

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE GRASA
RESIDUAL AVÍCOLA**

INGRID JUDYTH ROJAS SOLANO

LEIDY TATIANA DUEÑAS LÓPEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE GRASA
RESIDUAL AVÍCOLA**

INGRID JUDYTH ROJAS SOLANO

LEIDY TATIANA DUEÑAS LÓPEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:
Ingeniera Química**

Director:

FREDY AVELLANEDA VARGAS

Doctor en Ingeniería Química Ambiental y Procesos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

A Dios por darnos el inmenso regalo de la vida y por acompañarme con su infinito amor, sabiduría, perseverancia, fortaleza y perdón a lo largo de este caminar.

A mi familia, donde la vida comienza y el amor nunca termina, porque juntos lo tenemos todo:

A mi madre Ana, la roca de nuestro hogar, a quién dedico todos mis triunfos, por ser el mejor regalo de vida, por enseñarme a volar aún sin tener alas sin olvidar que estas se construyen día a día y que se llega tan lejos como se sueña.

Gracias infinitas por dedicar su vida por mis hermanas y por mí, siendo el mejor ejemplo de mujer que lo da todo con amor y bondad; gracias a Dios porque me concedió el privilegio de venir al mundo con un ángel incluido, mi madre.

A mi padre Alirio por su confianza y por enseñarme desde niña a ser fuerte, luchadora y por permitirme aprender de todas sus experiencias de vida.

A mi hermana Monica por sacrificarse para ser un excelente ejemplo, por creer y sentirse orgullosa de mi a lo largo de la vida y por hacer de mis triunfos los suyos; a mi hermana Saydi por su paciencia, cariño y alegría, por siempre recibirme con un abrazo y una sonrisa reparadora; a mis hermanas gracias por hacer hasta lo imposible para guiarme, por amarme y hacer mi vida más fácil.

A mis amigos, Yarli, Paola, Laura, Oscar, Jordan, Geraldine y Alejandra por la compañía y confidencialidad a lo largo de los años, por crecer como personas integras juntos y por siempre brindarme su más sincero afecto.

Ingrid Judyth Rojas Solano

A Dios por todas las bendiciones que me ha otorgado a lo largo de mi vida y permitirme esta oportunidad porque su tiempo es perfecto.

A mi madre, el ser más importante de mi vida, gracias por creer en mí y apoyarme desde el primer momento que esta maravillosa universidad me abrió sus puertas, gracias por haber soportado en este tiempo tantas cosas tanto buenas como malas, gracias a ti soy la persona que soy hoy en día y amo a escalas inimaginables que aceptes y ames a la persona en quien hoy me he convertido. Siempre serás mi mayor admiración, porque ese espíritu luchador que tienes es el que nos ha sacado adelante a Jennifer y a mí, el que a pesar de todas las adversidades nos ha ayudado a levantarnos de todos los tropiezos.

A mi padre, que, a pesar de no tener siempre su compañía y su interés, siempre estaré agradecida por brindarme el regalo más importante que un hijo puede tener: la educación y siempre lo amaré a pesar de las circunstancias.

A mi hermana, que siempre estuvo ahí para apoyarme, para darme ánimo, para hablar de este idioma ingenieril que tanto nos gusta, nos enamora y nos apasiona. Gracias por escucharme, por darme ese consejo que siempre necesito y la admiro mucho y sé que se convertirá también en una grandiosa ingeniera.

A Sergio Andrés, muchísimas gracias por todo su amor, apoyo, consejo, compañía durante todo este camino que hemos escrito juntos. Es inmedible la ayuda que me brindó durante la realización de este sueño y sé que muchas cosas nos esperan por vivir.

A Esteban, Danna, Paula, Katrin, Dayanna, Silvia, Tatiana, Cesar y demás compañeros de la Selección de Natación de la UIS, con quienes compartí grandes momentos, experiencias y quienes se convirtieron en personas importantes en mi vida y sobretodo que son un ejemplo de superación y disciplina.

Leidy Tatiana Dueñas López

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y especialmente a la Escuela de Ingeniería Química, a todos los profesores, personal administrativo y técnico por la formación dada y los conocimientos adquiridos.

Al Doctor Fredy Avellaneda Vargas, director del trabajo de grado por la confianza, paciencia, colaboración y por compartir con nosotras su conocimiento y experiencias profesionales.

Al grupo de investigación INTERFASE y sus integrantes, especialmente a los ingenieros Claudia Tavera y Sebastián Vecino por la disposición de tiempo, ayuda y apoyo.

Al ingeniero Guillermo Aceros y al químico Joaquín Orozco, por la disposición de los recursos, laboratorio, tiempo y paciencia durante la realización de las pruebas.

A la empresa Mac Pollo por el suministro de la materia prima.

A Dios y nuestra familia por el amor, fortaleza, perseverancia y apoyo durante todos estos años.

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 19 |
| 1.1 BIODIÉSEL | 21 |
| 1.1.1 Obtención de Biodiésel..... | 22 |
| 1.1.2 Esterificación ácida:..... | 23 |
| 1.1.3 Transesterificación:..... | 23 |
| 1.1.4 Control de calidad del biodiésel: | 24 |
| | |
| 2. METODOLOGÍA | 25 |
| 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA..... | 26 |
| 2.1.1 Propiedades físicas:..... | 26 |
| 2.1.2 Propiedades Químicas:..... | 27 |
| 2.2 PRE TRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA..... | 27 |
| 2.2.1 Pruebas preliminares: | 27 |
| 2.2.2 Caracterización del aceite pre tratado: | 28 |
| 2.3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL | 29 |
| 2.3.1 Diseño experimental factorial 2^3 | 29 |
| 2.3.2 Reacción de Transesterificación alcalina:..... | 30 |
| 2.3.3 Caracterización del biodiesel: | 30 |
| | |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 32 |
| 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA..... | 32 |
| 3.1.1 Propiedades físico químicas del aceite crudo:..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2 PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA | 34 |
| 3.2.1 Pruebas preliminares: | 34 |
| 3.3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL | 37 |
| 3.3.1 Diseño experimental factorial 2 ³ | 37 |
| 3.3.2 Transesterificación alcalina:..... | 38 |
| 3.3.3 Caracterización del Biodiésel..... | 39 |
| | |
| CONCLUSIONES | 47 |
| RECOMENDACIONES..... | 48 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |
| BIBLIOGRAFÍA | 57 |
| ANEXOS..... | 60 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Composición de algunas grasas de origen animal y vegetal [6] | 20 |
| Tabla 2. Condiciones de la reacción de transesterificación alcalina para el diseño experimental factorial..... | 29 |
| Tabla 3. Propiedades del aceite crudo residual aviar medidas y comparadas con otros autores..... | 32 |
| Tabla 4. Condiciones de las pruebas preliminares | 34 |
| Tabla 5. Comparación de las propiedades físico químicas del aceite de pollo, aceite esterificado y biodiésel comparado con la norma EN 14214. | 45 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Reacción de esterificación [16] | 23 |
| Figura 2. Reacción de transesterificación [18]. | 24 |
| Figura 3. Diagrama de las etapas de investigación..... | 25 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Gráfica 1. Resultados del IA y % de rendimiento de las pruebas preliminares | 36 |
| Gráfica 2. Resultados del Índice de Acidez y Rendimiento para la reacción de transesterificación alcalina para las pruebas del diseño experimental..... | 38 |
| Gráfica 3. Densidad del biodiésel obtenido para cada uno de las pruebas..... | 40 |
| Gráfica 4. Viscosidad cinemática medida a 40°C para cada una de las pruebas. | 42 |
| Gráfica 5. Resultados del %FAME del biodiésel obtenido. | 43 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| ANEXO A NORMA UNE EN ISO 660: ACEITES Y GRASAS ANIMALES DE ORIGEN ANIMAL Y VEGETAL. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACIDEZ Y DE LA ACIDEZ | 60 |
| ANEXO B EN 14103: PRODUCTOS DERIVADOS DE ACEITES Y GRASAS. ESTERES METÁLICOS DE ÁCIDOS GRASOS (FAME). DETERMINACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE ESTER Y ESTER METÁLICO DE ÁCIDO LINOLÉICO..... | 61 |
| ANEXO C NTC 335 GRASAS Y ACEITES ANIMALES Y VEGETALES. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN | 62 |
| ANEXO D DISEÑO DE EXPERIMENTOS: DISEÑO FACTORIAL 2 ³ | 63 |
| ANEXO E CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DEL METANOL Y EL CATALIZADOR EN LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN..... | 64 |
| ANEXO F NORMA EN 14214..... | 65 |
| ANEXO G CONDICIONES DE CROMATOGRAFÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL %FAME..... | 66 |
| ANEXO H RESULTADOS DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL 2 ³ PARA ÍNDICE DE ACIDEZ Y RENDIMIENTO | 67 |

| | |
|---|----|
| ANEXO I RESULTADOS DEL %FAME PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL 2 ³ Y ETAPAS | 68 |
| ANEXO J CONSOLIDADO DE RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL 2 ³ | 69 |
| ANEXO K GRÁFICAS DE HUMEDAD, OBTENIDAS MEDIANTE PRUEBA TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) | 70 |
| ANEXO L CROMATOGRAMA DE LA MEJOR CONDICIÓN PARA LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN | 71 |
| ANEXO M EVIDENCIA FOTOGRÁFICA | 72 |

GLOSARIO

| | |
|------------------------------------|---|
| RMA | Relación molar Alcohol: Aceite |
| RMAE | Relación molar Alcohol: Aceite esterificado |
| ARA | Aceite residual avícola |
| AEA | Aceite esterificado avícola |
| BAA | Biodiésel aceite avícola |
| FAME | (Fatty Acids Methyl Ester) Metil ésteres de ácidos grasos |
| KOH | Hidróxido de Potasio |
| NaOH | Hidróxido de Sodio |
| H₂SO₄ | Ácido sulfúrico |
| IA | Índice de acidez |
| IS | Índice de saponificación |
| AGL | Ácidos grasos libres |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE GRASA RESIDUAL AVÍCOLA.*

AUTOR: INGRID JUDYTH ROJAS SOLANO

LEIDY TATIANA DUEÑAS LÓPEZ**

PALABRAS CLAVE: Grasa residual avícola, esterificación ácida, transesterificación alcalina, biodiésel, FAME, índice de acidez.

DESCRIPCIÓN:

Las grasas residuales de la industria de origen animal producen un efecto nocivo en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, pues interfieren con el intercambio de gases y promueven la acidificación del agua junto con bajos niveles de oxígeno disuelto. El aprovechamiento de este tipo de compuestos oleaginosos, promueve soluciones desde el punto de vista energético y ambiental mediante la obtención de biocombustibles. El objetivo principal de esta investigación fue obtener y caracterizar el biodiésel como fuente alternativa de energía con el fin de mejorar el rendimiento con el uso de aceite residual avícola (ARA) a las mejores condiciones. Para ello, se caracterizó físico químicamente el aceite y se estudiaron etapas de pre tratamiento con el fin de obtener un aceite con el menor índice de acidez y con menos impurezas. Para la obtención de biodiésel, se implementó un diseño experimental factorial 2³, teniendo en cuenta como variables la relación molar metanol: aceite (RMA), cantidad de catalizador, tipo de catalizador y dejando constante el tiempo de reacción, temperatura y agitación. Posteriormente se realizó la caracterización físico química del biodiésel con el fin de comparar con las exigencias de la norma EN 14214, en la cual se logró cumplir con propiedades como el %FAME, viscosidad cinemática e índice de acidez. Finalmente, se logró establecer que no se hace necesario un pre tratamiento que incluya el desgomado del aceite residual avícola, basta con la realización de una esterificación ácida y en cuanto a la obtención de biodiésel, las mejores condiciones para obtenerlo y que cumpla con la normatividad son: RMA 6:1, 0,5 % de KOH a 60°C y 2 horas de reacción en la cual se obtuvo un rendimiento del 95,1% BAA/AEA y FAME de 97,84%.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D. Fredy A. Avellaneda Vargas.

ABSTRACT

TÍTULO: OBTAINING AND CHARACTERIZING BIODIESEL FROM POULTRY RESIDUAL OIL.*

AUTHOR: INGRID JUDYTH ROJAS SOLANO

LEIDY TATIANA DUEÑAS LÓPEZ**

KEYWORDS: Poultry residual oil, acid esterification, alkaline transesterification, biodiesel, FAME, acid value.

DESCRIPTION:

Residual fats from the animal industry have a harmful effect on wastewater treatment systems, as they interfere with gas exchange and promote acidification of water together with low levels of dissolved oxygen. The use of this type of oleaginous compounds, promotes solutions from the point of view of energy and environment through the obtaining of biofuels. The main objective of this research was to obtain and characterize biodiesel as an alternative energy source to improve performance with the use of residual poultry oil (ARA) under the best conditions. For this purpose, the oil was physical chemical characterized and pretreatment stages were studied to obtain an oil with the lowest acid value and with less impurities. To obtain biodiesel, a factorial experimental design 2^3 was implemented, considering as variables the molar ratio methanol: oil, amount of catalyst, type of catalyst and leaving constant the reaction time, temperature and agitation. Subsequently, the physical chemical characterization of biodiesel was performed to compare with the requirements of EN 14214, in which properties such as % FAME, kinematic viscosity and acid value were achieved. Finally, it was possible to establish that a pretreatment is not necessary that includes the degumming of the poultry residual oil, it is sufficient to carry out an acid esterification and in the obtaining of biodiesel, the best conditions to obtain it and that complies with the regulations are: RMA 6:1, 0,5% KOH at 60 ° C and 2 hours reaction in which a 95,1% BAA / AEA yield and FAME of 97,84%.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Engineering Physical Chemical. School of Chemical Engineering. Director: Ph.D. Fredy A. Avellaneda Vargas.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el constante consumo de energía por parte de la humanidad nos ha llevado a un incremento en la explotación del petróleo, dicha actividad ha incurrido negativamente en el equilibrio ambiental; así, día a día la perforación de petróleo amenaza las áreas naturales y los parques del mundo entero, interrumpiendo la vida silvestre, eliminando la vegetación y afectando las fuentes de agua, aire y salud de todos los seres vivos; además, en los últimos años se ha observado una fluctuación en los precios del crudo y sus derivados principalmente porque hay un desequilibrio entre la oferta y la demanda y la disponibilidad del petróleo no es uniforme dado que es un recurso natural no renovable. Por otra parte, los fenómenos geopolíticos y la no precisión en las proyecciones del mercado incurren directamente en la inestabilidad económica del mismo [1], siendo éste un problema para la industria que depende del petróleo como fuente de energía para su óptimo funcionamiento.

A su vez, los combustibles fósiles derivados del uso del petróleo han contribuido directamente con la contaminación atmosférica por emisión de gases tóxicos y el calentamiento global debido a la emisión de gases efecto invernadero tales como material particulado (MP), óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), entre otros; dichos gases no sólo tienen efecto sobre el medio ambiente, daños a las construcciones y a los materiales, sino también sobre la salud ocasionando la disminución de la visibilidad, problemas respiratorios y cardíacos [2]; por lo que dentro de las alternativas de mitigamiento de dicha problemática se presenta la implementación del biocombustible derivado de grasas animales residuales como sustituto del diésel derivado del petróleo en forma parcial o total [3].

En cuanto a la materia prima actualmente las industrias productoras de biodiésel usan constantemente aceites vegetales, sin embargo, su uso se avalúa entre un 70-95% en el costo total en la producción del biodiesel [4], además, poseen un alta

demanda y compiten con el sector alimenticio y farmacéutico [5], mientras que las grasas animales procedentes de mataderos e industrias de transformación animal son consideradas de bajo costo para el mercado y posee una gran oferta debido al constante sacrificio animal del cual se derivan estas grasas; así pues, se buscó proporcionar una solución energética a partir de la obtención de biodiésel usando como materia prima el residuo graso avícola (ARA) el cual permite el desarrollo industrial dando un valor agregado a este residuo y minimizando la contaminación de las industrias avícolas.

Considerando que el uso del ARA va a ser para la producción de biodiésel, el criterio clave para valorar esta grasa es su contenido energético neto, el cual varía en función de: la especie, edad del animal, productividad, tipo de dieta y temperatura ambiental, depende fundamentalmente de su contenido en energía bruta y su digestibilidad intestinal [6]. A continuación, en la Tabla 1, se presenta una comparación entre la composición en ácidos grasos de algunas grasas de origen vegetal y animal

Tabla 1. Composición de algunas grasas de origen animal y vegetal [6]

| Ácidos Grasos | Formula | Grasas de origen animal | | Grasas de origen vegetal | | | |
|---------------|---------|-------------------------|-------------|--------------------------|---------|-------|--------|
| | | Sebo | Grasa pollo | Palma | Girasol | Oliva | Linaza |
| Mirístico | C14:0 | 3,2 | 1,0 | 1,0 | - | - | - |
| Palmítico | C16:0 | 24,8 | 21,0 | 42,5 | 6,1 | 10 | 6,5 |
| Palmitoleico | C16:1 | 3,2 | 5,4 | - | - | - | - |
| Esteárico | C18:0 | 21,3 | 7,1 | 4,8 | 4 | 3,5 | 5 |
| Oleicos (cis) | C18:1 | 38,3 | 41,0 | 40,1 | 22,5 | 79 | 21 |
| Linoléico | C18:2 | 2,0 | 20,5 | 9,7 | 62,2 | 6,3 | 13 |
| Linolénico | C18:3 | - | 1,6 | - | <1,0 | - | 51 |
| Araquidónico | C20:0 | - | 1,8 | - | 1,1 | - | 1,0 |

En este trabajo se presenta un estudio experimental a escala de laboratorio, orientado a la continuidad en las investigaciones realizados por Díaz y Ramírez, quienes establecieron las mejores condiciones para el pre tratamiento del ARA

(aceite residual avícola) como materia prima [7], por ende esta experimentación se basa en el avance y profundización de la producción de biodiesel a partir de la transesterificación de ARA por medio de una catálisis alcalina (KOH ó NaOH) partiendo de las condiciones de pre tratamiento señaladas por el estudio realizado anteriormente; las variables analizadas fueron la relación molar metanol:aceite y la cantidad de catalizador; buscando la reproducibilidad y las mejores condiciones para producir biodiésel de calidad que cumpla con algunas especificaciones técnicas estipuladas en las normas internacionales para combustibles diésel haciendo énfasis en la obtención de un porcentaje de FAME superior al 96,5% y un alto rendimiento, los cuáles en trabajos previos no se habían alcanzado.

1.1 BIODIÉSEL

En Colombia, en el 2001, se aprobó la obligatoriedad de la mezcla del diésel con el biodiésel y se empezó la utilización del biodiésel a raíz de la ley 939 del 2004, esta medida fue implementada principalmente por temas medioambientales y por la preocupación de la escasez de los combustibles fósiles [8]. El biodiésel es un combustible biodegradable líquido que se obtiene a través de un proceso de transesterificación; la ASTM (American Society for Testing and Materials) define el biodiésel como un compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas animales, y que se emplea en los motores de ignición de compresión (motores diésel) o en calderas de calefacción [9].

Entre las principales ventajas del uso del biodiésel se encuentra que tiene mayor lubricidad que el diésel fósil por lo que extiende la vida útil de los motores, se degrada de 4 a 5 veces más rápido que el diésel y hasta puede ser usado como solvente para limpiar derrames de diésel, es más seguro de transportar pues su punto de inflamación (150°C) es 100°C mayor que el del diésel y permitiría al productor agrícola abastecerse de combustible, además, porque la transformación de la materia prima agrícola para su producción, promueve la inclusión social de los

campesinos, no genera bióxido de azufre, SO_2 , gas muy contaminante, entre otros. Sin embargo, actualmente se ha encontrado que a bajas temperaturas, reduce su fluidez lo que conlleva a ocasionar problemas en el motor, además el contenido energético es entre un 8 y un 12% menor que el del diésel fósil, por lo que su consumo es ligeramente mayor [10,11].

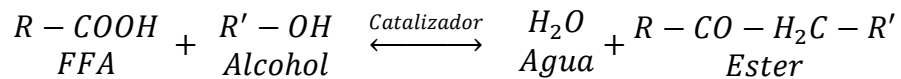
En Colombia actualmente los combustibles fósiles siguen dominando el mercado, no obstante, los biocombustibles están en auge ya que su producción se hace a partir de biomasa, residuos orgánicos, aceites vegetales y/o grasas animales que reducen las emisiones de gas carbónico. La fabricación de biocombustibles está regulada por las leyes 693 de 2001 y 939 de 2004 que pretenden incentivar la producción nacional y definir los precios, las calidades y los porcentajes de mezclas. Se reporta una producción de biodiésel de palma africana de 525.000 toneladas anuales provenientes de Cesar, Cundinamarca, Magdalena, Atlántico, Meta y Santander, siendo el sector transporte quien acapara el mercado para reemplazar la gasolina y el diésel [12,13].

En cuanto al uso de biocombustibles en Colombia, las mezclas actuales disminuyen las emisiones de gases efecto invernadero en más de 2,5 millones de toneladas de gas carbónico y la reducción de importaciones de 12.000 barriles diarios de combustibles fósiles [14].

1.1.1 Obtención de Biodiésel: Dado que ciertas grasas animales contienen cantidades significativas de AGL (ácidos grasos libres) y que a su vez estas no pueden ser convertidas a biodiésel usando catalizadores alcalinos puesto que favorece la producción de jabones quienes impiden la separación del éster, glicerina y agua de lavado [15], se hace necesario la realización de una reacción de esterificación que permita la disminución de AGL y favorezca la transesterificación que es la reacción usada para la producción del biodiésel.

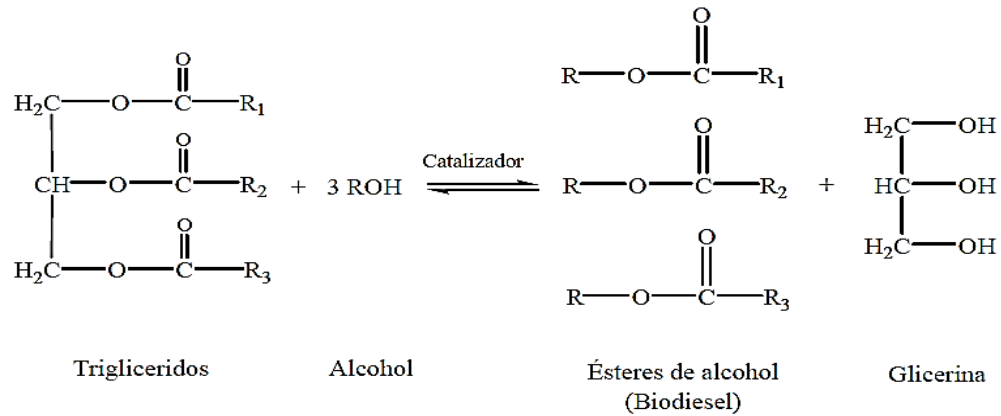
1.1.2 Esterificación ácida: El objetivo de la esterificación es convertir los AGL en ésteres; los ésteres se producen cuando los ácidos carboxílicos de una grasa animal se calientan con alcoholes de cadena corta en presencia de un catalizador ácido, los utilizados comúnmente son ácidos minerales fuertes tales como ácidos sulfúrico y clorhídrico; así, los AGL se convierten en monoésteres por medio de esta reacción que es lenta y reversible, además, la velocidad de la reacción y la variación de la constante de velocidad se ven afectadas por variables tales como temperatura, intensidad del catalizador y proporción de reactivos [16].

Figura 1 Reacción de esterificación [16]



1.1.3 Transesterificación: Es una reacción que se da entre 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 para mejorar la reacción y el rendimiento dando lugar a una mezcla de esteres alquílicos (biodiésel) y glicerol por medio de una serie de pasos en donde el triglicérido es convertido en diglicérido, monoglicérido y finalmente a glicerol. La transesterificación es una reacción de equilibrio; sin embargo, en esta reacción se utiliza un exceso de alcohol para desplazar el equilibrio de la reacción hacia el lado derecho y producir más ésteres metílicos como producto principal [5], [17].

Figura 2. Reacción de transesterificación [18].

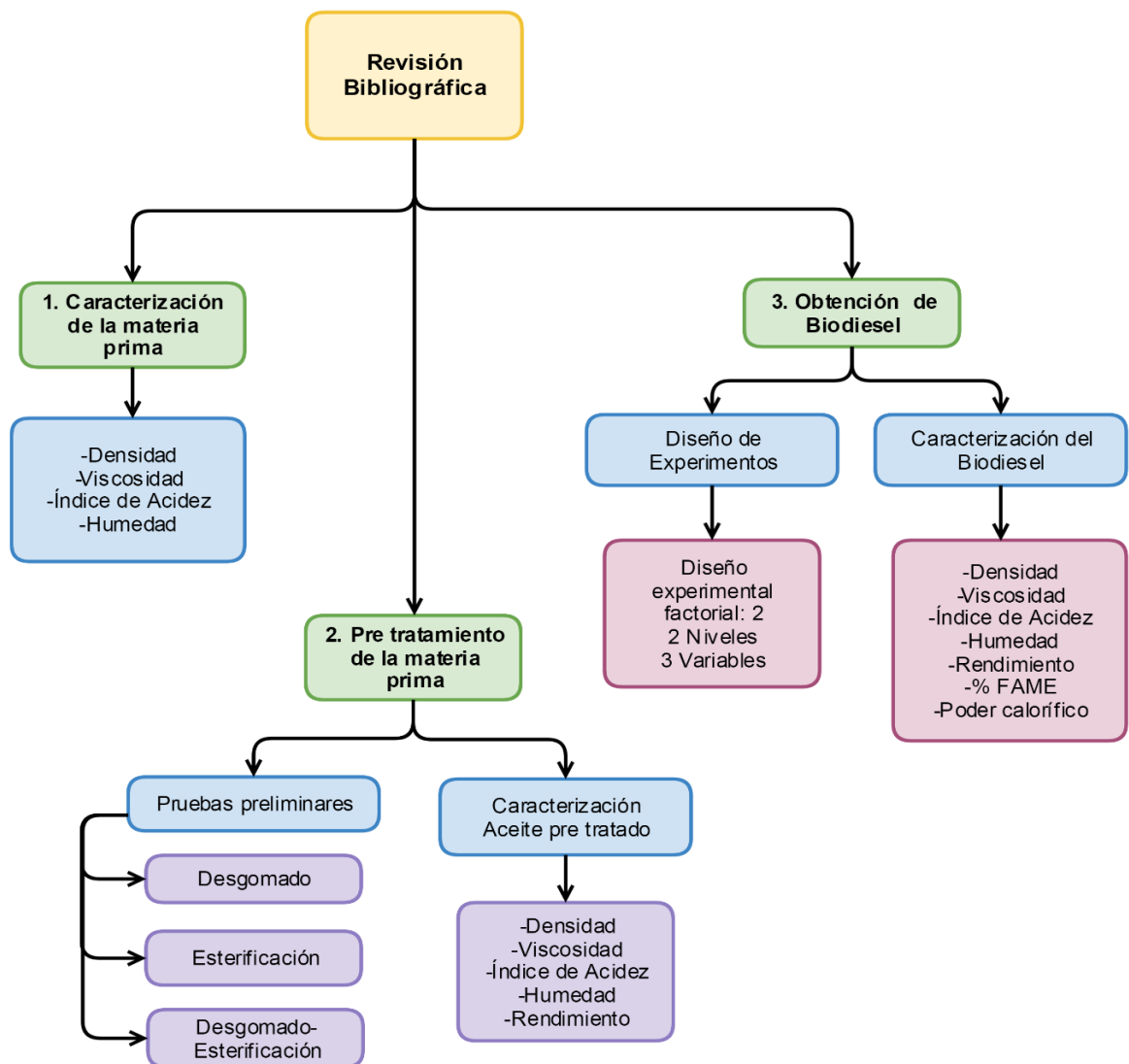


1.1.4 Control de calidad del biodiésel: La calidad del biodiésel se regula en Colombia mediante la NTC 5444 [19], la cual señala las especificaciones del biocombustible para su uso en motores diésel, por otra parte, la norma EN 14214 (Ver ANEXO F) describe los parámetros de calidad del biodiésel como combustible. Estas normas definen los límites y los métodos de prueba para determinar las propiedades físico químicas más importantes del biodiésel como densidad, viscosidad, contenido de metil ésteres (FAME), estabilidad oxidativa, humedad, índice de acidez (IA), índice de saponificación (IS), entre otras.

2. METODOLOGÍA

Para la investigación llevada a cabo, se establecieron 3 etapas con el fin de determinar las mejores condiciones para aumentar el rendimiento y la pureza del biodiésel. Las actividades que incluyen estas etapas se encuentran resumidas en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de las etapas de investigación



2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El aceite de origen aviar fue suministrado por la empresa MAC POLLO S.A. quienes extraen esta grasa por medio de un proceso que se da como consecuencia del sacrificio aviar. Esta grasa es producida principalmente en la fase de evisceración en las plantas de beneficio donde se extraen órganos como el intestino, el corazón, los pulmones, entre otros [20]. En dicha empresa se hace un constante uso del agua de lavado en los procesos de limpieza y desinfección por lo que se generan las aguas residuales las cuales se someten a un proceso industrial por medio de trampas para separar las grasas de los demás residuos con el uso de un equipo llamado tridencanter [21]; el cual consiste en un sistema mecánico que, mediante una serie de compartimentos especiales en un tanque, separa del agua aquellos residuos sólidos y restos de grasa, evitando que avancen por el sistema de cañería y desagüe [22].

Una vez recibida esta materia prima se procedió a medir las siguientes propiedades para su caracterización:

2.1.1 Propiedades físicas:

Densidad: Se determinó mediante el método del picnómetro (2 ml), utilizando como fluido de referencia agua destilada a temperatura ambiente.

Viscosidad: Fue medida en un reómetro BROOKFIELD PROGRAMMABLE DV-III+RHEOMETER con punta SC4-18 a temperatura ambiente.

Humedad [mg H₂O/ Kg aceite]: Mediante una prueba termogravimétrica (TGA), en una balanza Discovery TA INSTRUMENTS, con las siguientes condiciones: una rapidez de calentamiento de 10°C/min, iniciando a temperatura ambiente hasta 500°C con flujo de nitrógeno de 60 ml/min [23].

2.1.2 Propiedades Químicas:

Índice de Acidez [mg KOH/ g aceite]: Se determinó este índice siguiendo las indicaciones y procedimientos consignados en la norma UNE EN ISO 660 descrita en el ANEXO A.

Índice de Saponificación: Siguiendo las indicaciones de la norma NTC 335 descrita en el ANEXO C.

2.2 PRE TRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

2.2.1 Pruebas preliminares: estas pruebas tuvieron como objetivo, identificar las mejores condiciones para pre tratar la materia prima con el fin de obtener un ARA con el menor índice de acidez, con menos impurezas, gomas y otros componentes. Para estas pruebas, se realizaron varios tratamientos para definir si se requieren una o varias etapas y así determinar con cuáles se obtienen mayores rendimientos y menores IA, como lo son: desgomado, desgomado-esterificación ácida y esterificación ácida.

Desgomado: Estas condiciones se obtuvieron a partir del estudio realizado por Avellaneda en su tesis doctoral. Se realizaron dos pruebas con desgomado, un desgomado con agua y un desgomado con ácido fosfórico.

Para el desgomado con agua, se pesaron 70 g de aceite, se calentó hasta llegar a una temperatura de 90°C, en seguida se le adicionó agua destilada en una proporción del 5% v/v durante 30 minutos y con agitación magnética permanente. Seguidamente, se llevó a centrifugación a 4500 rpm durante 5 minutos para eliminar trazas de agua y gomas. Finalmente se dejó enfriar, se secó en una plancha de calentamiento a 90°C y 300 rpm, se pesó y se llevó a almacenamiento [24].

Por otra parte, para el desgomado con ácido fosfórico se pesaron 70 g de muestra, se calentó hasta llegar a una temperatura de 70°C, en seguida se le agregó lentamente una solución de ácido fosfórico equivalente al 5% v/v del ARA y se dejó en calentamiento durante 30 minutos a 300 rpm. Luego se llevó la mezcla a un

embudo de decantación para retirar la fase acuosa inferior. Finalmente, se realizaron 3 lavados con el 30% del total del ARA de agua destilada y se dejó secar a 90°C durante 90 minutos. Se dejó enfriar y se pesó para luego llevarlo a su posterior almacenamiento [24].

Esterificación ácida: Mediante el estudio realizado por Díaz y Ramírez en una fase previa a esta investigación, se utilizaron las condiciones para la esterificación ácida, manteniendo como variables fijas el tiempo de reacción, RMA y cantidad de catalizador, pues se quería comprobar la reproducibilidad de los resultados obtenidos en dicho estudio [7].

Se realizaron pruebas a pequeña escala (50 g) y a mayor escala (300 g). Se pesaron las muestras, se adicionó el metanol y el ácido sulfúrico como catalizador, calculados según la estequiometría y se llevaron a reacción en un balón fondo plano de 100 ml y 500 ml respectivamente, en baño maría hasta alcanzar los 60°C, con agitación constante (300 y 600 rpm respectivamente) y con reflujo para evitar pérdidas de metanol por evaporación como se muestra en el ANEXO M.

El tiempo de reacción fue de 150 minutos, luego se trasladó la mezcla a un embudo de decantación por dos horas. Transcurrido este tiempo, se separó el metanol y las gomas (fase superior) del AEA (aceite esterificado aviar) (fase inferior) y se procedió a realizar 5 lavados con agua destilada a 90°C y una relación agua: aceite de 30% v/v [6]. Posteriormente, se secó el AEA durante una hora a 90°C, se pesó y se llevó a almacenamiento en frascos ámbar [25]. Por último se realizó la medición del IA según indicaciones de la norma UNE EN ISO 660 (Ver ANEXO A).

2.2.2 Caracterización del aceite pre tratado: Con el fin de establecer las mejores condiciones para el pre tratamiento del aceite y realizar una comparación entre el ARA y el AEA, se calculó el rendimiento (AEA/ARA) y se midió la densidad, viscosidad, humedad, IA e IS como lo especifican las normas UNE EN ISO 660 y NTC 335 respectivamente (ANEXO A y ANEXO C).

2.3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

Para la obtención de biodiésel se esterificaron 800,60g de ARA según lo especificado en el numeral 2.2.1. Para la reacción de transesterificación se realizaron pruebas a partir de las condiciones utilizadas por Ramírez García [25], de las cuales se obtuvieron buenos resultados en cuanto al rendimiento y %FAME. En comparación con el estudio de Ramírez, se utilizaron como catalizadores KOH y NaOH y se dejaron las mismas concentraciones de catalizador (0,5% y 1%) y las mismas RMAE (Relación molar metanol: aceite esterificado) (6:1 y 9:1), puesto que con estas condiciones se ha demostrado en varios estudios que se obtiene una mejor conversión del aceite para la obtención del biodiésel [18].

2.3.1 Diseño experimental factorial 2³: Se tuvieron en cuenta 3 variables: RMAE, cantidad de catalizador y tipo de catalizador (KOH y NaOH); con dos niveles en cada uno. Es por ello que el diseño de experimentos escogido para esta investigación fue el diseño experimental factorial 2³ (2 niveles, 3 variables), obteniéndose 8 pruebas y cada una de ellas con réplica para un total de 16 experimentos (Ver ANEXO D). Las condiciones elegidas fueron obtenidas a partir de la bibliografía y se muestran en la Tabla 2 [25-35].

Tabla 2. Condiciones de la reacción de transesterificación alcalina para el diseño experimental factorial.

| Variable | Condiciones |
|---|-------------|
| Relación molar metanol: aceite esterificado | 6:1/ 9:1 |
| Cantidad de catalizador [%p/p] | 0,5/ 1,0 |
| Tipo de catalizador | KOH/ NaOH |
| Variables Constantes | Condiciones |
| Agitación | 300 rpm |
| Temperatura | 60 °C |
| Tiempo | 120 min |

2.3.2 Reacción de Transesterificación alcalina: Todas las pruebas de reacción de transesterificación del AEA se llevaron a cabo en un balón fondo plano de 250 ml con agitación constante de 300 rpm durante 120 minutos, en baño maría a 60°C y con reflujo para evitar pérdidas por evaporación del metanol. Se pesaron aproximadamente 50 g de AEA y se llevó al montaje anteriormente descrito hasta alcanzar la temperatura de reacción, simultáneamente se mezcló el metanol junto con el catalizador alcalino (KOH o NaOH), en las cantidades calculadas estequiométricamente (Ver ANEXO E) para ser adicionadas posteriormente al aceite.

Luego de las dos horas de reacción, se llevó la mezcla a un embudo de decantación por 20 horas [25]. Transcurrido este tiempo se separó la glicerina (fase inferior oscura) del biodiésel (fase superior), y se procedió a realizar 4 lavados del biodiésel hasta alcanzar un pH neutro del agua residual de lavado; dos lavados con agua acidulada, preparada con una concentración de 2 ml de ácido fosfórico al 10% p/p/litro; dos con agua destilada manteniendo la proporción agua: biodiésel del 30% p/p. Enseguida, se llevó el biodiésel a la centrífuga a 4500 rpm durante 5 minutos y se secó en la estufa a 105°C durante 150 minutos. Finalmente, se dejó enfriar, se pesó con el fin de encontrar el rendimiento (biodiésel/aceite avícola BAA/AEA) y se almacenó en frascos ámbar de 100 ml.

2.3.3 Caracterización del biodiesel: Se determinó el rendimiento de todos los experimentos de acuerdo al peso del biodiésel obtenido con respecto al aceite esterificado (BAA/AEA) pesado antes de la reacción. Además, se determinaron las siguientes propiedades:

Propiedades físicas: A todas las muestras del biodiésel obtenido se les midió la densidad a 15°C y la viscosidad a 40°C, mientras que la humedad se determinó a la muestra con el mejor %FAME; siguiendo las condiciones y equipos presentados en el numeral 2.1.1.

Propiedades Químicas: En cuanto al índice de acidez, se midió para cada una de las muestras incluyendo réplica y con respecto al índice de saponificación, se determinó para el biodiésel con mejor %FAME; aplicando las condiciones y métodos explicados en el numeral 2.1.2.

Poder calorífico superior: Se realizó en una bomba calorimétrica C200, esta prueba es efectuada por el método de la norma ASTM D240, cuyo resultado se determina en MJ/Kg [36].

%FAME: Se midió el %FAME según lo establecido en la norma EN 14103 resumida en el ANEXO B. Se utilizó un cromatógrafo de gases AGILENT TECHNOLOGIES 7890A GC SYSTEM, siguiendo el método descrito en el ANEXO G.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima fue suministrada por la empresa Mac Pollo S.A ubicada en Floridablanca en el departamento de Santander; quienes lo obtienen mediante el uso de un equipo llamado tridecanter, el cual separa el agua de aquellos residuos sólidos y restos de grasa como se describió en el numeral 2.1. El ARA tiene características muy diferentes a las de los aceites vegetales, las principales diferencias físicas son su color en un tono café oscuro y la presencia de partículas e impurezas. Además, a temperatura ambiente se encuentra como un líquido bastante viscoso, con un olor fuerte característico del pollo (Ver ANEXO M).

3.1.1 Propiedades físico químicas del aceite crudo: Para estandarizar la producción de biodiésel inicialmente se caracterizó el ARA, los resultados de densidad, viscosidad, humedad, IA e IS se muestran en la Tabla 3, en donde se comparan con los estudios realizados por otros autores.

Tabla 3. Propiedades del aceite crudo residual aviar medidas y comparadas con otros autores.

| Propiedad Autor | Densidad [Kg/m ³] | Viscosidad Cinemática [mm ² /s] | Humedad [%] | IA [mg KOH/ g aceite] | IS [mg KOH/ g aceite] |
|-------------------------|----------------------------------|--|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Contreras I. [37] | 870 | - | - | - | 194,4 |
| Ramírez I. [38] | 907,4 | 42,9 | - | 6,60 | 203 |
| Abdul M. [39] | 930 | 30,0 | - | 0,16 | 224 |
| Chia-Wel L. [18] | - | - | - | 0,13 | 148,62 |
| Sankar S. [34] | - | 41,66 | - | 4,76 | - |
| Edmilson A. [40] | - | - | - | 2,28 | 182,5 |
| Rodríguez L. [3] | 876 | - | - | 2,77 | - |
| Galeano C. [5] | 934,2 | 43,38 | 14,29 | 0,362 | 170,94 |
| Díaz K [7] | 893,4 | 336 | 0,29 | 10,75 | 197,37 |
| Presente estudio | 919,25 | 67,84 | 0,23 | 4,31 | 278,02 |

De la Tabla 3 se puede observar que las propiedades que presentan una mayor diferencia entre los valores medidos en este estudio y los reportados por otros autores son la viscosidad cinemática y el IS; estas diferencias están directamente relacionadas con la genética de las aves de las cuales proviene esta materia prima, la composición de los AGL, el tipo de proceso de extracción del aceite residual, las condiciones climáticas y su respectivo manejo y almacenamiento.

Con respecto al IA obtenido (4,31 mg KOH/ g ARA) se observa que supera los valores reportados por Galeano C. (0,36 mg KOH/ g ARA) y Abdul M. (0,16 mg KOH/ g ARA), entre otros, no obstante, se observan mejores resultados que los obtenidos por Díaz K. (10,75 mg KOH/ g ARA) y Ramírez I. (6,60 mg KOH/ g ARA) por las razones expuestas anteriormente y a su vez porque este ARA no cuenta con ningún tipo de pretratamiento; sin embargo, a pesar de que el ARA presenta mejores propiedades en comparación con algunos autores no es suficiente puesto que cuando su IA es superior a 2 mg KOH/ g ARA, la transesterificación básica no puede realizarse directamente sobre la materia prima debido a la formación de jabón [35]; es por esto que se hace necesaria la realización de un pre tratamiento previo a la materia prima que garantice un IA menor a 2 mg KOH/ g ARA y la obtención de un ARA de buena calidad para posteriormente realizar el proceso de transesterificación.

Por otro lado, el IS también es una medida para calcular el peso molecular promedio de los ácidos grasos presentes en el aceite y es inversamente proporcional al peso molecular del mismo [35]. Dicho lo anterior y en lo que se refiere a este estudio, el IS de 278,02 mg KOH/ g aceite que es mayor comparado con los otros autores como Galeano, C. [5], Lin, Chia-Wei [18] y otros; lo que sugiere que el peso molecular del aceite usado para este estudio es bajo y éste disminuye las cantidades estequiométricas de metanol y catalizador necesarios para la reacción de transesterificación, haciéndola una materia prima de bajo consumo de insumos y de buenas propiedades para la obtención del biocombustible.

3.2 PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

3.2.1 Pruebas preliminares: La Tabla 4 muestra las condiciones de cada uno de los tratamientos realizados al ARA.

Tabla 4. Condiciones de las pruebas preliminares

| Prueba | Aceite crudo [g] | Desgomado | | Esterificación | | |
|--------|------------------|--------------|------------------------|-----------------------------|--|--------------|
| | | Agua [% v/v] | Ácido fosfórico [%v/v] | Relación molar Metanol: ARA | % Catalizador H ₂ SO ₄ | Tiempo [min] |
| 1 | 70.0559 | 5 | - | 7.5 | 1.5 | 60 |
| 2 | 50.0131 | 5 | - | 7,5:1 | 1.25 | 150 |
| 3 | 70.0139 | - | 5 | - | - | - |
| 4 | 50.0227 | - | - | 6:1 | 0.5 | 30 |
| 5 | 50.0077 | - | - | 7,5:1 | 1.25 | 150 |
| 6 | 300.01 | - | - | 7,5:1 | 1.25 | 150 |
| 7 | 300.11 | - | - | 7,5:1 | 1.25 | 150 |
| 8 | 300.03 | - | - | 7,5:1 | 1.25 | 150 |
| 9 | 300.02 | - | - | 7,5:1 | 1.25 | 150 |

En la Tabla 4, se observa que se realizó un tratamiento de desgomado con ácido fosfórico y dos con agua, buscando eliminar las gomas y otras impurezas y 8 tratamientos de esterificación ácida. Con estas pruebas preliminares se buscó determinar los parámetros necesarios para el acondicionamiento del ARA de modo que se logre el ajuste de las propiedades físico químicas principalmente la disminución del IA el cuál es un factor importante en el proceso de transesterificación.

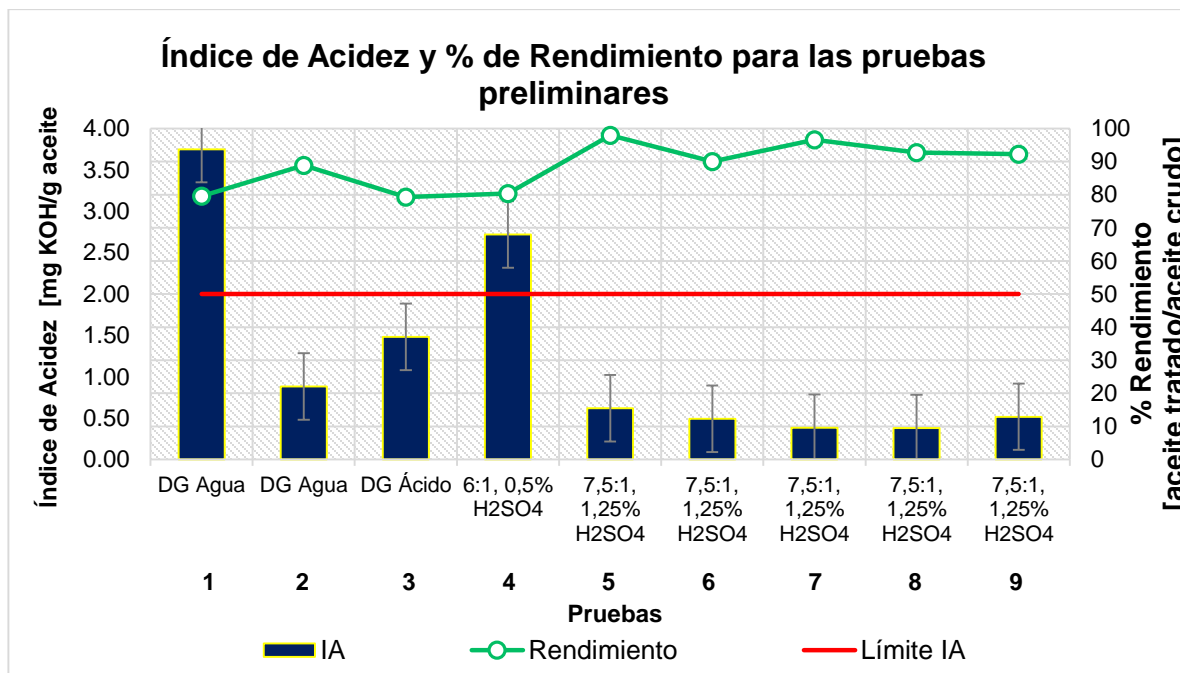
Una vez finalizados los pre tratamientos se realizaron las caracterizaciones de estas muestras, como lo muestra la Gráfica 1, donde se observa que todos los pretratamientos lograron reducir el IA, sin embargo, las pruebas 1, 2 y 3, en las cuales se realizó el desgomado no se reduce significativamente este valor al límite del IA y el rendimiento no es el mejor si es que se quiere llevar este pre tratamiento a una escala mayor en donde los precios de las materias primas y los reactivos juegan un papel importante. Adicionalmente, en el desarrollo de las pruebas de

desgomado con ácido fosfórico fue evidente que el ácido degrada y destruye la materia prima volviéndola de un color muy oscuro. En el secado, se probó una temperatura de 110°C [7], sin embargo, se concluyó que la temperatura de secado no debe ser mayor a 100°C ya que a esta temperatura se observa una alteración en el color de la muestra, lo cual no es favorable para la obtención del biodiésel (Ver ANEXO M).

En la prueba 4 se logró reducir el IA, solo en una pequeña proporción, de ahí que, se concluye que el tiempo es un factor importante en la reacción de esterificación y en las siguientes pruebas (4 a 9), se estableció un tiempo de 150 min dado que como se mencionó anteriormente el tiempo de reacción afecta el IA como lo expone Ramírez Y. quién experimentó a diferentes RMA, tiempos, temperaturas y tipos de catalizador [25].

Por otro lado, en lo que corresponde a las RMA y concentración de catalizador (H_2SO_4) se comprobó con la prueba 4 que a bajas RMA y bajas concentraciones de catalizador, no se obtienen buenos resultados en cuanto al rendimiento (80,34% AEA/ARA) y al IA (2,72 mg KOH/g AEA). Como se afirmó anteriormente la disminución del IA se presenta a partir de la prueba 5 con valores menores a 1 mg KOH/g AEA y rendimientos superiores al 88% AEA/ARA; la prueba 8 presentó el menor valor de IA con 0,38 mg KOH/g AEA, mientras que la prueba 5 presentó el mayor rendimiento, reportando un 97,95 % de AEA/ARA.

Gráfica 1. Resultados del IA y % de rendimiento de las pruebas preliminares



En estudios realizados por la Universidad de Caldas realizan esterificación ácida para aceite residual de fritura, se encontró que con RMA de 6:1 y 5:1 y cantidad de catalizador del 1,5% se alcanza un IA entre 1 y 2 mg KOH/g aceite [42], por otro lado, Jishy, K y Sankar, S. realizaron esterificación al ARA con una RMA de 6:1 y un 6% de catalizador ácido clorhídrico y obtuvieron IA menores al 1% mg KOH/g [34]; como se puede observar en el estudio de aceite de fritura no se obtienen IA bajos posiblemente a causa de la baja RMA usada, en cuanto el segundo estudio a pesar de obtenerse un buen resultado se observa una alta demanda de catalizador.

En este estudio se descartó el pre tratamiento con desgomado pues no reduce significativamente el IA y no representa un buen rendimiento de AEA/ARA. Además, se reafirma que la mejor condición para esterificar el aceite es RMA 7,5:1, 1,25% p/p de catalizador ácido (H₂SO₄) y 150 minutos de reacción a 60°C, lo cual confirma

los estudios realizados por Díaz y Ramírez del cual se deriva esta investigación [6], así pues, se observa una vez más la reproducibilidad del pretratamiento para grasas animales sugerido por Ramírez Y. y se hace énfasis en la importancia que trajo consigo esta investigación pues como se mencionó anteriormente se estandariza un pre tratamiento para grasas residuales animales que permite la obtención de IA bajos similares a los reportados por Jishy K y la conversión de un aceite residual de baja calidad a un aceite con propiedades similares a los aceites vegetales pre tratados [25].

3.3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

El biodiésel se obtuvo por medio de transesterificación alcalina implementando el método descrito en el apartado 2.3.2.

3.3.1 Diseño experimental factorial 2³: Se realizaron 8 pruebas, cada una de ellas con réplica para un total de 16 experimentos, las variables, rendimientos y otras propiedades se encuentran en el ANEXO J. Como se mencionó en el apartado 2.3.1 el diseño experimental consta de tres variables tales como:

Relación molar metanol: aceite esterificado: Fueron usadas RMAE de 6:1 y 9:1; puesto que teóricamente la relación estequiométrica para la formación de metil ésteres es de 3:1, no obstante como es una reacción de equilibrio y con el fin de favorecer la formación de metil ésteres, los estudios anteriores han demostrado que se logra la máxima conversión cuando se trabaja con una relación superior e igual a 6:1 [23], por otra parte, se seleccionaron relaciones que permitan alto rendimiento con el menor uso del metanol ya que su constante uso eleva directamente los costos en la producción de biodiésel [43].

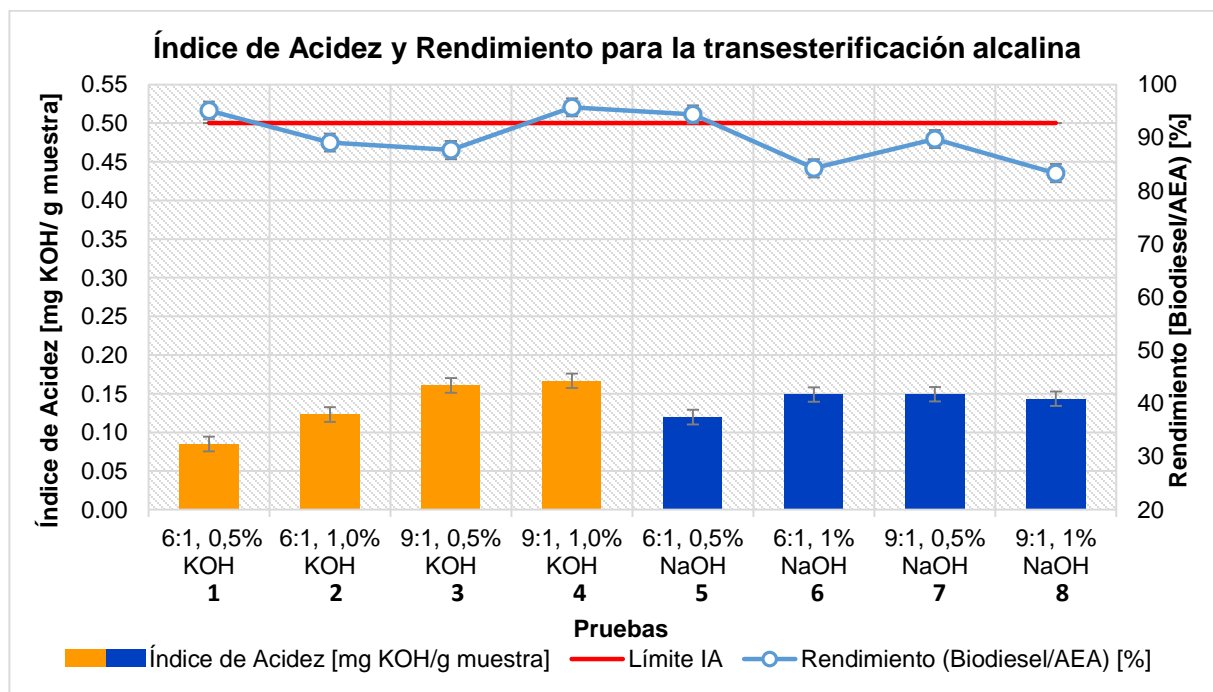
Cantidad de catalizador: Se establecieron porcentajes del 0.5% y 1% puesto que a partir del 0.5% se ha encontrado que se logra una óptima conversión del AEA y a su vez se contribuye a la minimización en la producción de jabones, el cuál es uno

de los principales problemas en lo que concierne a la producción de biodiésel y es por esto que se justifican los bajos porcentajes de catalizadores alcalinos usados [43].

Tipo de catalizador: Los catalizadores usados fueron KOH y NaOH porque son fácilmente asequibles en el mercado, poseen un bajo costo, se disuelven fácilmente en el metanol y a su vez en investigaciones anteriores se ha demostrado que aumentan la conversión del aceite en metil ésteres [43].

3.3.2 Transesterificación alcalina: La Gráfica 2 muestra los resultados del rendimiento y el IA del biodiésel obtenido. Se puede observar que todas las pruebas cumplieron satisfactoriamente el valor del IA pues estuvieron muy por debajo del valor límite que exige la norma EN 14214 (0,5 mg KOH/ g BAA) (Ver ANEXO F).

Gráfica 2. Resultados del Índice de Acidez y Rendimiento para la reacción de transesterificación alcalina para las pruebas del diseño experimental.



Para las pruebas catalizadas por NaOH (5A, 5B, 6A, 6B, 7A, 7B, 8A y 8B) en el momento del secado se evidenció que la mayor parte de este se encontraba gelificado, lo cual nos da una primera impresión para descartarlo como un biodiésel comercial de calidad, pues no cumple con la reglamentación requerida, por el contrario, las pruebas catalizadas por KOH no presentaron jabones ni ningún tipo de sustancias saponificables.

Los experimentos 1A Y 1B (RMA 6:1 y 0,5 % de KOH) se seleccionan como las mejores puesto que reportan los mejores IA, es decir los más bajos y altos rendimientos; a pesar de que en la prueba 4 se obtuvo un mayor rendimiento (95,68% BAA/AEA) esta no se selecciona como la mejor porque necesita una mayor cantidad de materia prima e insumos (metanol y catalizador) y comparado con el rendimiento de la prueba 1 (95,10% BAA/AEA), no se justifica el aumento en los costos de producción con respecto al mínimo cambio en el rendimiento entre estas dos pruebas.

El IA obtenido del BAA fue de 0,08 mg KOH/g BAA y el rendimiento de 95,1 BAA/AEA, estos valores son menores a los reportados por Alptekin E. de 0,25 mg KOH/g BAA (RMA 6:1 y 1% de KOH); sin embargo, Canesin et al. reportó un IA de 0,71 mg KOH/g BAA (RMA 6:1 y 1,25% de KOH) [15], [40]. Las diferencias obtenidas por estos autores son de menor proporción y están directamente relacionadas con el tipo de aceite y el pre tratamiento dado; además, como se observa se difiere de algunos parámetros de transesterificación, no obstante la gran mayoría de los autores logran cumplir con la norma EN 14214 y corroboran que un bajo IA permite una larga vida del biodiésel puesto que no se degrada fácilmente [45].

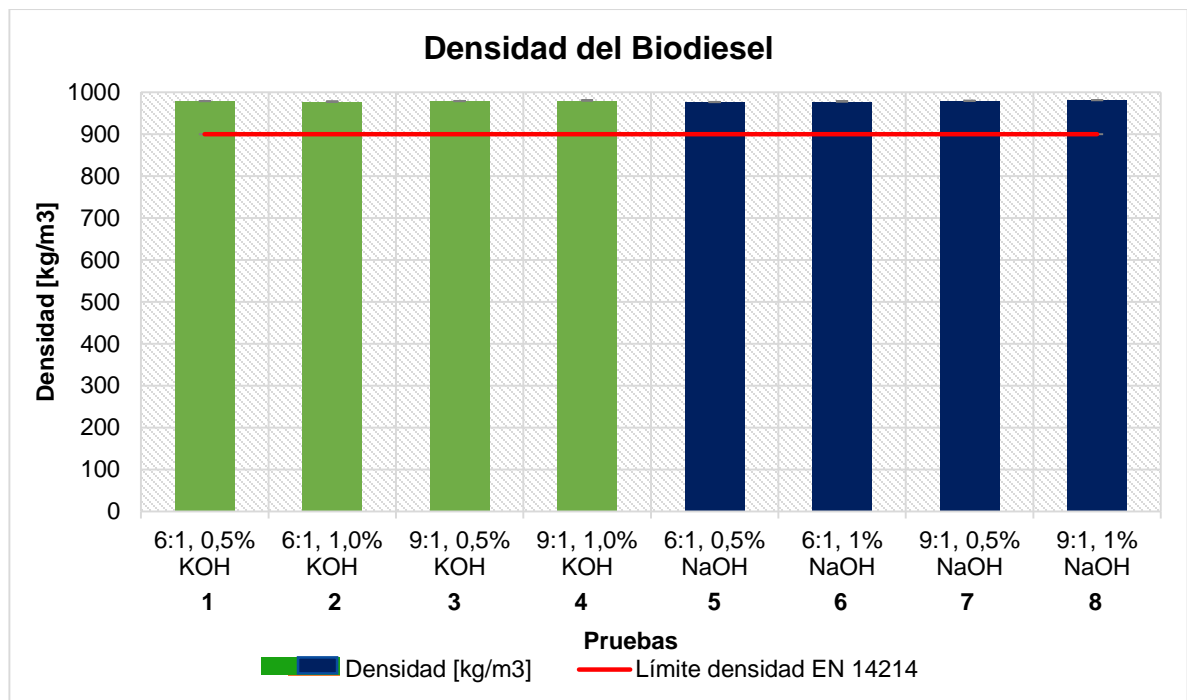
3.3.3 Caracterización del Biodiésel

Densidad: Basados en la norma ASTM D4052 que establece un rango permitido para la densidad de 860 a 900 Kg/m³ y como se observa en la Gráfica 3, no se

cumple la norma puesto que la densidad de las 8 pruebas realizadas de biodiésel y sus respectivas réplicas superan este valor oscilando entre 973,9 y 981,6 Kg/m³; por el contrario Abdul M, Belgharza M. y Ribwark K. reportan una densidad de 890, 882 y 880 Kg/m³ respectivamente [33], [46], [33]; lo cual evidencia un alto valor de densidad en este estudio, por lo que se hace necesaria la inyección de más biocombustible en masa, además, causa un aumento en las emisiones de material particulado, NOx y afecta el poder calorífico del BAA [49].

La longitud de la cadena, los enlaces dobles y el nivel de saturación del biodiésel aumentan la densidad al igual que las condiciones del ARA y la pureza de los insumos usados para su producción [24]; sin embargo, una alternativa para mejorar esta propiedad es trabajar el biodiésel en mezcla con diésel, en Colombia, actualmente, se mezcla un 7% de biodiésel con el diésel en el centro oriente del país y, en el resto, un 10%, de ahí que a partir de esta mezcla se espera una disminución del valor de la densidad para llegar al cumplimiento de la norma.

Gráfica 3. Densidad del biodiésel obtenido para cada una de las pruebas.



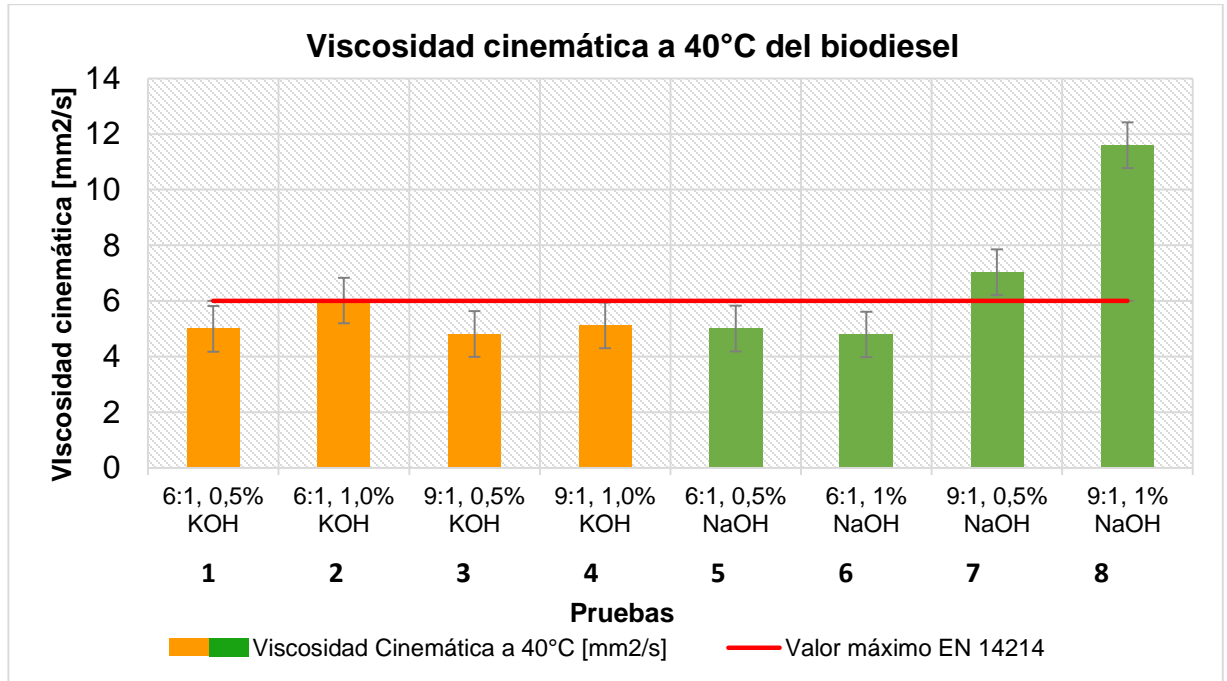
Viscosidad: El estudio de la viscosidad fue otro factor importante en esta investigación pues ésta posee un impacto significativo en el funcionamiento del combustible del motor, sistemas de inyección y atomización.

Como se puede observar en la Gráfica 4, las pruebas 2, 7 y 8 no cumplen con la viscosidad estipulada en la norma ASTM D 445, la cual establece un máximo de 6 mm²/s, las causas de este no cumplimiento son la gelificación del biodiesel ya que hace que el líquido posea dificultad para fluir puesto que la viscosidad cinemática se ve afectada debido a la influencia de los sólidos disueltos, por lo tanto, se descartan estas pruebas ya que se busca que el biodiésel fluya sin problemas por los sistemas de inyección para evitar daños tales como desgastes del motor y ensuciamiento del inyector en los vehículos. Sin embargo, las pruebas restantes si cumplieron con lo establecido para la propiedad de viscosidad.

Otros autores reportan valores de viscosidad cercanos como Alptekin E. con 5,1 mm²/s y Moreira A. 4,52 a 6,13 mm²/s [15], [45]; resaltando el hecho de que esta propiedad depende directamente de la estructura y la composición del ARA utilizado para la producción de biodiésel, tal que la viscosidad se incrementa a medida que aumenta la longitud de la cadena carbonada y el grado de saturación en la misma.

Adicionalmente, si la conversión no ha sido completa se va a obtener un valor más alto de viscosidad lo cual está directamente relacionado con la realización de un pre tratamiento a la materia prima pues en este proceso se basa el buen resultado y obtención de un biodiésel de excelente calidad [5, 7, 34, 38]; además, se observa en las pruebas 1, 2, 3, 4, 7 y 8 que a mayor cantidad de catalizador usado mayor es la viscosidad puesto que los catalizadores son básicos y favorecen la formación de jabones en las muestras.

Gráfica 4. Viscosidad cinemática medida a 40°C para cada una de las pruebas.



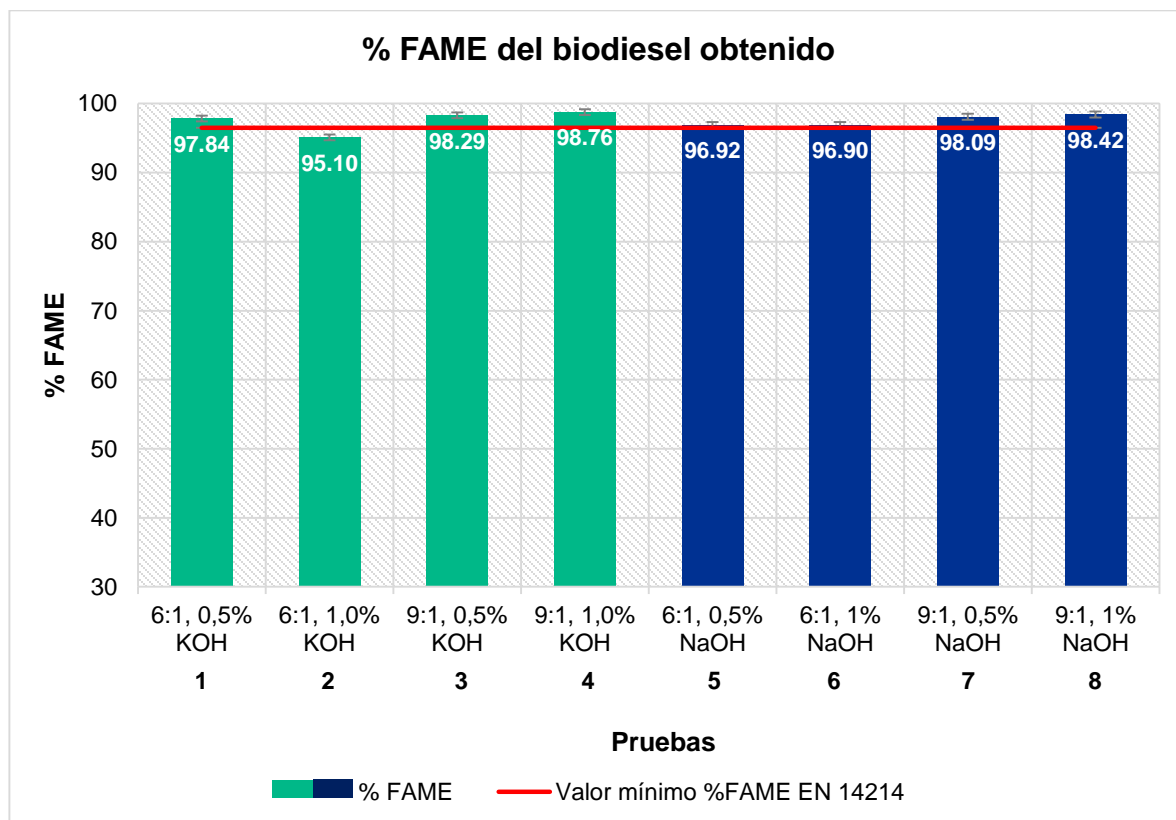
%FAME: De la .

Gráfica 5, se puede observar que el 87,5% de las pruebas lograron sobrepasar el valor mínimo exigido por la norma para el %FAME: 96,5% y se evidencia que a mayor contenido de metanol, mayor es el contenido de %FAME obtenido [31]. Además, un aumento en el uso de metanol genera mayor residuo (glicerina) después de la decantación lo cual indica un exceso de alcohol desperdiciado [24].

Dicho lo anterior, si se comparan las pruebas 1 y 4, la prueba 4 (RMA 9:1 y 1% KOH) tiene el mejor %FAME de todas las pruebas, pero si se tienen en cuenta aspectos como las cantidades y precios para la obtención de biodiesel, la mejor prueba es la prueba 1 (RMA 6:1 y 0,5% KOH) con un 97,84% ya que reduce la cantidad de metanol y catalizador usado y además entra en el valor exigido por la normatividad.

Este valor (97,84%), es muy similar si se compara con los valores reportados por otros autores como Tamariz M. con un 99,7% (RMA 6:1 y 1% KOH) [31] y Sankar S. con un 99,80% (RMA 6:1 y 1% KOH) [48]. Hay que mencionar que las pruebas 5 a 8, a pesar que tuvieron un buen resultado para el %FAME, no se consideran relevantes para elegir las como las mejores pues se gelificaron, porque los AGL en el aceite reaccionan con el NaOH en presencia de agua y forman jabones, éstos a su vez tienden a solidificarse a temperatura ambiente y forman una masa sólida difícil de remover y que no es conveniente a la hora de circular el biodiésel por el motor [47, 34].

Gráfica 5. Resultados del %FAME del biodiésel obtenido.



Humedad: La humedad del biodiésel obtenido a la mejor condición de transesterificación (RMA 6:1, 0.5% KOH) es de 3260 ppm lo cual es notablemente alto, se cree principalmente que puede ser un error puesto que no se midió por medio del método Karl Fischer (KF) por titulación coulométrica, el cual, es uno de los más precisos. Además, se deben tener en cuenta las condiciones de almacenamiento de las muestras ya que el biodiésel es higroscópico gracias la presencia de los monoglicéridos y los diglicéridos que no reaccionaron [49] y a su vez provoca un aumento en el IA [52].

En el ANEXO K, se pueden ver las gráficas de variación del peso con respecto a la temperatura de las pruebas realizadas de TGA para la determinación de la humedad, sin embargo, esta propiedad al no ser medida con exactitud no se considera concluyente en la toma de decisiones para el cumplimiento del objetivo del presente estudio.

Comparación de las propiedades físico químicas del ARA, AEA y BAA: El aceite esterificado utilizado para la obtención del biodiésel, también fue caracterizado físico químicamente con el fin de comparar las propiedades del aceite crudo hasta la obtención del biodiésel. La Tabla 5, muestra la comparación de las propiedades físico químicas del ARA, AEA y BA según las condiciones de reacciones anteriormente especificadas y el biodiésel obtenido en las mejores condiciones de reacción y a su vez se comparan con las especificaciones de la norma EN 14214.

Tabla 5. Comparación de las propiedades físico químicas del aceite de pollo, aceite esterificado y biodiésel comparado con la norma EN 14214.

| Propiedad físico química | Aceite de pollo | Aceite esterificado | Biodiésel 6:1 0,5%KOH | Norma EN 14214 |
|--|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| Densidad [Kg/m ³] | 919,25 | 1008,15 | 978,58 | 860-900 |
| Viscosidad cinemática a T amb [mm ² /s] | 67,84 | 48.38 | - | - |
| Viscosidad cinemática a 40°C [mm ² /s] | - | - | 4,99 | 3,5-5 |
| Humedad [%] | 0,230 | 0,937 | 0,33 | 0,05 máximo |
| Índice de Acidez [mg KOH/g aceite] | 4,31 | 0,38 | 0,08 | 0,5 máximo |
| Índice de saponificación [mg KOH/g aceite] | 278,02 | 531,98 | 544,56 | - |
| FAME [%m/m] | - | - | 97,84 | 96,5 mínimo |
| Poder calorífico [MJ/Kg] | - | - | 39,73 | - |

De la Tabla 5, se puede observar que todas las propiedades físico químicas medidas del biodiésel, exceptuando la densidad y la humedad, cumplieron con los valores permitidos por la norma EN 14214. Sin embargo, al no cumplir con el parámetro de la densidad, no sería un biodiésel viable comercialmente, ya que la densidad es una propiedad clave que afecta el rendimiento del motor pues los sistemas de inyección del combustible diésel miden el combustible en volumen, por lo tanto un cambio de la densidad influirá en la potencia de salida del motor debido a una masa diferente de combustible inyectado [51]; sin embargo, como se mencionó anteriormente, el valor de densidad se puede ajustar a partir de la mezcla de biodiesel con diésel.

En el caso del IS, es muy alto comparado con los valores reportados por Nautiyal (213,18 mg KOH/ g muestra) [52] y Abdul (184 mg KOH/ g muestra) [39], lo que indica que el biodiésel obtenido necesita una mayor cantidad de KOH para poderlo

saponificar y por lo tanto lo hace menos susceptible de formar jabones, lo cual indica un buen resultado en cuanto a esta propiedad.

Por otro lado, el poder calorífico se encuentra ligeramente por debajo de los valores reportados por Arteaga (40,2 MJ/Kg) [53] y Zelaya (43,80 MJ/Kg) [54], sin embargo, si se compara con el poder calorífico del diésel (44,8 MJ/Kg) [55], no está muy lejano de este valor y se puede estudiar la viabilidad del biodiésel obtenido a partir del ARA para ser usado como mezcla con el diésel o también puede ser usado como combustible para calderas pirotubulares [56]. Se debe tener en cuenta que la presencia de humedad [51] y un aumento de la densidad del biodiésel [24] producen una disminución del poder calorífico.

También se puede concluir que con cada tratamiento realizado mejoraron las propiedades como: IA el cual disminuye considerablemente hasta obtener un valor muy por debajo del establecido por la norma EN 14214; el IS y la viscosidad cinemática que cumple con el valor exigido por la norma y que es un valor muy importante ya que esta propiedad de no ser la adecuada puede generar problemas en los sistemas de inyección de los motores y además participa en la lubricación de algunos mecanismos del motor [57].

Finalmente, la esterificación ácida es el pre tratamiento más favorable para la obtención de biodiésel ya que reduce la cantidad de AGL presentes en el ARA [50, 58-60], disminuye el IA y muestra mejores rendimientos comparados con otros tratamientos como el desgomado o la neutralización [61]; por otro lado se ratifica el uso de ácido sulfúrico como catalizador, el cual es un reactivo económico, de fácil acceso y que aumenta el rendimiento y desplaza el equilibrio hacia la derecha en la reacción de esterificación.

CONCLUSIONES

El aceite residual avícola es una materia prima con un gran potencial para la producción de biodiésel comercial pues con un apropiado pre tratamiento, las características físico químicas determinan un óptimo valor en el IA (menor a 2 mg KOH/g ARA), se puede afirmar que así se obtiene un bajo contenido de ácidos grasos libres, lo cual, es ventajoso para el proceso de transesterificación, ya que minimiza la formación de jabones y otras sustancias saponificables.

No se hace necesario un pre tratamiento que incluya el desgomado del ARA puesto que no se observa un cambio significativo en cuanto al IA, lo cual no justifica la inversión de un proceso que genera un considerable aumento en los costos de producción y una minimización en el rendimiento, dicho lo anterior basta con la realización de una esterificación ácida para obtener un ARA en buenas condiciones.

Las mejores condiciones para la transesterificación del AEA son RMA 6:1, 0,5 % de KOH a 60°C y 2 horas de reacción con las cuales se obtuvo un rendimiento del 95,1% BAA/AEA; en cuanto a las propiedades físico químicas del biodiésel se logró cumplir con la norma EN 14214 en cuanto al índice de acidez, viscosidad cinemática, %FAME de hasta 97,84%; pero no con la densidad. También se midieron propiedades como el índice de saponificación y poder calorífico y así se pudo establecer las mejores condiciones para obtener un biodiésel de calidad; cabe aclarar, que aunque con la relación RMA 9:1, 1% de KOH se obtuvieron mejores resultados en cuanto a %FAME y rendimiento, no se justifica el aumento en costos de producción si se cuenta con un ARA similar al tratado en este estudio, no obstante, si el aceite no es de buena calidad se debe trabajar con dichas condiciones puesto que se necesita un mejor tratamiento.

RECOMENDACIONES

Se recomienda usar la grasa residual en un lapso de tiempo menor a 3 meses puesto que se observó que ésta se degrada generando emulsiones que con llevan a la variación en los resultados y baja conversión del ARA.

Se deben guardar y almacenar las muestras de biodiésel en las mejores condiciones ambientales como luz, humedad y temperatura, pues éstas influyen en la degradación y pérdida de las propiedades importantes del biodiésel.

Adicionalmente, se recomienda realizar estudios de transesterificación alcalina por etapas, usando diferentes tipos de catalizadores como metilato de sodio, KOH y NaOH así como variar las concentraciones de catalizador, relación molar metanol: aceite y también se podría estudiar el efecto de la temperatura en este tipo de experimento, además, sería conveniente inyectar todo el ARA desde la primera etapa así se podría alcanzar una mayor conversión.

Como se observó en este estudio, la densidad posee un alto valor, por lo cual se sugiere un estudio posterior del uso de este biodiésel en otros campos diferentes a los del transporte, ya sea como combustible para calderas de calefacción, alimentación de generadores de electricidad, entre otros. También se sugiere realizar una prueba de mezcla con el diésel para comprobar que se reduce esta propiedad y así pueda cumplir con los parámetros requeridos por la normatividad

Se le pueden dar otros usos al ARA para la obtención de otros productos como bio lubricantes y polioles y así darle otro valor agregado a este residuo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oil Price. [Sitio web]. Oil Price Charts. (2017). [consulta: agosto 9 de 2017]. Disponible en: <http://oilprice.com/oil-price-charts>.
- [2] NANI, L; NANI A. Vehicle Emissions : What Will Change with Use of Biofuel ?. InTech open Science. (2013) p. 30.
- [3] TEJADA, C; VILLABONA, A; RODRIGUEZ, L. Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. Luna Azul ISSN 1909-2474, Universidad de Caldas. (2013) p. 36: 10-25.
- [4] AL-HAMAMRE, Zayed; YAMIN, Jehad. Parametric study of the alkali catalyzed transesterification of waste frying oil for biodiesel production. Energy Conversion and Management ISSN 0196-8904, vol. 79. (2014) p. 246-254.
- [5] GALEANO, C; GUAPACHA, E. Aprovechamiento y caraterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un biocombustible. Trabajo de Grado Químico Industrial. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira, 2011. 114 p.
- [6] MATEOS, G; REBOLLAR, P; MEDEL, P. Utilización de grasas y productos lipídicos en alimentación animal: grasas puras y mezclas. XII Curso de Especialización FEDNA: Avances en Nutrición y Alimentación Animal. Universidad Politécnica de Madrid, 1996. 18 p.
- [7] DÍAZ MERCHÁN, K. Y; RAMÍREZ VARGAS, K. J. Acondicionamiento del aceite residual avícola y evaluación preliminar de uso potencial en la obtención de biodiesel. Trabajo de Grado Ingeniería Química. Bucaramanga. Univerisdad Industrial de Santander, 2016. 86 p.
- [8] AVENDAÑO, T. R; HENRY, N. Colombia's Palm Oil Biodiesel Push. Environment and Biodiversity Issue Area of IRC's Americas Program. (2007). p. 3.

- [9] MANZANERA, M. Alternative Fuel. InTech ISBN 978-953-307-372-9. Croatia, 2011, p. 346.
- [10] RINKESH, K. Conserve Energy Future. [Sitio web]. ¿What is Biodiesel? Advantages of Biodiesel. (2017). [consulta: agosto 11 de 2017]. Disponible en: https://www.conserve-energy-future.com/advantages_disadvantages_biodiesel.php.
- [11] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Biodiesel handling and use guidelines. Office of Scientific and Technical Information and of Energy Efficiency and Renewable Energy. (2006). p.69.
- [12] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Biocombustibles en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. (2016). p. 22.
- [13] DEPARTAMENTO DE BIOCMBUSTIBLES. Biocombustibles en Colombia: un sector en consolidación. Ecopetrol S.A. vol.4. (2012) p. 5.
- [14] FEDERACIÓN NACIONAL DE BIOCMBUSTIBLES DE COLOMBIA. Biocombustibles hoy. Boletín N° 147. (2016). p. 6.
- [15] ALPTEKIN, E; CANAKCI, M; SANLI, H. Methyl ester production from chicken fat with high FFA. World Renewable Energy Congress, Bioenergy Technology, vol. 1. (2011). p. 319–326.
- [16] MARCHETTI, J. M; MIGUEL, V. U; ERRAZU, A. F. Heterogeneous esterification of oil with high amount of free fatty acids. Fuel, vol. 86. (2007). p. 906–910.
- [17] ENCINAR, J. M; GONZÁLEZ, J. F; RODRÍGUEZ, J. J; TEJEDOR, A. Biodiesel Fuels from Vegetable Oils: Transesterification of *Cynara cardunculus* L. Oils with Ethanol. Energy & Fuels, vol. 16. (2002). p. 443–450.
- [18] LIN, Chia-Wei; TSAI, Shuo-Wen. Production of biodiesel from chicken wastes

by various alcohol catalyst combinations. *Journal of Energy in South Africa*, vol. 26, No. 1. (2015). p. 36–45.

- [19] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana NTC 5444: Biodiesel para uso en motores Diesel. Especificaciones,” no. 571, 2006.
- [20] PEREZ, M. V; VILLEGAS, R. A. Procedimientos para el manejo de residuos orgánicos avícolas: Manual técnico. Trabajo de Grado Zootecnista. Medellín. Universidad de Antioquia., 2009. 71 p.
- [21] GRACIA PÉREZ, A. Separador de agua y aceite. p. 8. (n.d.).
- [22] WAS TECH. [En línea]. ¿Qué es una trampa de grasa y para qué sirve?: Gestión residuos peligrosos. Costa Rica. (2017). [Consulta: agosto 25 de 2017]. Disponible en: <http://wastechcr.com/2016/02/24/trampas-de-grasa/>.
- [23] MATEOS TRIGOS, M. L. Obtención de biodiesel utilizando aceites vegetales de reuso con radiación ultrasónica: Identificación de las mejores condiciones de transesterificación. Trabajo de Grado Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental. Querétaro. Universidad Autónoma de Querétaro, 2014. 69 p.
- [24] AVELLANEDA VARGAS, F. A. Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Tesis doctoral. Tarragona. Universitat Rovira I Virgili, 2010. 244 p. ISBN: 978-84-693-4594-8/DL:T.1007-2010.
- [25] RAMÍREZ GARCÍA, Y. A. Acondicionamiento del sebo de bovino residual como materia prima para la obtención de biodiesel. Trabajo de Grado Ingeniería Química. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2016. 87 p.
- [26] MARQUES, K, et al. Otimização Do Processo De Produção De Biodiesel Metílico Do Sebo Bovino Aplicando Delineamento Composto Central Rotacional e Superfície de Resposta. Tesis de Doctorado en Química.

Universidad Federal de Paraiba. Centro de Ciencias Exactas y de Naturaleza. Departamento de Química. 2008. 128 p.

- [27] ESPINOSA, M. et al. Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale, Fuel Processing Technology. (2009). no. 90, p. 570–575.
- [28] TEIXEIRA, L. et al. Comparison between conventional and ultrasonic preparation of beef tallow biodiesel. Fuel Processing Technology. (2009). no. 90, p. 1164–1166.
- [29] PRÁ, M.; CUNHA, J.; ABREU, P.; HIGARASHI, M. Transesterificação alcalina de resíduos de gorduras animais para obtenção de biodiesel. I Simposio Internacional sobre gerenciamento de Resíduos de Animales. Generación de Energía a partir de Resíduos de Animales, Florianópolis. (2009). p 63–68.
- [30] ONER, C; ALTUN S. Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine, Applied Energy. (2009). vol. 86, No. 10, p 2114–2120.
- [31] TAMARIZ, M., et al, Characterization of Biodiesel Produced from Chicken Fat and Pennycress Oil using Different Concentrations of Basic Catalysts, Journal of Agriculture and Environment Sciences. (2015). vol. 4, No. 1, p 127–133.
- [32] ABRAHAM, J. et al. Biodiesel Production from Broiler Chicken Waste, International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering. (2015). vol. 9, No. 12, p. 1154–1157.
- [33] ABDULRAHMAN, R. K. Sustainable Biodiesel Production from Waste Cooking Oil and Chicken Fat as an Alternative Fuel for Diesel Engine, European Scientific Journal. (2017). vol. 13, No. 3, p. 235–240.
- [34] JISHY, K.; SANKAR, S. Production of Biodiesel from Chicken Fat , Pork Fat and Combination of the above Two Feed Stocks. International Journal of Research in Mechanical Engineering. (2016). vol. 4, No. 3, p. 114.

- [35] VIVAS CASTAÑO, A. M. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino. Tesis Pregrado en Química Industrial. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología, Escuela de Química. 2010. 136 p.
- [36] ASTM. Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. An American National Standard. (2007). p. 9.
- [37] ANDRADE, I. C., et al. Transesterification Reaction of Waste Cooking Oil and Chicken Fat by Homogeneous Catalysis. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, vol. (2014). p 736–743.
- [38] RAMÍREZ ORTIZ, J.; ROSALES, M. M.; ZÚÑIGA, H. F., Production of Biodiesel from Roasted Chicken Fat and Methanol: Free Catalyst. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. vol. 8, No. 9. (2014). p 961–964.
- [39] ABDUL, M.K, et al. Comparative Production of Biodiesel from Waste Chicken Fats and Cooking Oil. *Journal of Biofuels*. (2014). vol. 5, no. 1, p 32–40.
- [40] CANESIN, E. A.; et al. Characterization of residual oils for biodiesel production. *Electronic Journal of Biotechnology*. (2014). vol. 17, no. 1, p 39–45.
- [41] RODRÍGUEZ, J., et al. Índice De Saponificación De Cinco Mantecas Determinado Mediante Un Micrométodo. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. (2016). vol. 1, no. 1, p 937–942.
- [42] MEDINA, M; OSPINO, Y; TEJADA L. Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. *Luna Azul* ISSN 1909-2474/ DOI: 10.17151/luaz.2015.40.3. (2015). No. 40, pp. 25–34.
- [43] SANLI, H. y CANAKCI, M. Effects of Different Alcohol and Catalyst Usage on Biodiesel Production from Different Vegetable Oils. *Energy & Fuels*, vol. 22, No. 4. (2008). p. 2713–2719.

- [44] PIZARRO, G. Biodiesel Production From Poultry Fat. Trabajo de Grado Mestrado integrado em engenharia do ambiente. Universidade do Porto, 2011. 62 p.
- [45] MOREIRA, A. L. Produção de biodiesel a partir de gordura de frango. Tese de Mestrado em Engenharia Química, Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Académico. Universidade do Porto, 2009. 61 p.
- [46] BELGHARZA, M., et al. Study of manufacturing biodiesel from waste animal fats (chicken) in Morocco. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. (2014). vol. 6, No. 12, p 844–849.
- [47] CANAKCI, M; SANLI, H. Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology. (2008). vol 35. No 5, p 431–44.
- [48] JISHY, K.; SANKAR, S. Production of Biodiesel from Chicken Fat , Pork Fat and Combination of the above Two Feed Stocks. International Journal of Research in Mechanical Engineering. (2016). vol. 4, No. 3, p. 114.
- [49] ZULETA , E. C.; RIOS, L. A.; CALDERÓN, J. A., Estudio de la estabilidad oxidativa de biodiésel de aceite de palma en contacto con materiales metálicos y poliméricos automotrices. Revista de Ingeniería y Competitividad. (2012). vol. 90, No. 2, p 83–90.
- [50] LAMOUREUX, J., Diseño conceptual de una planta de biodiesel. Trabajo de Grado Ingeniero Civil Mecánico. Santiago de Chile. Universidad de Chile. 2007. 137 p.
- [51] ALPTEKIN, E.; CANAKCI, M. Determination of the density and the viscosities of biodiesel diesel fuel blends. Renewable Energy. (2008). vol. 33, No. 12, p 2623–2630.
- [52] NAUTIYAL , P.; SUBRAMANIAN , K. A.; DASTIDAR, M. G. Production and characterization of biodiesel from algae. Fuel Processing Technology. (2014).

vol. 120, No. 1, p 79–88.

- [53] ARTEAGA, H, et al. Efecto de la temperatura y tiempo de transesterificación en el rendimiento y poder calórico de biodiesel a partir de grasa refinada de pollo. *Scientia Agropecuaria*. (2010). vol. 1, p 37–45.
- [54] ZELAYA GARCÍA, J. D. Evaluación De Materiales Vegetales Y Residuales Oleaginosos Para La Producción De Biodiesel en el Salvador. Trabajo de Grado en Ingeniería Química. San Salvador. Universidad de El Salvador. 2007. 231 p.
- [55] THE ENGINEERING TOOLBOX, Fuels - Higher Calorific Values. [Sitio Web]. 2016. [Consulta: Septiembre 16 de 2017]. Disponible en: http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html.
- [56] BULLA, E. A.; GUERRERO , C. A.; SIERRA, F. E. Producción de biodiésel por etanolisis utilizando aceites de fritura de hoteles y su uso en calderas pirotubulares. (2015). *Iteckne*, vol. 12, No. 1, p 44–53.
- [57] ARIAS, D. E.; TEUTA, C. A.; PARRA, J. Caracterización de las propiedades del biodiesel de girasol bajo la Norma NTC de 100/04 y medición de poder calórico. *Avances Investigación en Ingeniería*. (2011). vol. 8, No. 2, p 73–80.
- [58] KOMBE, G. G., et al. Pre-Treatment of High Free Fatty Acids Oils by Chemical Re-Esterification for Biodiesel Production—A Review, *Advances in Chemical Engineering and Science*. (2013). vol. 3, No. 3, p 242–247.
- [59] CORRO, G., et al. Biodiesel from waste frying oil. Two step process using acidified SiO₂ for esterification step. *Catalysis Today*. (2011). vol. 166, No. 1, p 116–122.
- [60] HAYYAN, A. et al., Reduction of high content of free fatty acid in sludge palm oil via acid catalyst for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*. (2011). vol. 92, No. 5, p 920–924.

- [61] KOMBE, G. G., et al. High Free Fatty Acid (FFA) Feedstock Pre-Treatment Method for Biodiesel Production. Second International Conference on Advances in Engineering and Technology. (2012). p 176–182.

BIBLIOGRAFÍA

ABDUL, M.K, et al. Comparative Production of Biodiesel from Waste Chicken Fats and Cooking Oil. Journal of Biofuels. 2014. vol. 5, no. 1, p 32–40.

ABDULRAHMAN, R. K., Sustainable Biodiesel Production from Waste Cooking Oil and Chicken Fat as an Alternative Fuel for Diesel Engine, European Scientific Journal, 2017. vol. 13, no. 3, p. 235–240.

ABRAHAM, J. et al., Biodiesel Production from Broiler Chicken Waste, International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering. 2015. vol. 9, no. 12, p. 1154–1157.

AENOR. 2017. “AENOR: Norma UNE-EN 14103:2011.” [Stio Web] (2011). [Http://www.aenor.es/](http://www.aenor.es/). AENOR. [Consulta: Junio 18 de 2017]. Disponible en: http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0048045#.WcBy5fmg_IU.

AVELLANEDA VARGAS, Fredy Augusto. Producción y Caracterización de Biodiesel de palma Y de aceite reciclado mediante un proceso Batch y un proceso Continuo Con Un Reactor Helicoidal. Tesis Doctoral.Tarragona. Universitat Rovira I Virgili. 2010. 244 p. ISBN:978-84-693-4594-8/DL:T.1007-2010.

DÍAZ K, RAMÍREZ K. Acondicionamiento del aceite residual avícola y evaluación preliminar de su uso potencial en la obtención de biodiesel. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2016. 86 p.

GALEANO L., ALFREDO, C., GUAPACHA E. Aprovechamiento y caracterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un Biocombustible.” Universidad Tecnológica de Pereira. 2011.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.1998. NTC 335: Grasas y Aceites Animales y Vegetales. Determinación del Índice de Saponificación, Bogotá D.C no. 571, 7 p.

JISHY, K.; SANKAR, S. Production of Biodiesel from Chicken Fat , Pork Fat and Combination of the above Two Feed Stocks. International Journal of Research in Mechanical Engineering. 2016. vol. 4, no. 3, p. 114.

MONTENEGRO, M., SIERRA, F., GUERRERO, C. Producción Y Caracterización de Biodiésel a Partir de Aceite de Pollo. Informador Técnico (Colombia). 2012. No. 76: 62–71.

MONTGOMERY, D., RUNGER G., Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería. 2 Ed. México. Mc Graw Hill, 2012. 486 p. ISBN 978-970-10101-74.

NORMA ESPAÑOLA-EUROPEA. 14214:2013 Automotive Fuels. Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for Diesel Engines. Requirements and Test Methods. 2013. ISBN 978-0-580 -70781-0. 22 p.

RAMÍREZ GARCÍA, Yusney Andrea. Acondicionamiento del sebo de bovino residual como materia prima para la obtención de biodiesel. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2016. 87 p.

TAMARIZ, M., et al, Characterization of Biodiesel Produced from Chicken Fat and Pennycress Oil using Different Concentrations of Basic Catalysts, Journal of Agriculture and Environment Sciences. 2015. vol. 4, no. 1, p 127–133.

ANEXOS

ANEXO A NORMA UNE EN ISO 660: ACEITES Y GRASAS ANIMALES DE ORIGEN ANIMAL Y VEGETAL. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACIDEZ Y DE LA ACIDEZ

El índice de acidez se define como el número de miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en un gramo de grasa.

- Se prepara la solución patrón (KOH en etanol) a una concentración de 0,1 mol/l y se verifica esta concentración con la neutralización de ácido benzoico disuelto en 4-metil-2-pentanona. Luego, se neutralizan 23 ml de 4-metil-2-pentanona con la solución patrón preparada.
- Para la preparación del patrón se disuelven de 0,05 a 1 g de ácido benzoico en la solución de 4-metil-2-pentanona neutralizada y posteriormente se neutraliza el patrón con la solución patrón preparada.
- Se miden 25 ml de 2- propanol con 4 gotas de fenolftaleína y se neutraliza con la solución patrón hasta producir un leve cambio de color, se pesa en un matraz una masa suficiente de muestra, se agrega el alcohol neutralizado a la porción de ensayo de aceite o grasa y se lleva a ebullición. Se valora con la solución patrón agitándose.

Finalmente, para calcular el índice de acidez se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{56,1 * V * c}{m}$$

Donde

V = Es el volumen en mililitros, de la solución volumétrica patrón de hidróxido de sodio o potasio usada, c = es la concentración exacta, en moles por litro, de la solución volumétrica patrón de hidróxido de potasio o de sodio usada, m = es la masa, en gramos, de la porción de ensayo.

ANEXO B EN 14103: PRODUCTOS DERIVADOS DE ACEITES Y GRASAS. ESTERES METÁLICOS DE ÁCIDOS GRASOS (FAME). DETERMINACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE ÉSTER Y ÉSTER METÁLICO DE ÁCIDO LINOLÉICO.

El propósito es determinar el contenido de éster de los ésteres metílicos de los ácidos grasos (FAME) destinados al uso como biocombustible puro o como un componente de las mezclas destinadas a calefacción o a combustibles diésel. Permite verificar que el contenido de ésteres de los FAME es superior al 90% (m/m) y que el contenido en el ácido linolénico está comprendido entre el 1% (m/m) y el 15% (m/m)

El método resulta adecuado para FAME que contengan ésteres metílicos de longitud comprendida entre C14 y C24. Se determina el porcentaje del éster metílico del ácido linolénico presente en la muestra mediante cromatografía en fase gaseosa, utilizando calibración interna (heptadecanoato metílico).

El heptadecanoato metílico, disolución a 10 mg/ml, se llevan a un matraz aforado de 50 ml y se enrasa con heptano. Para la preparación de la muestra se debe pesar con precisión unos 250 mg de muestra y se añaden 5 ml de la disolución de heptadecanoato metílico utilizando una pipeta.

La determinación de éster, C, expresado como fracción de masa en tanto por ciento, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$C = \frac{(\Sigma A) - A_{EI}}{A_{EI}} * \frac{C_{EI} * V_{EI}}{m} * 100\%$$

Dónde: ΣA = es el área total de los picos desde el del éster metílico C₁₄ hasta el del C_{24,1}; A_{EI} = es el área del pico correspondiente al heptadecanoato metílico; C_{EI} = es la concentración de la disolución de heptadecanoato metílico utilizada, en miligramos por mililitro; V_{EI} = es el volumen de la disolución de heptadecanoato metílico, en mililitros; m = es la masa de la muestra, en miligramos.

ANEXO C NTC 335 GRASAS Y ACEITES ANIMALES Y VEGETALES. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN

El índice de saponificación es el número de miligramos de hidróxido de potasio que se necesitan para saponificar 1 gramo de grasa bajo las condiciones especificadas en esta norma. A continuación, se describe el método para su determinación:

1. Preparar una solución con una concentración de KOH al 0,5 mol/l solución en 95% (v/v) etanol y una solución volumétrica estándar de HCl al 0,5 mol/l.
2. Pesar 2 g de muestra de ensayo en un matraz cónico. Se añaden, con una pipeta 25,0 ml de la solución etanólica de hidróxido de potasio.
3. Se conecta el condensador de reflujo al matraz, se coloca sobre el dispositivo de calentamiento y se deja ebulir ligeramente, agitando esporádicamente por 1 h o 2 h.
4. Se añaden a la solución caliente de 0,5 ml a 1 ml de solución fenolftaleína (10 g/l solución en 95% (v/v) etanol, o azul de metileno, 20 g/l solución en 95% (v/v) etanol) y se titula con la solución volumétrica de ácido clorhídrico estándar hasta que desaparezca el color rosa indicador. Si la solución está muy coloreada se usan de 0,5 ml a 1 ml de azul de metileno.

El índice de saponificación I_s se determina mediante la siguiente fórmula:

$$I_s = (V_0 - V_1) * c * \frac{56,1}{m}$$

Donde,

V_0 = Volumen en mililitros, de la solución volumétrica normalizada de ácido clorhídrico que se usa para el ensayo en blanco, V_1 = Volumen en mililitros, de la solución volumétrica estándar de ácido clorhídrico que se usa para la determinación, c = Es la concentración exacta, en moles por litro de la solución volumétrica estándar de ácido clorhídrico y m = Es la masa, en gramos de la porción de ensayo.

ANEXO D DISEÑO DE EXPERIMENTOS: DISEÑO FACTORIAL 2³

| Prueba | Relación molar Metanol/Aceite esterificado | % p/p Catalizador | Tipo de Catalizador |
|--------|--|-------------------|---------------------|
| 1 | 6:1 | 0,5 | KOH |
| 2 | 6:1 | 1,0 | KOH |
| 3 | 9:1 | 0,5 | KOH |
| 4 | 9:1 | 1,0 | KOH |
| 5 | 6:1 | 0,5 | NaOH |
| 6 | 6:1 | 1,0 | NaOH |
| 7 | 9:1 | 0,5 | NaOH |
| 8 | 9:1 | 1,0 | NaOH |

ANEXO E CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DEL METANOL Y EL CATALIZADOR EN LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

- Cálculos estequiométricos para la prueba 1, experimento 1.

- Metanol necesario

$$50 \text{ g AEA} * \frac{1 \text{ mol AEA}}{858,21 \text{ g}} * \frac{6 \text{ mol metanol}}{1 \text{ mol AEA}} * \frac{32 \text{ g}}{1 \text{ mol metanol}} * \frac{1 \text{ ml}}{0,792 \text{ g}} \\ = 14,12 \text{ ml metanol}$$

- KOH necesario

$$50 \text{ g AEA} * \frac{0,5 \text{ g KOH}}{100 \text{ g AEA}} * \frac{100 \text{ g KOH}}{85 \text{ g KOH}} = 0,2941 \text{ g KOH}$$

$$50 \text{ g AEA} * \frac{0,3816 \text{ mg KOH}}{1 \text{ g AEA}} * \frac{1 \text{ g KOH}}{10^3 \text{ g KOH}} = 0,0190 \text{ g KOH}$$

$$\text{Catalizador total: } 0,2941 + 0,0190 = 0,3131 \text{ g}$$

ANEXO F NORMA EN 14214

Norma Europea que describe los parámetros de calidad del biodiésel como combustible. Muestra los rangos permisibles de algunas propiedades y los métodos de ensayo.

| ENSAYO | UNIDADES | MÍNIMO | MÁXIMO | NORMA DE ENSAYO |
|----------------------------------|--------------------|---------|--------|-----------------|
| Contenido de ester | % (m/m) | 96,5 | - | EN 14103 |
| Densidad a 15°C | Kg/m ³ | 860 | 900 | EN ISO 3675 |
| Viscosidad a 40°C | mm ² /s | 3,50 | 5,00 | EN ISO 3104 |
| Punto de inflamación | °C | 120 | - | ISO 3679 |
| Contenido en azufre | mg/Kg | - | 10,0 | EN 20846 |
| Residuo carbonoso | % (m/m) | - | 0,30 | EN ISO 10370 |
| Número de cetano | | 51,0 | - | EN ISO 5165 |
| Contenido en cenizas de sulfatos | % (m/m) | - | 0,02 | ISO 3987 |
| Contenido en agua | mg/Kg | - | 500 | EN ISO 12937 |
| Contaminación total | mg/Kg | - | 24 | EN 12662 |
| Corrosión en lámina de cobre | Clasificación | Clase 1 | | EN ISO 2160 |
| Estabilidad a la oxidación | horas | 6,0 | | EN 14112 |
| Valor ácido | Mg KOH/ g muestra | - | 0,50 | EN 14104 |
| Índice de Yodo | g/ 100g muestra | - | 120 | EN 14111 |
| Metilester linolénico | % (m/m) | - | 12,0 | EN 14103 |
| Metiléster poliinsaturados | % (m/m) | - | 1 | |
| Contenido en metanol | % (m/m) | - | 0,20 | EN 14110 |
| Contenido en monoglicéridos | % (m/m) | - | 0,80 | EN 14105 |
| Contenido en diglicéridos | % (m/m) | - | 0,20 | EN 14105 |
| Contenido en triglicéridos | % (m/m) | - | 0,20 | EN 14105 |
| Glicerina libre | % (m/m) | - | 0,02 | EN 14105 |
| Glicerina total | % (m/m) | - | 0,25 | EN 14105 |
| Metales grupo I (Na+K) | mg/Kg | - | 5,0 | EN 14108 |
| Metales grupo II (Ca+Mg) | mg/Kg | - | 5,0 | EN 14538 |
| Contenido en fósforo | mg/Kg | - | 10,0 | EN 14107 |

ANEXO G CONDICIONES DE CROMATOGRAFÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL %FAME.

Detector FID a una temperatura de 250°C, flujo de aire de 400 ml/min, flujo de hidrógeno de 30 ml/min y flujo de helio de 25 ml/min, un inyector modo Split a una temperatura de 250°C, 25 psi de presión, flujo total de 91, 277 ml/min y flujo de purga de 3 ml/min, y un auto inyector con un volumen de inyección de 1 µL que hizo dos veces 4 lavados con el solvente metanol y 4 lavados con el solvente heptano y se hicieron 7 bombeos en la muestra; con una columna DB-WAX de longitud 30 m, 0,25 mm de diámetro, espesor de 0,25 µm y flujo de 1,7309 ml/min, con una rampa de calentamiento que entra a 150°C y permanece durante un minuto, sube 10°C/min hasta 210 °C y permanece 10 min y finalmente sube 15°C/min hasta 250°C y permanece cinco minutos teniendo como tiempo total 24,67 min [25].

ANEXO H RESULTADOS DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL 2³ PARA ÍNDICE DE ACIDEZ Y RENDIMIENTO

| Prueba | Experimento | Relación molar Metanol/Aceite esterificado | % p/p Catalizador | Tipo de Catalizador | Aceite esterificado [g] | Biodiésel [g] | Glicerina [g] | Rendimiento (Biodiésel/A EA) [%] | Rendimiento promedio (Biodiésel/AEA) [%] | IA [mg KOH/g BAA] | IA promedio [mg KOH/g BAA] |
|--------|-------------|--|-------------------|---------------------|-------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|--|-------------------|----------------------------|
| 1 | 1A | 6:1 | 0,5 | KOH | 50,18 | 47,87 | 7,76 | 95,40 | 95,10 | 0,08 | 0,08 |
| | 1B | 6:1 | 0,5 | KOH | 50,04 | 47,44 | 8,75 | 94,80 | | 0,09 | |
| 2 | 2A | 6:1 | 1 | KOH | 50,01 | 44,68 | 9,91 | 89,34 | 89,08 | 0,13 | 0,12 |
| | 2B | 6:1 | 1 | KOH | 50,02 | 44,42 | 9,55 | 88,81 | | 0,12 | |
| 3 | 3A | 9:1 | 0,5 | KOH | 50,05 | 43,95 | 11,86 | 87,83 | 87,66 | 0,15 | 0,16 |
| | 3B | 9:1 | 0,5 | KOH | 50,01 | 43,76 | 11,44 | 87,50 | | 0,18 | |
| 4 | 4A | 9:1 | 1 | KOH | 50,04 | 47,94 | 15,26 | 95,80 | 95,69 | 0,15 | 0,17 |
| | 4B | 9:1 | 1 | KOH | 50,02 | 47,80 | 14,90 | 95,57 | | 0,18 | |
| 5 | 5A | 6:1 | 0,5 | NaOH | 50,02 | 47,68 | 8,85 | 92,32 | 94,37 | 0,13 | 0,12 |
| | 5B | 6:1 | 0,5 | NaOH | 50,01 | 48,22 | 8,94 | 96,42 | | 0,11 | |
| 6 | 6A | 6:1 | 1 | NaOH | 50,04 | 42,12 | 13,88 | 84,18 | 84,23 | 0,12 | 0,15 |
| | 6B | 6:1 | 1 | NaOH | 50,00 | 42,15 | 13,83 | 84,28 | | 0,18 | |
| 7 | 7A | 9:1 | 0,5 | NaOH | 50,03 | 44,59 | 13,38 | 89,13 | 89,74 | 0,16 | 0,15 |
| | 7B | 9:1 | 0,5 | NaOH | 50,00 | 45,17 | 13,27 | 90,34 | | 0,13 | |
| 8 | 8A | 9:1 | 1 | NaOH | 50,02 | 41,91 | 16,66 | 83,79 | 83,32 | 0,14 | 0,14 |
| | 8B | 9:1 | 1 | NaOH | 50,11 | 41,51 | 18,58 | 82,85 | | 0,15 | |

ANEXO I RESULTADOS DEL %FAME PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL 2³ Y ETAPAS

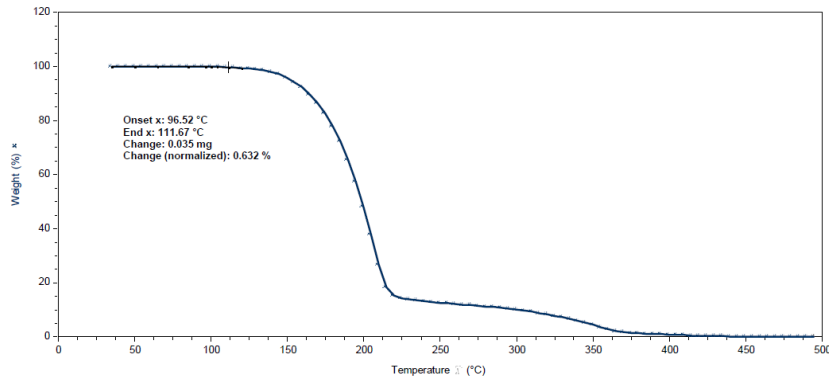
| Prueba | Experimento | Relación molar Metanol/Aceite esterificado | % p/p Catalizador | Tipo de Catalizador | CÁLCULO FAME | | | |
|--------|-------------|--|-------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | | Patrón [mg/ml] | Muestra [mg] | Medición [%] | Promedio [%] |
| 1 | 1A | 6:1 | 0,5 | KOH | 9,992 | 204,3 | 98,56 | 97,84 |
| | 1B | 6:1 | 0,5 | KOH | 9,992 | 202,2 | 97,12 | |
| 2 | 2A | 6:1 | 1,0 | KOH | 9,992 | 206,7 | 95,17 | 95,10 |
| | 2B | 6:1 | 1,0 | KOH | 9,992 | 218,7 | 95,02 | |
| 3 | 3A | 9:1 | 0,5 | KOH | 9,992 | 214,5 | 98,57 | 98,29 |
| | 3B | 9:1 | 0,5 | KOH | 9,995 | 218,7 | 98,01 | |
| 4 | 4A | 9:1 | 1,0 | KOH | 9,992 | 204,2 | 99,81 | 98,76 |
| | 4B | 9:1 | 1,0 | KOH | 9,995 | 211,7 | 97,71 | |
| 5 | 5A | 6:1 | 0,5 | NaOH | 9,992 | 220,0 | 95,66 | 96,92 |
| | 5B | 6:1 | 0,5 | NaOH | 9,992 | 205,4 | 98,18 | |
| 6 | 6A | 6:1 | 1,0 | NaOH | 9,992 | 203,3 | 96,44 | 96,90 |
| | 6B | 6:1 | 1,0 | NaOH | 9,992 | 205,7 | 97,36 | |
| 7 | 7A | 9:1 | 0,5 | NaOH | 9,992 | 218,7 | 97,87 | 98,09 |
| | 7B | 9:1 | 0,5 | NaOH | 9,992 | 210,7 | 98,31 | |
| 8 | 8A | 9:1 | 1,0 | NaOH | 9,995 | 211,9 | 98,00 | 98,42 |
| | 8B | 9:1 | 1,0 | NaOH | 9,995 | 207,1 | 98,84 | |

ANEXO J CONSOLIDADO DE RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL 2³

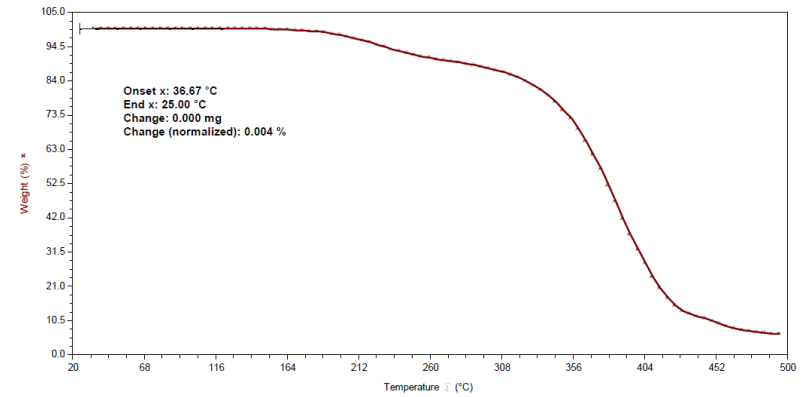
| Prueba | Experimento | Relación molar Metanol/Aceite esterificado | % p/p Catalizador | Tipo de Catalizador | Rendimiento [%] | IA [mg KOH/g aceite] | Viscosidad Cinemática a 40°C [mm ² /s] | Densidad [Kg/m ³] | %FAME |
|----------|-------------|--|-------------------|---------------------|-----------------|----------------------|---|-------------------------------|--------------|
| 1 | 1A | 6:1 | 0,5 | KOH | 95,40 | 0,08 | 4,89 | 977,95 | 98,56 |
| | 1B | 6:1 | 0,5 | KOH | 94,80 | 0,09 | 5,11 | 979,20 | 97,12 |
| 2 | 2A | 6:1 | 1,0 | KOH | 89,34 | 0,13 | 6,27 | 977,85 | 95,17 |
| | 2B | 6:1 | 1,0 | KOH | 88,81 | 0,12 | 5,76 | 977,50 | 95,02 |
| 3 | 3A | 9:1 | 0,5 | KOH | 87,83 | 0,15 | 4,77 | 977,85 | 98,57 |
| | 3B | 9:1 | 0,5 | KOH | 87,50 | 0,17 | 4,85 | 979,85 | 98,01 |
| 4 | 4A | 9:1 | 1,0 | KOH | 95,80 | 0,15 | 5,46 | 979,35 | 99,81 |
| | 4B | 9:1 | 1,0 | KOH | 95,57 | 0,18 | 4,79 | 980,80 | 97,71 |
| 5 | 5A | 6:1 | 0,5 | NaOH | 92,32 | 0,13 | 5,11 | 973,90 | 95,66 |
| | 5B | 6:1 | 0,5 | NaOH | 96,42 | 0,10 | 4,91 | 979,35 | 98,18 |
| 6 | 6A | 6:1 | 1,0 | NaOH | 84,18 | 0,12 | 4,95 | 978,55 | 96,44 |
| | 6B | 6:1 | 1,0 | NaOH | 84,28 | 0,18 | 4,63 | 977,20 | 97,36 |
| 7 | 7A | 9:1 | 0,5 | NaOH | 89,13 | 0,16 | 6,88 | 980,95 | 97,87 |
| | 7B | 9:1 | 0,5 | NaOH | 90,34 | 0,13 | 7,18 | 978,04 | 98,31 |
| 8 | 8A | 9:1 | 1,0 | NaOH | 83,79 | 0,14 | 10,64 | 981,05 | 98,00 |
| | 8B | 9:1 | 1,0 | NaOH | 82,85 | 0,15 | 12,55 | 981,05 | 98,84 |

***Mejor condición de transesterificación alcalina**

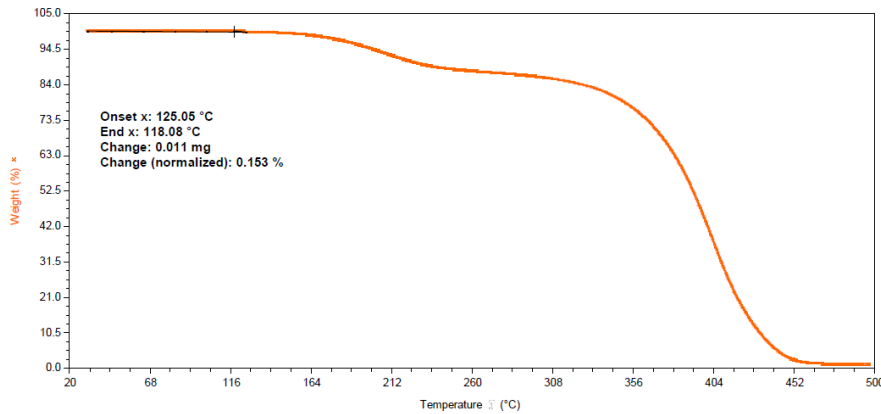
ANEXO K GRÁFICAS DE HUMEDAD, OBTENIDAS MEDIANTE PRUEBA TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)



Biodiésel de pollo (BAA)



Aceite de pollo (ARA)

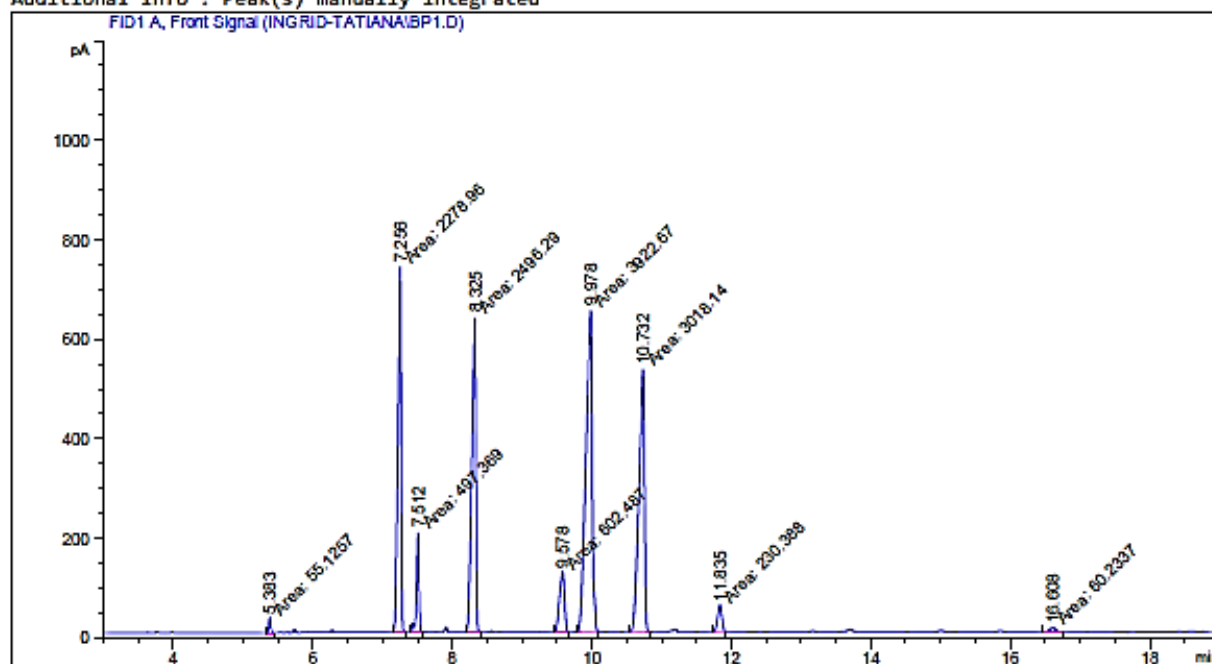


Aceite de pollo esterificado (AEA)

ANEXO L CROMATOGRAMA DE LA MEJOR CONDICIÓN PARA LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

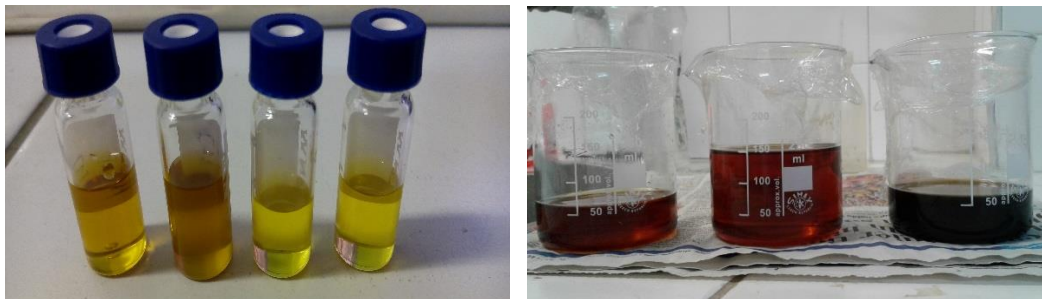
Acq. Operator : SYSTEM
Sample Operator : SYSTEM
Acq. Instrument : GC 78898A Location : Vial 101
Injection Date : 9/14/2017 4:33:59 PM
Inj Volume : 1 µl
Acq. Method : C:\CHEM32\1\METHODS\14103 FAME_2.M
Last changed : 9/14/2017 11:20:52 AM by SYSTEM
(modified after loading)
Analysis Method : C:\CHEM32\1\METHODS\14103 FAME_2.M
Last changed : 9/14/2017 5:16:06 PM by SYSTEM
(modified after loading)
Sample Info : Muestra BP1, contiene RMA 6:1, concentración de catalizador 0.5 KOH, masa de la muestra: 202.2 mg
Heptadecanoato: 9.992 mg/ml

Additional Info : Peak(s) manually integrated



ANEXO M EVIDENCIA FOTOGRÁFICA

-Transformación de la materia prima. (ARA, AEA, Biodiésel aviar) y Pre tratamientos realizados a la materia prima. (ARA, ARA desgomado con agua y ARA desgomado con ácido fosfórico)



-Etapa de esterificación ácida, lavado y residuos.



-Etapa de Transesterificación: montaje, decantación, lavado.



