEHMUS, A. Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. *Applied Energy*, Vol. 86, No 10, 2009, pp 2114-2120, ISSN 0306-2619.
82. KNOTHE, G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, Vol. 86, No 10, 2005, pp 1059-1070, ISSN 0378-3820.
83. RAMOS, M. FERNANDEZ, C. CASAS, A. RODRIGUEZ, L. PEREZ, A. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, Vol. 100, No 1, 2009, pp 261-268, ISSN 0960-8524.
84. SARAF, S. THOMAS, B. Influence of feedstock and process chemistry on biodiesel quality. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 85, No 5, 2007, pp 360-364, ISSN 0957-5820.
85. BUENO, J. Las alternativas al petróleo como combustible para vehículos automóviles. *Fundación Alternativas*. ISBN: 978-84-96653-45-0. 2007.
86. CHINCHOLKAR, P. SRIVASTAVA, S. REHMAN, A. DIXIT, S. LANJEWAR, A. Biodiesel as an Alternative Fuel for Pollution Control in Diesel Engine. *Asian Journal of Experimental Sciences*, Vol. 19, No. 2, 2005, pp. 13-22, ISSN 0971-5444.

87. AGUDELO, J. BENJUMEA, P. GOMEZ, E. PEREZ, J.F. Biodiesel. Una revisión del desempeño mecánico y ambiental. Universidad del Norte. Ingeniería y desarrollo, Vol. 13, 2003, pp. 1-14, ISSN 0122-3461.
88. KEGL, B. Biodiesel Usage at Low Temperature. Fuel, Vol. 87, No 7, 2008, pp. 1306-1317, ISSN 0016-2361.
89. ZHENG M. MULENGA, M.C. READER G.T. WANG, M. TING, D. TJONG, J. Biodiesel Engine Performance and Emissions in low Temperature Combustion. Fuel, Vol. 87, No 6, 2008, pp. 714-22, ISSN 0016-2361.
90. LIN, Y.F. WU, Y.P.G. CHANG, C.T. Combustion characteristics of waste-oil produced biodiesel/diesel fuel blends. Fuel; Vol. 86, No 12-13, 2007, pp 1772-1780, ISSN 0016-2361.
91. WANG, W. LYONS, D. CLARK, N. GAUTAM, M. Emissions from Nine Heavy Trucks Fueled by Diesel and Biodiesel Blend without Engine Modification. Environmental Science & Technology, Vol. 34, No. 6, 2000, pp 933-939, ISSN 0013-936X.
92. ROJAS, N. Review of particulate emissions by diesel and biodiesel combustion. Revista de Ingeniería, Junio/Diciembre, No.20, 2004, pp 58-68, ISSN 0121-4993.
93. U.S. Environmental Protection Agency EPA. A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions-Draft Technical Report. Air and Radiation, EPA420-P-02-001, October 2002.
94. RODRÍGUEZ, J. Contaminación ambiental y enfermedades respiratorias. Métodos en Ecología y Sistemática, Vol. 4, 2009, pp 29-34. ISSN 1659-3049.
95. CANTER, N. Biodiesel production and purification. Tribology & Lubrication Technology, Vol. 64, No 11, 2008, pp 12-13, from ProQuest Science Journals. (Document ID: 1607949701).
96. MIN, Y. YAN, F. LIU, F. COTO, C. WALDROUP, P. Glycerine - A New Energy Source for Poultry. International Journal of Poultry Science, Vol. 9, No. 1, 2010, pp.1-4, ISSN 1682-8356.

97. GIRALDO, S. RÍOS, L. FRANCO, A. CARDEÑO, F. Síntesis de aditivos para Biodiesel a partir de Modificaciones químicas de la glicerina. Información Tecnológica, Vol. 20, No.6, 2009, pp.75-84, ISSN 0718-0764.
98. CÁRDENAS, C. PULIDO, O. ARAGÓN, L. ANCÍZAR, F. SUÁREZ, Z. MONTOYA, D. Evaluación de la producción de 1,3-propanodiol por cepas nativas de *Clostridium sp.* Mediante fermentación a partir de glicerol USP y glicerol industrial subproducto de la producción de biodiesel. Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas, Vol. 35, No 1, 2006, pp. 120-137, ISSN 0034-7418.
99. MONTOYA, C. Manual del laboratorio de análisis de alimentos. Universidad Tecnológica de Pereira, Enero de 2007.
100. Norma Técnica Colombiana. ICONTEC N 287. Grasas y Aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de humedad y materia volátil. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Santa Fe de Bogotá.
101. BERNAL, I. D. R. Sustancias Grasas, Análisis de alimentos. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Julio Carrizosa Valenzuela, No. 2. Santa Fé de Bogotá, 1993.
102. Norma Técnica Colombiana. ICONTEC N 4648. Alimentos para Animales. determinación de ceniza cruda. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Santa Fe de Bogotá.
103. Norma Técnica Colombiana ICONTEC 1556. Carne y productos cárnicos. Método para determinar el contenido de Nitrógeno (método de referencia y de rutina).
104. MATISSEC, R., SCHENEPEL, F. M.; STEINER, G. Análisis de los alimentos: Grasas y sustancias acompañantes. Editorial Springer-Verlag. GMBH & Co. Berlín, Alemania, 1992.
105. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N 668. Grasas. Determinación del contenido de grasa y fibra cruda. Método Gravimétrico. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá, 1973.
106. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.432. Grasas y Aceites Comestibles. Método de determinación de Densidad. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá, 1999.

107. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.268. Grasas y Aceites. Método de determinación del Índice de Refracción. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá, 1969.
108. ASTM D 0445\_09\_228. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity).
109. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.218. Grasas y Aceites Comestibles. Método de determinación de Acidez. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1999).
110. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.235. Grasas y Aceites. Método de determinación del Índice de saponificación. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1970).
111. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.236. Grasas y Aceites. Método de determinación del Índice de Peróxidos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1999).
112. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.283. Grasas y Aceites. Método de determinación del Índice de Yodo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1969).
113. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.432. Grasas y Aceites Comestibles. Método de determinación de Densidad. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1999).
114. Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.254. Grasas y Aceites Comestibles. Método de determinación del contenido de agua. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1999).
115. WEARCHECKIBERICA. Nuevo Equipamiento para análisis de Biodiesel. Boletín mensual sobre lubricación y mantenimiento. [En Línea], No7, Septiembre, 2004, España. Disponible en: [http://www.wearcheckiberica.es/boletinMensual/PDFs/EQUIPAMIENTO\\_BIODIESEL.asp](http://www.wearcheckiberica.es/boletinMensual/PDFs/EQUIPAMIENTO_BIODIESEL.asp). Consultado 20 de Agosto 2010.
116. ASTM D93, Standard Test Methods for Flash-Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester.
117. ASTM D240, Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter.

118. ASTM D130, Standard Test Method for Detection of Copper Corrosion from Petroleum Products by the Copper Strip Tarnish Test.
119. Proyecto de norma técnica Colombiana DE 100/04. Biodiesel para uso en motores diesel. Especificaciones.
120. ASTM D5863, Standard Test Methods for Determination of Nickel, Vanadium, Iron, and Sodium in Crude Oils and Residual Fuels by Flame Atomic Absorption Spectrometry.
121. Mc NAIR, H. MILLER, J. Basic Gas Chromatography, ed. I. JOHN WILEY & SONS. 1997.
122. Mc NAIR, H. Cromatografía de gases, ed. p.r.d.d.c.y.t. secretaria general de la EA. 1981, Washington, D.C.
123. MONTEIRO, M. AMBROZIN, A. LIAO, L. FERREIRA, A. Critical Review on Analytical methods for Biodiesel Characterization. ELSEVIER/Talanta 2008, Vol. 77, pp 593-605.
124. SKOOG, D.A., F.J. HOLLER, and A.T. NIEMAN, Principios de análisis instrumental. 5<sup>a</sup> Ed, Ed. M.G. Hill. 2001, España.
125. OSPINA, B. Elementos de estadística descriptiva. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de ciencias básicas, 1996 Pereira, Colombia 82 p.
126. KIRK, R. SAWYER, R. EGAN, H. Composición y Análisis de Alimentos de Pearson 2<sup>a</sup> Ed. Ed. Grupo Patria Cultural S.A. DE C.V, 2000, México. ISBN 9682612640.
127. ALPTEKIN, E. CANAKCI, M. Optimization of pretreatment reaction for methyl ester production from chicken fat. Fuel 2010, doi:10.1016/j.fuel.2010.04.031.
128. KNOTHE, G., MATHEAUS, A.C. and RYAN, T.W. Cetane number of brached and straight-chain fatty acid esters determined in an ignition quality tester, Fuel 2003, 82: 971–975.
129. LEE, R., HOBBS, C.H. and PEDLEY, J.F. Fuel quality impact on heavy-duty diesel emissions: a literature review, 1998, SAE technical paper series 982649.

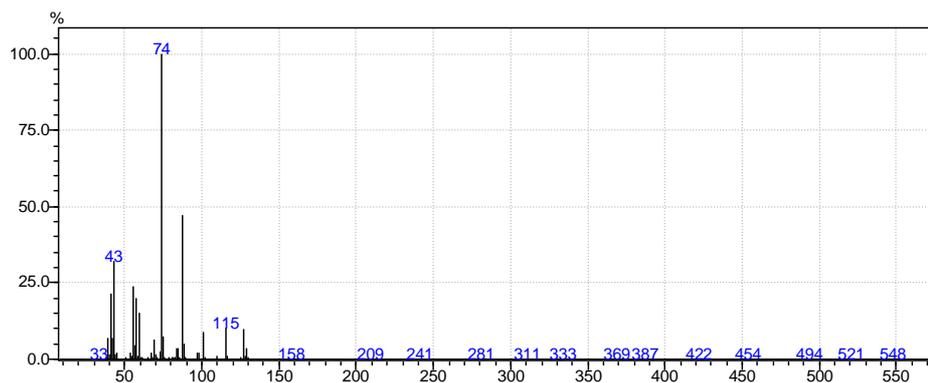
130. ALPTEKIN, E. CANAKCI, M. Optimization of pretreatment reaction for methyl ester production from chicken fat. *Fuel* 2010, doi:10.1016/j.fuel.2010.04.031.
131. EL PROGRAMA DE BIODIESEL EN COLOMBIA, UN VERDADERO PROGRAMA CON VISIÓN DE FUTURO. [En Línea]. Disponible en: [http://www.fedepalma.org/document/2007/Biodiesel\\_MinMinas.pdf](http://www.fedepalma.org/document/2007/Biodiesel_MinMinas.pdf). Consultado 15 de Noviembre 2010.
132. KNOTHE, G. Analyzing biodiesel: Standards and Other Methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 2006, Vol. 83, No 10, pp 823-833.
133. MURUGESAN, A. UMARANI, C. CHINNUSAMY, T. KRISHNAN, M. SUBRAMANIAN, R. NEDUZCHEZHAIN, N. Production and Analysis of Biodiesel from non-edible Oils- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009, Vol. 13, No. 4, pp 825-834.
134. DEMIRBAS, A. Characterization of Biodiesel Fuels. *Energy Sources, Part A* 2009, Vol. 31, pp 889-896.
135. NREL. Biodiesel Handling and Use Guide. In Fourth ed. National Renewable Energy Laboratory 2009, p 56.
136. CANAKCI, M. Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. *Bioresource Technology* 2007, Vol. 98, pp 1167–1175.
137. KRISNANGKURA, K. A Simple Method For Estimation of Cetane Index of Vegetable Oil Methyl Esters. *JAACS* 1986, Vol. 63, No. 4, pp 552-553.
138. MITTELBACH, M. Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: Specifications and quality control of biodiesel. *Bioresource Technology* 1996, Vol. 56, No. 1, pp 7-11.
139. PISCHINGER, G. SIEKMAN, R. FALCON, A. FERNÁNDEZ, F. Methyl esters of plant oils as diesel fuels, either straight or in blends. *Vegetable oil fuels. American Society of Agricultural Engineers* 1982, Vol. 4, No. 82, pp 198-208.

140. MARULANDA, V. ANITESCU, G. TAVLARIDES, L. Investigations on Supercritical Transesterification of chicken fat for biodiesel production from low-cost lipid feedstocks. *The Journal of Supercritical Fluids* 2010, Vol. 54, pp 53-60.
141. MAY, CHOO YUEN *et al.* Key fuel properties of palm oil alkyl esters. *Fuel* 2005, Vol. 84, pp 1717-1720.
142. MOSER, B. Influence of extended storage on fuel properties of methyl esters prepared from palm, soybean and sunflower oils. *Renewable Energy* 2011, Vol. 36, pp 1221-1226.
143. BENJUMEA, P. AGUDELO, J. AGUDELO, A. Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends. *Fuel* 2008, Vol. 87, pp 2069-2075.
144. AGUDELO, A. AGUDELO, J. BEDOYA, I. Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma. *Ingeniería y desarrollo* 2005, No. 18. ISSN 0122-3461.
145. CHOO, Y. Production and evaluation of palm oil methyl ester as diesel substitute. *Proceedings of PORIM BIOFUEL* 1995, P 15.
146. GAFAR, A. WIDODO, J. SIDJABAT, O. LEGOWO, E. RAHMAN, M. HARIMURTI, K. SUTARDJO. ISKANDAR, N. Preparation of palm oil esters-diesel fuel mix and its performance test on stationary engine. *Proceedings of PORIM BIOFUEL* 1995, p 52.
147. CHOI, C. BOWER, G. RERTZ, R. Effects of biodiesel blended fuels and multiple injections on DI diesel engines, University of Wisconsin-Madison. SAE technical paper series 970218.
148. SWAIN, E. SHAEED, A. An experimental study to evaluate the use of coconut based fuels as alternatives to diesel oil. *Journal of the Institute of Energy* 2000, Vol. 73, No. 495, p 100.

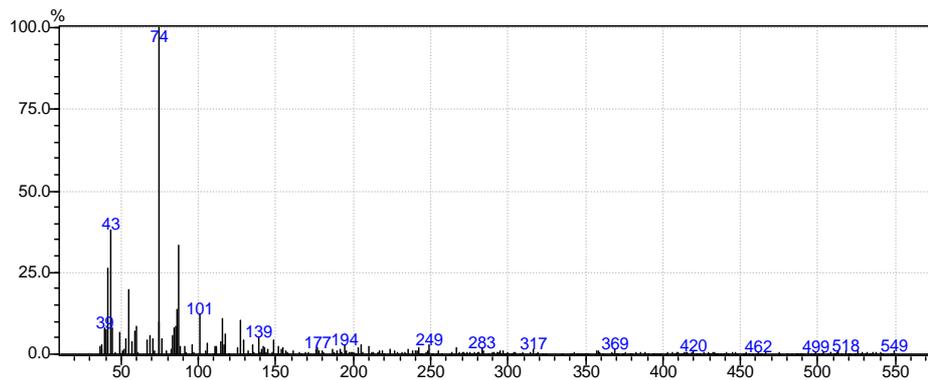
## 9. ANEXOS

### ANEXO 1. Espectros de masas

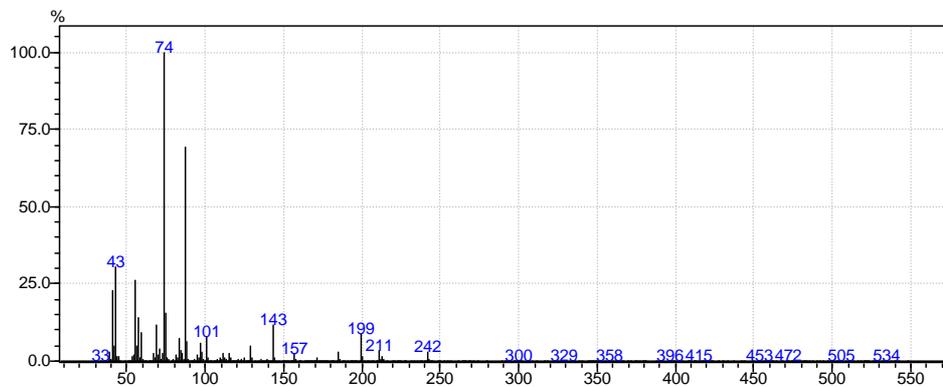
#### Espectro de masas octadecanoato de metilo (Estándar)



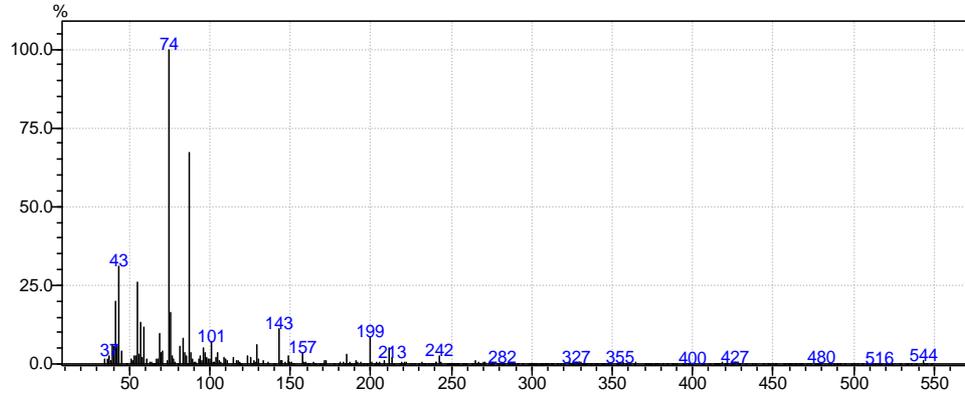
#### Espectro de masas octadecanoato de metilo (Biodiesel)



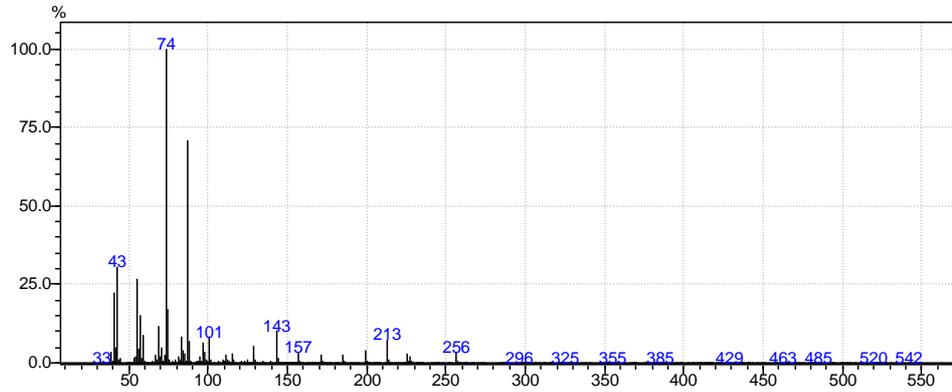
#### Espectro de masas miristato de metilo (Estándar)



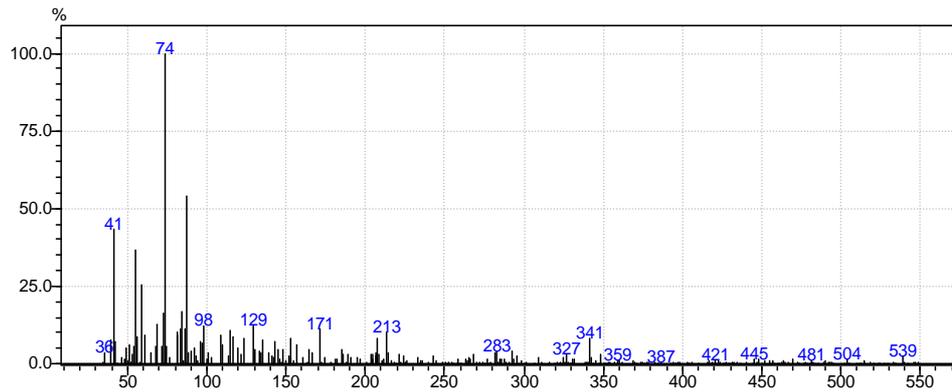
### Espectro de masas miristato de metilo (Biodiesel)



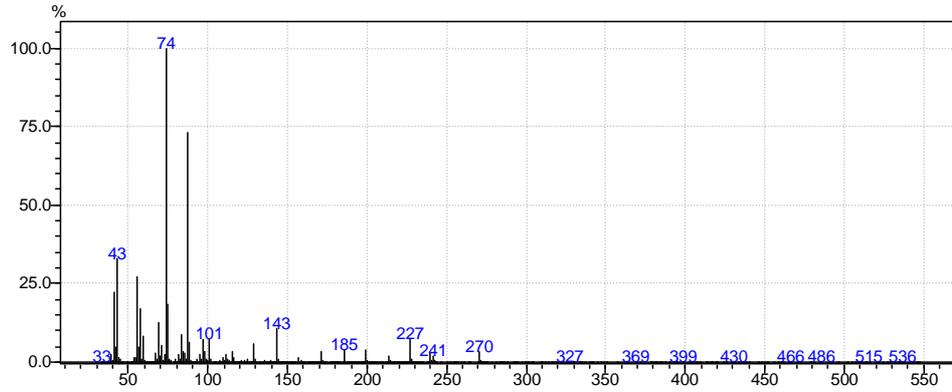
### Espectro de masas pentadecanoato de metilo (Estándar)



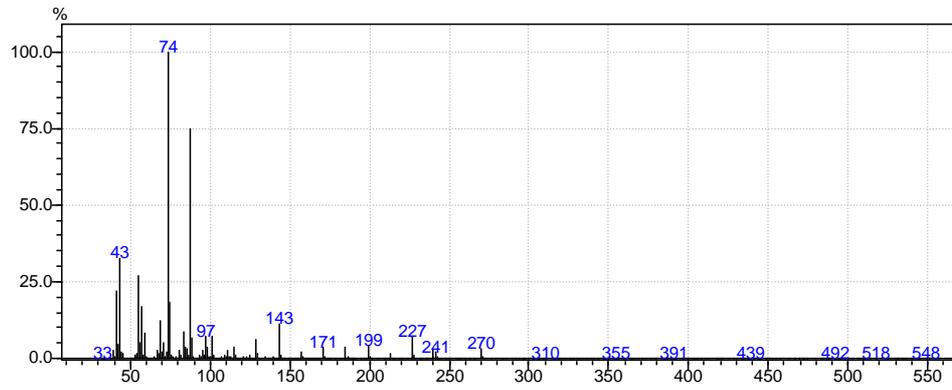
### Espectro de masas pentadecanoato de metilo (Biodiesel)



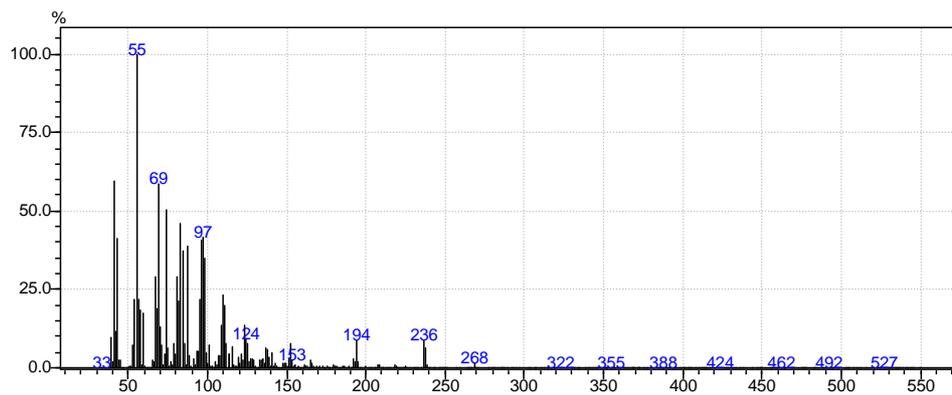
### Espectro de masas palmitato de metilo (Estándar)



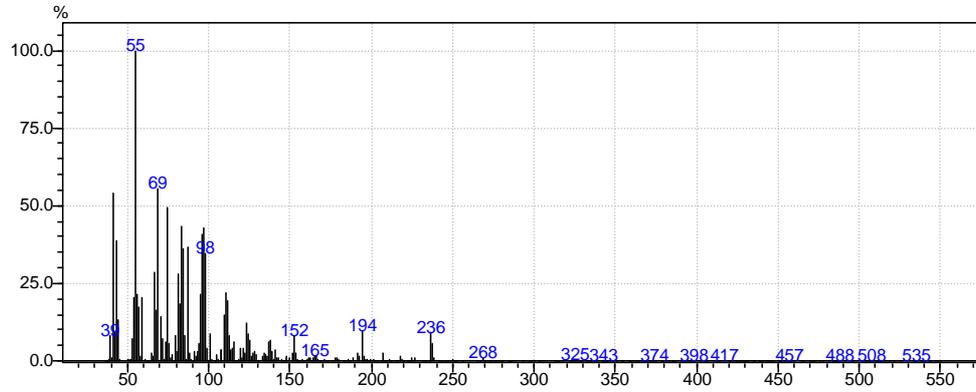
### Espectro de masas palmitato de metilo (Biodiesel)



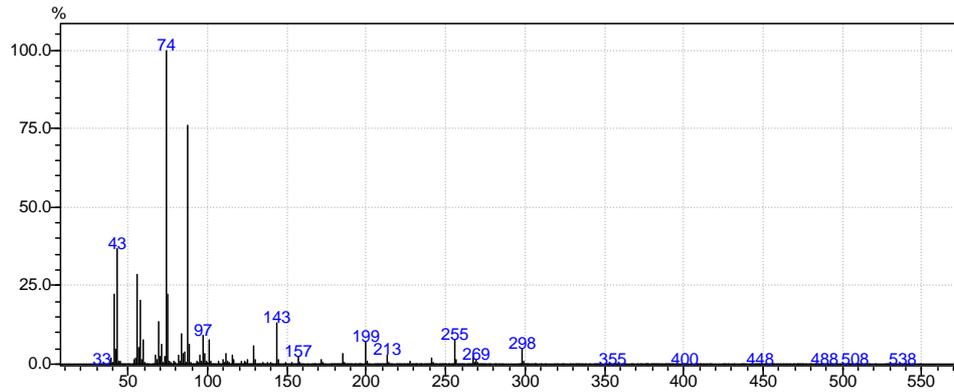
### Espectro de masas palmitoleato de metilo (Estándar)



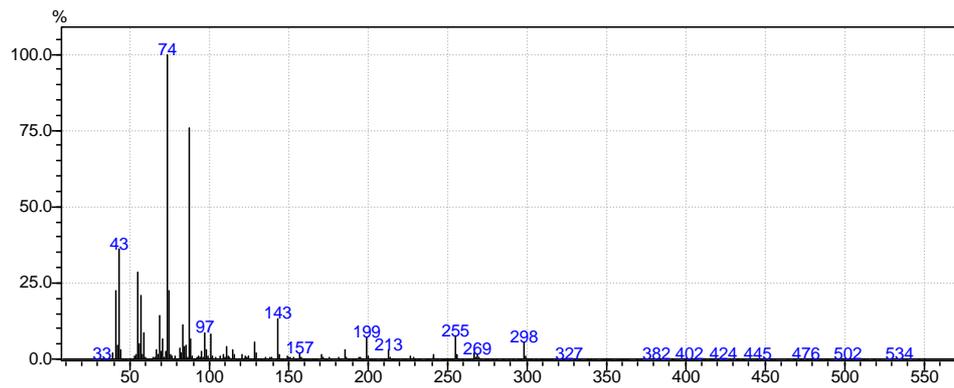
### Espectro de masas palmitoleato de metilo (Biodiesel)



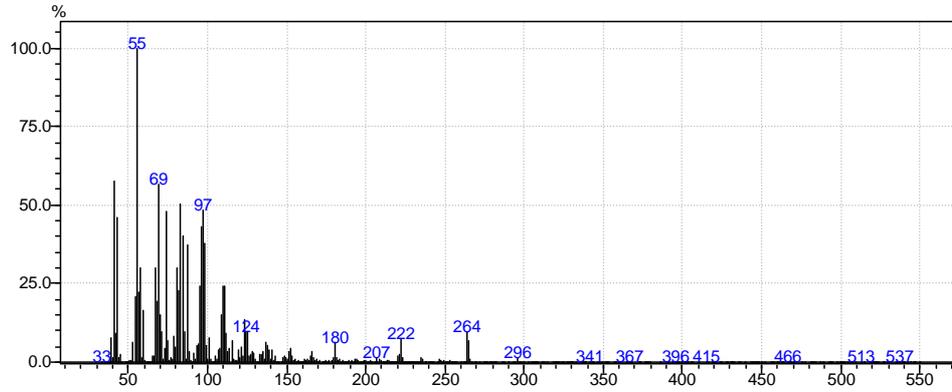
### Espectro de masas estearato de metilo (Estándar)



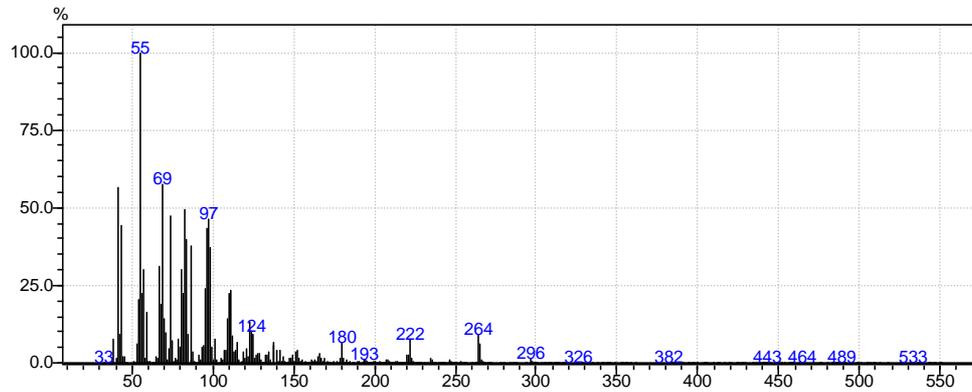
### Espectro de masas estearato de metilo (Biodiesel)



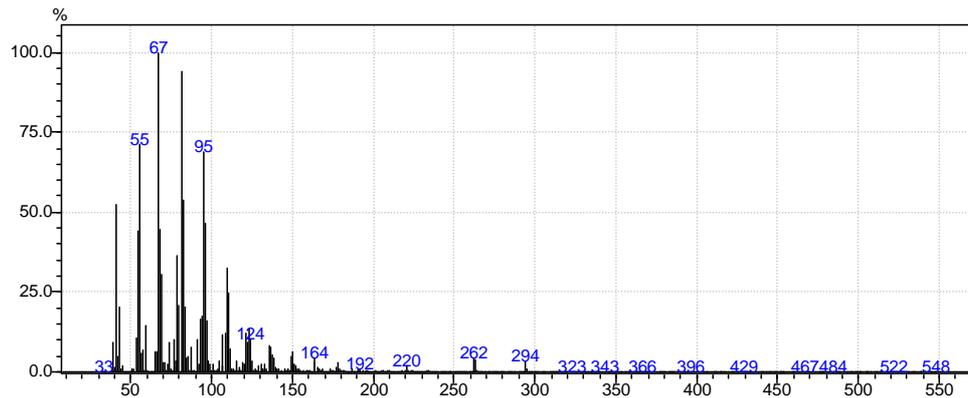
### Espectro de masas oleato de metilo (Estándar)



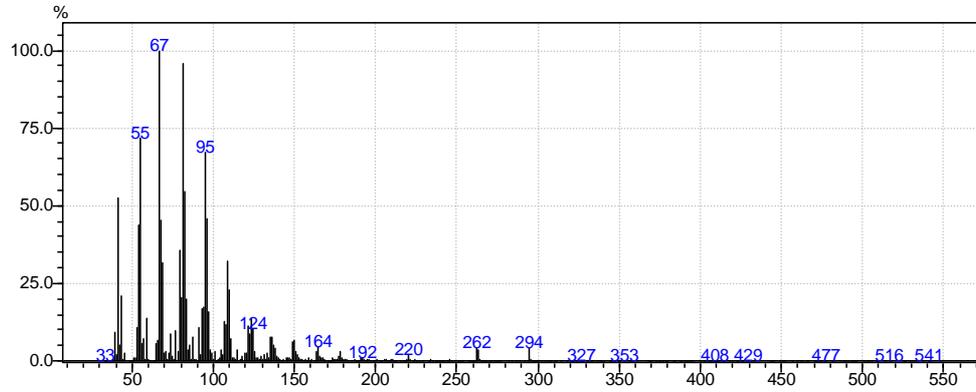
### Espectro de masas oleato de metilo (Biodiesel)



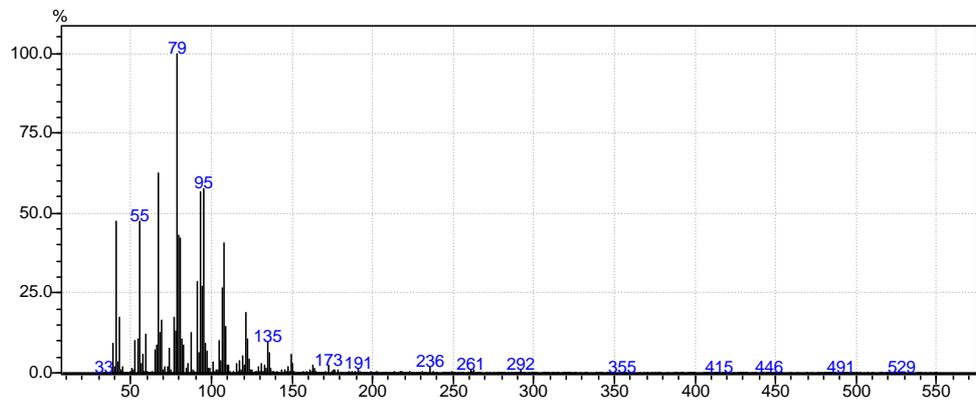
### Espectro de masas linoleato de metilo (Estándar)



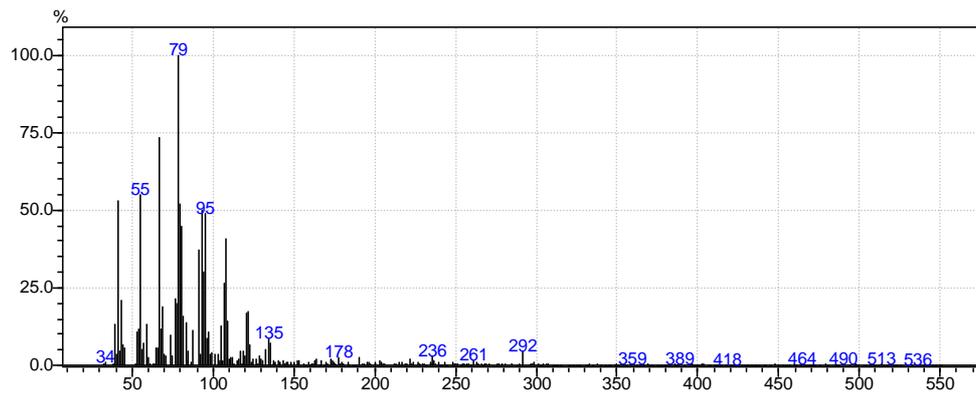
### Espectro de masas linoleato de metilo (Biodiesel)



### Espectro de masas linolenato de metilo (Estándar)



### Espectro de masas linolenato de metilo (Biodiesel)



## ANEXO 2. Especificaciones motor diesel serie RY 110

<b>Cilindros</b>	N.	1
<b>Desplazamiento</b>	cm <sup>3</sup>	442
<b>Diámetro</b>	mm	86
<b>Carrera</b>	mm	76
<b>Relación de compresión</b>		20.3:1
<b>Clasificación</b>	N (80/1269/CEE) ISO 1585	8.1/11.0
	NB ISO 3046 IFN	7.4/10.1
	NA ISO 3046 ICXN	6.8/9.3
<b>Max. Esfuerzo de torsión</b>	Nm	25@2200
<b>Min. Velocidad en neutro</b>		950÷1000
<b>Capacidad del depósito</b>	L	5
<b>Consumo de petróleo</b>	Kg/h	0.0048
<b>Capacidad de aceite del cárter</b>	L	1.5
<b>Min. Presión de aceite admisible</b>	bar	1÷1.5
<b>Max. Inclinación permisible para cortos periodos de operación (valores máximos)</b>		25° (35°)
<b>Vol. De aire necesario para la combustión correcta</b>	L/min	635
<b>Vol. De aire necesario para un correcto enfriamiento</b>	L/min	5500
<b>Peso en seco</b>	Kg	45
<b>Recomendado de la batería</b>	V/Ah	12-44