

**EVALUACIÓN DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO A PARTIR DE ASERRÍN DE
CAFÉ BAJO UN PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN A NIVEL
LABORATORIO COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA**

CAMILA ANGÉLICA CASTRO HERNÁNDEZ

**FUNDACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

**EVALUACIÓN DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO A PARTIR DE ASERRÍN DE
CAFÉ BAJO UN PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN A NIVEL
LABORATORIO COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA.**

CAMILA ANGÉLICA CASTRO HERNÁNDEZ

**Trabajo de Grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
Claudio Alberto Moreno
Magister en Desarrollo Sostenible**

**FUNDACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Juan Andrés Sandoval H.

Danny José Cárdenas R.

Bogotá, D.C., Febrero 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Alexandra Mejía Guzmán (E)

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Dedico mi proyecto inicialmente a mi mamá Alexandra, quien me incentivo a estudiar mi carrera pensando en mis capacidades y gustos. A ti, porque con cada palabra, consejo, enseñanza forjaste en mí lo que soy hoy en día, porque me has dado la mejor lección de vida... Siempre seguir a adelante superando cada tropiezo, cada prueba que la vida me pone sin lastimar a los demás, pero siempre buscando mi tranquilidad y felicidad.

A mi hermana Daniela quien ha estado conmigo como mi fiel compañera en cada paso que Dios me ha permitido vivir, siempre entregándome la mejor palabra de motivación para continuar y nunca desfallecer.

A mi tía Saturia, porque sin su apoyo hoy no podría cumplir mi sueño de ser una profesional, por ser el mejor ejemplo de rectitud y por siempre inculcarme las mejores enseñanzas para labrar un camino correcto y consigo cumplir mis metas buscando un bien tanto individual como común.

A mi abuela Elsa, porque con su amor tan incondicional me ha regalado a través de mis años de vida la mayor tranquilidad y felicidad que un ser humano puede tener, así mismo motivándome cada día para lograr este objetivo y nunca rendirme.

A mi abuelo, que desde el cielo me acompaña y que sé que puede ver lo que hoy estoy logrando con tanto esfuerzo y dedicación. Hoy sin estar a mi lado, me siento inmensamente feliz dedicándole esta meta cumplida por todo el amor y apoyo que recibí de su parte.

A mi novio, quien ha sido mi bastón en este largo proceso, por ser el mejor lugar para refugiarme en los momentos más difíciles y llenos de tristeza logrando sacar una sonrisa en mí hasta en el peor momento. A ti, porque me has regalado la mayor felicidad, tranquilidad y ese amor tan incondicional sin importar las adversidades a las cuales hemos tenido que luchar juntos para hoy en día seguir construyendo esta historia.

A mis amigos, porque hay muchas personas que entraron y salieron de mi vida en este camino de universidad, pero los que están conmigo son valiosas personas que me han enseñado el significado de la amistad verdadera. Quienes aportaron granos de arena para que hoy pudiera cumplir con esta gran meta.

Por último, pero no menos importante y un poco fuera de lo convencional, quiero mencionar a ángeles que llenan mis días de un amor tan puro como solo ellos saben transmitir. Mis perros Garhen, Allan y Copito.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme cumplir esta meta, por llenarme de fortaleza y sabiduría para hoy estar donde estoy.

A mi familia, por su apoyo a lo largo de mi vida, por su interés para que pudiera cumplir este objetivo.

A mi novio, por su entrega, dedicación, por su lucha, por su aporte para lograr cumplir con mi proyecto de grado, por su incondicional amor.

A mi mejor amigo, por su acompañamiento diario, por contribuir de alguna u otra manera con la realización de mi proyecto de grado.

A Samuel Ortiz, colega que, gracias a su ayuda y apoyo, contribuyo al cumplimiento de esta meta.

CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO	14
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	18
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 CAFÉ	19
1.2 ESPECIES DE CAFETO	20
1.2.1 Coffea Arábica L	20
1.2.2 Coffea Canephora (robusta)	21
1.2.3 Coffea Liberica	21
1.3 RESIDUOS DE CAFÉ	22
1.4 ENERGÍAS ALTERNATIVAS	22
1.5 BIOMASA	23
1.6 ACEITE ASERRIN DE CAFÉ	25
1.7 TRANSESTERIFICACIÓN	25
1.7.1 Variables que influyen en la transesterificación	27
1.7.2 Tipos de reactores	28
1.8 METANOL	29
1.9 BIODIÉSEL	31
1.9.1 Biodiésel de segunda generación	34
1.9.2 Biodiésel en el mundo	34
1.9.1 Biodiésel en Colombia	35
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EXTRACCIÓN ACEITE ASERRIN DE CAFÉ	38
2.1 MÉTODO DE EXTRACCIÓN	38
2.2 VARIABLES	39
2.2.1 Variables Independientes	39
2.2.2 Variables dependientes	40
2.3 FACTORES	40
2.4 EXTRACCIÓN DE ACEITE ASERIN DE CAFÉ	41
2.4.1 Adecuación de materia prima	41
2.4.2 Selección de disolvente	41
2.4.3 Parámetros de extracción	42
2.4.4 Remoción de impurezas del aceite extraído	43
2.5 CARACTERIZACIÓN	44
2.5.2 Densidad	44
2.5.3 Índice de Acidez	45
2.5.4 Índice de yodo	46
2.5.5 Índice de saponificación	47
2.5.6 Viscosidad Cinemática	47
2.6 RESULTADOS	48

2.6.1. Extracción de aceite empleando hexano	48
2.6.2. Extracción de aceite empleando mezcla de hexano- Isopropanol	49
2.6.3. Caracterización de Aceite	50
3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL	52
3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	52
3.1.1 Hipótesis	52
3.1.2 Selección de factores	52
3.2 RESULTADOS	54
4. EVALUACIÓN DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO	57
4.1 CARACTERIZACIÓN	57
4.2 BALANCE DE MATERIA	58
4.3 SELECCIÓN DE LA MEJOR COMBINACIÓN DE VARIABLES	59
4.4 EFICIENCIA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL	59
4.5 BIODIÉSEL A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIAL	60
5. CONCLUSIONES	62
6. RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXOS	66

TABLA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Aspectos Botánicos Café	20
Figura 2. Grano coffea arábica vs Grano coffea robusta.	22
Figura 3. Reacción de transesterificación.	25
Figura 4. Esquema básico de la Transesterificación para obtención de Biodiésel	26
Figura 5. Esquema de transesterificación de un triglicérido con metanol	27
Figura 7. Equipo Soxhlet a nivel laboratorio.	43
Figura 8. Rendimiento vs temperatura de reacción vs concentración de catalizador	55
Figura 9. Reacción química de transesterificación.	58
Figura 10. Balance de materia para producción de biodiésel de aserrín de café.	59

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Proyección de la producción de biodiésel para el año 2024	35
Gráfica 2. Producción Nacional de biodiésel	37

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades Fisicoquímicas del Metanol	30
Tabla 2. Especificaciones de las propiedades de Biodiésel	33
Tabla 3. Propiedades de los Disolventes de estudio	42
Tabla 4. Resultados de aceite extraído con hexano	48
Tabla 5. Resultados de aceite extraído con hexano-Isopropanol	49
Tabla 6. Datos Caracterización de aceite de aserrín de café	51
Tabla 7. Factores Constantes a trabajar	53
Tabla 8. Niveles de Diseño	54
Tabla 9. Diseño de experimentos	54
Tabla 10 Resultados caracterización biodiésel	57
Tabla 11. Propiedades Biodiésel de aserrín de café vs. Biodiésel de palma	60
Tabla 12. Biodiésel obtenido vs Biodiésel a partir de aceites usados	61

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Porcentaje de aceite extraído	44
Ecuación 2. Determinación Densidad	45
Ecuación 3. Determinación Índice de Acidez	45
Ecuación 4. Determinación Índice de Yodo	46
Ecuación 5. Determinación del Índice de Saponificación	47
Ecuación 6. Determinación del rendimiento de extracción	49
Ecuación 7. Ecuación ajuste polinomial para obtención de biodiésel a partir de aserrín de café	55

GLOSARIO

BIOCOMBUSTIBLES: combustibles producidos de forma directa o indirecta a partir de material orgánico (biomasa) incluyendo productos agrícolas y residuos orgánicos¹.

BIODIÉSEL: combustible líquido a partir de una mezcla de aceites vegetales, grasas animales y aceites de fritura usados, el cual puede utilizarse en motores diésel sin modificación².

BIOMASA: material orgánico con contenido energético, obtenido a partir de la fotosíntesis de las plantas³.

CAFÉ: semilla que procede del árbol cafeto, rubiácea que crece en climas tropicales⁴.

COMBUSTIBLES: materiales con energía almacenada que puede liberarse en forma de calor a través de reacciones de combustión⁵.

COMBUSTIBLES FÓSILES: los combustibles fósiles son fuentes de energía las cuales se basan en el carbón, petróleo, y el gas natural creados a través del tiempo con plantas en descomposición y animales marinos que se acumularon en los océanos⁶.

DIÉSEL: también conocido como gasóleo o gasoil, combustible que se obtiene a partir de la destilación y la purificación del petróleo crudo. Se emplea en motores de combustión interna.

¹ MENDOZA GENEY, Libardo. Biomasa: Biocombustibles. Energías alternativas [diapositivas]. Bogotá: Fundación Universidad de América, 2019. [Consultado: 10 de noviembre del 2019].

² BIODIESEL. America's advanced biofuel. Biodiesel Basics. [sitio web]. Washington. [Consultado: 8 de octubre del 2019]. Disponible en: <https://www.biodiesel.org/what-is-biodiesel/biodiesel-basics>.

³ MENDOZA GENEY, Libardo. Biomasa: Biocombustibles. Energías alternativas [diapositivas]. Bogotá: Fundación Universidad de América, 2019. [Consultado: 10 de noviembre del 2019].

⁴ CAFÉ PARA cardiólogos [Anónimo]. *Revista colombiana de cardiología*. {En línea} 2005, Vol. 11, nro. 8, p. 357. ISSN 0120-5633. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcca/v11n8/v11n8a1.pdf>

⁵ MENDOZA GENEY, Libardo. Biomasa: Biocombustibles. Energías alternativas [diapositivas]. Bogotá: Fundación Universidad de América, 2019. [Consultado: 10 de noviembre del 2019].

⁶ BARBER, David. Las diferencias entre los biocombustibles y los combustibles fósiles. Cuida tu dinero. {En línea}. Febrero 01 del 2018. [Consultado: 7 de noviembre del 2019]. Disponible en: <https://www.cuidatudinero.com/13105015/las-diferencias-entre-los-biocombustibles-y-los-combustibles-fosiles>.

ENERGÍAS ALTERNATIVAS: son las energías que comúnmente se denominan energías renovables. Todas aquellas que provienen de recursos naturales y de fuentes inagotables, al producirlas no generan gran contaminación al ambiente⁷.

SAPONIFICACIÓN: es la hidrólisis con catálisis básica de grasas y aceites para producir jabón. Los aceites vegetales y grasas animales son triglicéridos que al ser tratados con una base fuerte como NaOH o KOH se saponifican, es decir se produce jabón⁸

TRANSESTERIFICACIÓN: es una reacción reversible y se lleva a cabo ácidos grasos, alcohol y catalizador para generar como productos biodiésel y glicerol crudos⁹.

⁷ ENERGÍAS ALTERNATIVAS. Qué son y qué tipo existen .Factor energía. [sitio web]. 2016 [Consultado: 8 de octubre del 2019]. Disponible en: <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/que-son-energias-alternativas/>

⁸ SAPONIFICACIÓN. Grasas y aceites vegetales. . [sitio web]. [Consultado: 13 de diciembre 2019]. Disponible en: <https://grasas-y-aceites-vegetales.webnode.com.co/aplicaciones/saponificacion/>

⁹ TRANSESTERIFICACION BIODIESEL. Etip Bioenergy. [sitio web]. 2004. [Consultado: 8 de octubre del 2019]. Disponible en: <http://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/conventional-technologies/transesterification-to-biodiesel>.

RESUMEN

Se evaluó el biodiésel producido a partir de aceite de aserrín de café dando lugar a una producción de segunda generación donde se buscó el manejo de un residuo cotidiano, identificando variables y factores influyentes tanto en el proceso de extracción del aceite como de transesterificación. La operación de extracción se llevó a cabo mediante un extractor soxhlet empleando hexano e Isopropanol como disolventes, tomando como base las condiciones incidentes al llevar a cabo la extracción. El aceite extraído se caracterizó por medio de la determinación del índice de acidez, índice de yodo, de saponificación, el porcentaje de aceite extraído, densidad y viscosidad en el laboratorio.

Para la producción de biodiésel se realizó la reacción de transesterificación, para la cual se varió la concentración de catalizador básico a emplear a temperatura de reacción y relación molar alcohol aceite determinada, donde se seleccionó finalmente que la mejor combinación de variables a través de un diseño de experimentos factorial es una relación molar alcohol aceite 6:1, concentración de catalizador 1,5 % y temperatura igual a 60 °C. Al biocombustible producido se le determinó el índice de acidez, índice de yodo, densidad y viscosidad con el fin de caracterizarlo teniendo en cuenta la normatividad pertinente. Finalmente se realizó una comparación de los parámetros de caracterización anteriormente mencionados con la Norma Técnica Colombiana (especificaciones para biodiésel), para el cumplimiento del objetivo del proyecto y así mismo establecer la viabilidad técnica del aserrín de café para la producción del mismo.

Palabras Claves: aserrín de café, biodiésel, caracterización, soxhlet, transesterificación.

INTRODUCCIÓN

Diversos factores tales como la crisis del petróleo en la década de los años setenta, el agotamiento del mismo, la contaminación atmosférica y el calentamiento global son el punto de partida para que se haya incrementado la búsqueda de alternativas que generen una fuente de energía más limpia, amigable con el medio ambiente y económicamente sostenible.

En el transcurso de los años la contaminación atmosférica se ha agravado debido al incremento de las fuentes móviles principalmente en transporte público y carga pesada por las emisiones generadas de la combustión del diésel, las cuales están relacionadas directamente con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y el cáncer de pulmón, las cuales aquejan a los ciudadanos y especialmente a la población infantil, a la tercera edad y aquellos que poseen mayor sensibilidad a condiciones respiratorias¹⁰.

Los biocombustibles surgen como solución a la disminución de tal mencionada problemática, obtenidos a partir de la transformación de biomasa tales como el aceite de palma o la caña de azúcar y de residuos orgánicos como el aserrín de café.

En Colombia, gracias a la ley 939/04¹¹ bajo el gobierno de Álvaro Uribe Vélez se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para su uso en motores diésel, contribuyendo a la búsqueda de nuevas energías alternativas eficientes. A raíz de esto surge la producción y uso del biodiésel teniendo mayor obtención a partir del aceite de palma como materia prima siendo una nueva fuente de energía nacional. Sin embargo, el manejo de este tipo de biomasa tiene la desventaja que hace parte de la función alimentaria, por tal motivo se ha generado mayor investigación en la producción de segunda generación de este biocarburente haciendo utilización de residuos orgánicos que sean eficientes y así mismo promuevan un desarrollo agroindustrial.

Por lo anterior en el presente proyecto se evaluará el biodiésel a partir del aceite del aserrín de café, siendo un residuo orgánico con gran disponibilidad.

¹⁰ BALLESTER DÍEZ, Ferrán. Efectos de la contaminación Atmosférica Sobre la Salud. En: Revista Española de salud pública. Vol.; 73 No 2 (Mar, 1999).

¹¹ DISHINGTON, Lens. Experiencia del gremio palmero colombiano en el desarrollo del biodiésel de palma. {En línea}. 8 de agosto de 2014. [Consultado el 23 de octubre del 2019]. Disponible en: http://web.fedepalma.org/media/Presentacion_JMD_Costa%20Rica_Biodiesel_opt2.pdf.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el biodiésel producido a partir de aserrín de café bajo un proceso de transesterificación a nivel laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros para la extracción del aceite del aserrín de café a nivel laboratorio.
- Determinar las variables y condiciones en la producción de Biodiésel a partir de aserrín de café.
- Realizar el proceso de transesterificación a nivel laboratorio para la producción de biodiésel con los parámetros establecidos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 CAFÉ

El café es uno de los productos básicos del mundo de gran comercialización, es el principal producto agrícola de Colombia del cual depende gran porcentaje de la economía y sustento de la población. El café es después del petróleo el producto comercial más importante del mundo; supera al carbón, al trigo y al azúcar¹².

El café se conoce como los granos obtenidos de unas plantas perennes tropicales (cafetos)¹³, los cuales tostados y molidos son usados principalmente para preparar y tomar como una infusión. Estos granos de café son las semillas de un fruto llamado cereza, las cuales están compuestas por una cubierta exterior (exocarpio), el cual determina el color del fruto, en el interior hay diferentes capas: el mesocarpio, rica en azúcares; el endocarpio es una capa que cubre cada grano, llamada pergamino; la epidermis, una capa muy delgada; y los granos o semillas, el endosperma, conocidos como el café verde, los cuales son tostados para preparar los diferentes tipos de café. En el siglo XIX, se generaron los mayores avances en el procesamiento del café a raíz del auge de métodos mecánicos de tueste, molienda y preparación. A comienzos del siglo XX se desarrollaron métodos de conservación y empaque. Con esto se dio el inicio a la industrialización del café, desarrollándose en todos los continentes. Las distintas técnicas de industrialización que se aplican pueden llevarse a cabo de la misma forma en la medida en que se apliquen bajo los mismos conceptos y procesos¹⁴. Independientemente de la técnica aplicada, es fundamental tener conocimiento de la calidad y origen del café verde con el que se trabaje, con el fin de obtener una experiencia de consumo satisfactoria.

Respecto a Colombia, es un país que cuenta con una gran variedad climática dependiendo de la altitud en las zonas cafeteras. Colombia, cuenta con 563,000 familias caficultoras, en 588 municipios en 20 departamentos donde se encuentran diversidad de lenguajes, culturas y razas¹⁵.

El cultivo de café requiere condiciones climáticas, condiciones especiales de suelo, de temperatura, precipitación atmosférica y cierta altitud sobre el nivel del mar. El cultivo de café tiene la necesidad de encontrarse entre los 1,200 y 1,800 metros de altura sobre el nivel del mar, con temperaturas templadas que oscilan entre los 17

¹² CAFÉ PARA cardiólogos [Anónimo]. *Revista colombiana de cardiología*. {En línea}. 2005, Vol. 11, nro. 8, p. 357. ISSN 0120-5633. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcca/v11n8/v11n8a1.pdf>

¹³ HISTORIA DEL CAFÉ. Café de Colombia. [sitio web]. Bogotá. [consultado: Marzo del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/

¹⁴ INDUSTRIALIZACIÓN DEL CAFÉ. Café de Colombia. [sitio web]. Bogotá. [consultado: Marzo del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/industrializacion/

¹⁵ MENDOZA, Jahel. El café retoma su fuerza en Colombia. {En línea}. 27 de junio de 2016. . [consultado: agosto del 2019]. Disponible en: <https://www.elheraldo.co/tendencias/el-cafe-retoma-su-fuerza-en-colombia-268502>.

y 23 °C y con precipitaciones cercanas a los 2,000 milímetros anuales distribuidas a lo largo del año¹⁶. La caficultura colombiana cuenta con un atributo fundamental: la calidad de la tierra. Los suelos de las zonas cafeteras se caracterizan por ser en su mayoría derivados de cenizas volcánicas, lo que les genera un alto contenido de material orgánico y excelentes características físicas para la producción de café¹⁷.

1.2 ESPECIES DE CAFETO

El café pertenece a la familia botánica Rubiaceae, la cual cuenta con 500 géneros y más de 6,000 especies. El *coffea* tiene aproximadamente 25 especies principales en Asia y África. Es una de las pocas plantas que florece y da fruto al mismo tiempo¹⁸. Todas las especies de café son leñosas, pero comprenden desde arbustos pequeños hasta árboles de más de 10 metros de altura. No todas las plantas de cafeto son iguales, sus características ofrecen un fruto diferente. Los café de origen arábico y robusto suman el 98 % de la producción mundial¹⁹.

Figura 1. Aspectos Botánicos Café

Familia	Género	Especies (muchas, entre otras:)	Variedades (ejemplos:)
Rubiaceae	Coffea	Arabica	Typica
		Canephora	Robusta
		Liberica	

Fuente: ASPECTOS BOTÁNICOS. Organización Internacional de café. [sitio web]. London. [Consultado: Agosto del 2019]. Disponible en: http://www.ico.org/es/botanical_c.asp

1.2.1 Coffea Arábica L. Su cultivo se encuentra en toda Latinoamérica, África Central y Oriental, en la India y en una pequeña parte en Indonesia. De la comercialización del café a nivel mundial más del 70 % pertenece a esta especie.

¹⁶ REGIONES CAFETERAS. Café de Colombia. [sitio web]. Bogotá. [consultado: Agosto del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/

¹⁷ REGIONES CAFETERAS. Café de Colombia. [sitio web]. Bogotá. [consultado: Agosto del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/

¹⁸ EL CAFETO. La página de Bedri café. [sitio web]. [consultado: Agosto del 2019]. Disponible en: https://www.bedri.es/Comer_y_beber/Cafe/El_cafeto.htm.

¹⁹ EL ARBOL Y EL ENTORNO. Café de Colombia. [sitio web]. Bogotá. [consultado: Agosto del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/

Es una especie que contiene 44 cromosomas (tetraploide), se considera un café de altura, su cultivo se puede llevar cabo a temperaturas de 18 a 23 °C, su fruto es ovalado, contiene dos semillas. El coffeea arábica tiene un contenido de cafeína de los granos entre 1,0 y 1, 4%, es un café menos amargo. Por lo anterior se produce la bebida de mejor calidad y económicamente es la más importante²⁰.

1.2.2 Coffea Canephora (robusta). Esta especie tiene distribución geográfica en África, Brasil y Asia, de la comercialización del café entre el 20 y 30 % aproximadamente pertenecen a esta especie. Posee 22 cromosomas (diploide), es más amarga que la especie arábica debido a que posee de un 2 a 3 % de cafeína. Es un pequeño árbol robusto que puede alcanzar los 10 metros de altura, su fruto es redondeado, su semilla alargada y más pequeña respecto a la arábica²¹.

1.2.3 Coffea Liberica. Esta especie se cultiva en Malasia y África Occidental, proviene de un árbol fuerte y de gran tamaño de más o menos 18 metros de altura, produce un fruto y grano grandes. Su comercialización aproximadamente es del 1%, una mínima cantidad en comparación a las dos otras especies ya que sus características de aroma y sabor tiene una baja demanda²².

Cuadro 1. Diferencias entre coffeea arábica y coffeea robusta

Características	Arábica	Robusta
Cultivo	Alta Altitud	Baja Altitud
Matices	Dulce, perfumado, ligeramente ácido	Amargo
Planta	4-6 metros	8-12 metros
Cafeína	1,5 % aprox.	2,7 % aprox.
Producción	75 % aprox.	25 % aprox.
Costo	Mayor	Menor

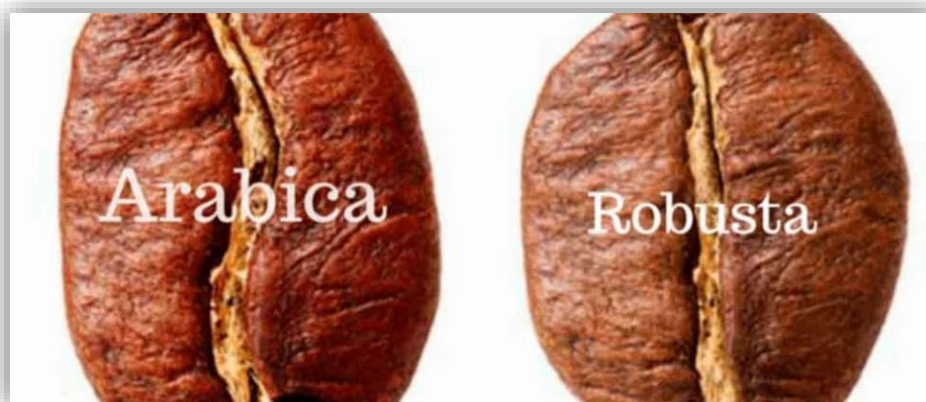
Fuente: elaboración propia. Con base en: CAFÉ ARÁBICA y café robusta: Estas son las diferencias. Café Orús [sitio web]. [Consultado: Agosto del 2019]. Disponible en: <https://cafesorus.es/2017/04/cafe-arabica-cafe-robusta-estas-las-10-diferencias>

²⁰ PINEDA, Wendy Carolina. Estudio y desarrollo técnico-económico para la extracción del aceite contenido en la pulpa de café. Trabajo de grado licenciatura en ingeniería química industrial. Guatemala: Universidad Rafael Landivar. Facultad de ingeniería, 2004. 21 p

²¹ PINEDA, Wendy Carolina. Estudio y desarrollo técnico-económico para la extracción del aceite contenido en la pulpa de café. Trabajo de grado licenciatura en ingeniería química industrial. Guatemala: Universidad Rafael Landivar. Facultad de ingeniería, 2004. 22 p.

²² PINEDA, Wendy Carolina. Estudio y desarrollo técnico-económico para la extracción del aceite contenido en la pulpa de café. Trabajo de grado licenciatura en ingeniería química industrial. Guatemala: Universidad Rafael Landivar. Facultad de ingeniería, 2004. 23 p.

Figura 2. Grano coffea arábica vs Grano coffea robusta.



Fuente: GRANOS y OLEAGINOSAS. Tipos de granos: arábica y robusta. Agro revista campo. [sitio web]. [Consultado: Agosto del 2019]. Disponible en: <http://www.2000agro.com.mx/agroindustria/granosyoleaginosas/tipos-de-grano-arabica-o-robusta/>

1.3 RESIDUOS DE CAFÉ

A los residuos de café comúnmente se les conoce como borra, cascarilla, aserrín, cuncho, poso o ripio²³. Esto es el sedimento que deja el café en un filtro una vez que ha sido preparado y colado. Los cunchos, son residuos que están cargados de nutrientes, productos orgánicos y otras propiedades físicas que pueden aprovecharse.

1.4 ENERGÍAS ALTERNATIVAS

A medida que la especie humana fue evolucionando, sus necesidades energéticas aumentaban a causa de las nuevas actividades y trabajos que desarrollaban.

Bajo la revolución industrial, los conocimientos acumulados por el ser humano desde el renacimiento y en especial durante la segunda mitad del siglo XVII y las primeras décadas del XVIII dieron posibilidad a los avances técnicos que permitieron realizar trabajos que requerían más energía que la que podían suministrar los músculos de personas o animales²⁴. Lo anterior se logró gracias al aprovechamiento de la energía liberada en la combustión de combustibles, como el carbón que aparecía concentrado en yacimientos, para el accionamiento de las máquinas de vapor.

²³ RESIDUOS DE CAFÉ. La patria.com. [sitio web]. Manizales. [consultado: Agosto del 2019]. Disponible en: <http://www.lapatria.com/opinion/columnas/elizabeth-ortiz-palacio/residuos-del-cafe>

²⁴ GONZALEZ, Jaime. Energías renovables. En: GONZALEZ VELASCO, Jaime. *Energías Renovables*. Madrid: 2009; p. 2. ISBN 978-84-291-7912-5.

La quema de hidrocarburos es la fuente energética más utilizada en el mundo, debido a su rendimiento en la fabricación de combustibles para automóviles, aeronaves o fuentes de electricidad. A pesar de su gran uso generan problemáticas ambientales que afectan la calidad de vida de los seres humanos y del planeta en sí. Es por esto que con el pasar del tiempo la necesidad de buscar soluciones a estas problemáticas ha tomado más auge buscando energías más limpias, sostenibles y económicas. Es ahí donde las energías alternativas aparecen en la década de los 70 cuando el impacto ambiental de la industria humana y su alteración en los ecosistemas animales eran más evidentes.

El estudio de las energías renovables se debe enfocar no solo en cuestiones técnicas sino también abarcar áreas como las ciencias del medioambiente por medio de estudios comparativos de cómo influyen en la atmosfera, corrientes de agua, en la vida animal y vegetal los dispositivos utilizados para aprovechar las energías renovables, en comparación con el impacto que sobre los mismos producirían iguales cantidades de energía generadas a partir de la combustión de combustibles fósiles.

El aprovechamiento de los flujos energéticos que dan lugar a las energías renovables conlleva una investigación exhaustiva y desarrollo en el campo de nuevas tecnologías, que permitan el diseño de nuevos dispositivos capaces de obtener un mayor beneficio de las nuevas energías mejorando así la eficiencia de conversión de máquinas, motores, aparatos domésticos²⁵, etc.

Las nuevas generaciones son de vital importancia en el ahorro y la preservación de las fuentes, para controlar y mitigar los problemas ambientales que hoy aquejan a las poblaciones alrededor del mundo.

1.5 BIOMASA

Es la forma de energía más explotada por la humanidad ya que al quemar ramas y troncos de árboles producían luz y calor. Desde la prehistoria las personas han utilizado esta energía por medio de combustión directa quemándola en hogueras a la intemperie, hornos y cocinas artesanales e incluso en calderas²⁶, esto se llevaba a cabo para la preparación de alimentos, para protección del frío y desde la revolución industrial para la producción de vapor.

El uso de la biomasa ha conllevado a nuevas tecnologías de conversión de la misma en calor, frío, electricidad y combustibles para el transporte hace de este recurso renovable una alternativa frente a los combustibles convencionales.

²⁵ GONZALEZ, Jaime. Energías renovables. En: GONZALEZ VELASCO, Jaime. *Energías Renovables*. Madrid: 2009; p. 2. ISBN 978-84-291-7912-5.

²⁶ SALAZAR, Oviedo; BADI, MH; GUILLEN A y LUGO SERRATO, O. Historia y uso de energías renovables. *Revista Internacional de Buena Conciencia*. {En línea}. México, 2015. ISSN 0120-5633. Disponible en: [http://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10\(1\)1-18.pdf](http://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10(1)1-18.pdf).

La gran ventaja de la biomasa es la capacidad intrínseca para almacenar energía ya que este recurso es energía solar sintetizada y almacenada en forma de enlaces químicos a través de la fotosíntesis, ya que viene a ser el conjunto de materiales biológicos no utilizables para alimentación y que no ha sufrido cambios profundos en su composición²⁷, caso contrario a los cambios profundos en la composición en la formación de los combustibles fósiles.

Las tecnologías de conversión de la biomasa se llevan a cabo en tres procesos diferentes, procesos termoquímicos, procesos bioquímicos y mecánicos. En los termoquímicos se encuentra la combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción. En los procesos bioquímicos se encuentra la digestión anaerobia y la fermentación. Por último en los procesos mecánicos se encuentra la conversión de la biomasa por medio de presión mecánica. Cada una de estas tecnologías tiene como fin la transformación de la biomasa para producir una fuente de energía alternativa como gas, metanol, carbón activado, bioetanol y biodiésel²⁸.

La biomasa tiene gran campo de aplicación ejemplo de ello el sector doméstico, la leña tanto como el biogás se utilizan para cocinar en lugares rurales alrededor del mundo, pero el empleo de la leña genera gran contaminación y menor eficiencia por lo que el empleo de biodigestores es más viable ya que permite el aprovechamiento de los desechos de otras actividades no produciendo una contaminación extra, adicional a esto se pueden adecuar para las viviendas, ranchos, escuelas rurales, entre otros.

Otro gran campo de aplicación de la biomasa es el sector industrial ya que su manejo permite la generación de calor, la co-generación siendo esta una combinación de electricidad y calor, como por ejemplo generación de energía eléctrica, hornos industriales y calderas para el secado de madera y granos. El transporte es el campo que más depende del uso de combustibles fósiles por lo que el uso de la biomasa para producir biocombustibles es de gran interés en la actualidad ante la vulnerabilidad del abastecimiento y el alza de los precios. La producción de biocarburantes es de gran viabilidad para su empleo en motores de automóviles, camiones y autobuses con el objetivo de generar una mayor calidad en el aire por su emisión mínima de material particulado y gases de efecto invernadero contribuyendo de manera positiva al medio ambiente y en la salud de los seres humanos²⁹.

²⁷ SALAZAR, Oviedo; BADI, MH; GUILLEN A y LUGO SERRATO, O. Historia y uso de energías renovables. *Revista Internacional de Buena Conciencia*. {En línea}. México, 2015. ISSN 0120-5633. Disponible en: [http://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10\(1\)1-18.pdf](http://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10(1)1-18.pdf)

²⁸ MENDOZA GENEY, Libardo. Uso energético. Energías alternativas [diapositivas]. Bogotá: Fundación Universidad de América, 2019. [Consultado: 10 de noviembre del 2019].

²⁹ ROJAS, Néstor. Aire y problemas ambientales en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. [sitio web]. Bogotá [consultado: marzo de 2019.]. Disponible en: https://bogota.gov.co/sites/default/files/inline-files/aire_y_problemas_ambientales_de_bogota.pdf

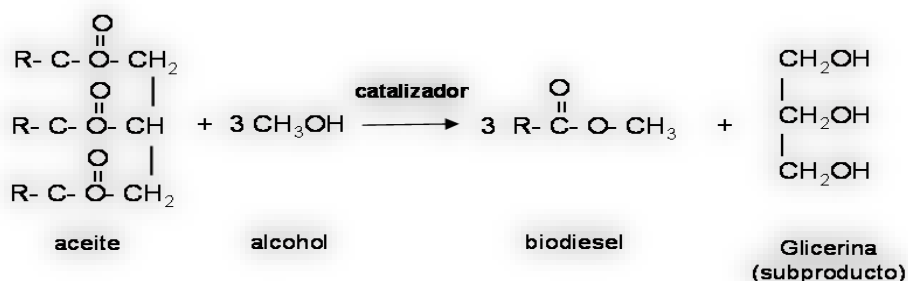
1.6 ACEITE ASERRIN DE CAFÉ

El aserrín de café es un residuo que puede ser utilizado para generar productos de interés energético. Este residuo presenta una cantidad de aceite entre el 10-20 % en peso, lo cual varía según la cantidad de café que se trate. El aceite contenido en este, tiene una composición química similar a la de los aceites vegetales comestibles como el de soja, maíz, coco, entre otros; es un líquido a temperatura ambiente y presenta una gran cantidad de insaponificables que varía del 7 % al 12%³⁰.

1.7 TRANSESTERIFICACIÓN

Es un proceso de transformación química donde un lípido, ya sea una grasa o un aceite se mezcla con un alcohol de cadena corta (metanol o etanol) y por medio de un catalizador, normalmente una base, reacciona para producir un éster (biodiesel) y un glicerol (glicerina)³¹. Para la elaboración del biodiésel la reacción de Transesterificación se evidencia a continuación:

Figura 3. Reacción de transesterificación.



Fuente: DUFOUR, Javier. Catalizador ecológico para la producción de biodiesel. {En línea}. Julio 31 del 2009. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2009/07/31/122559>

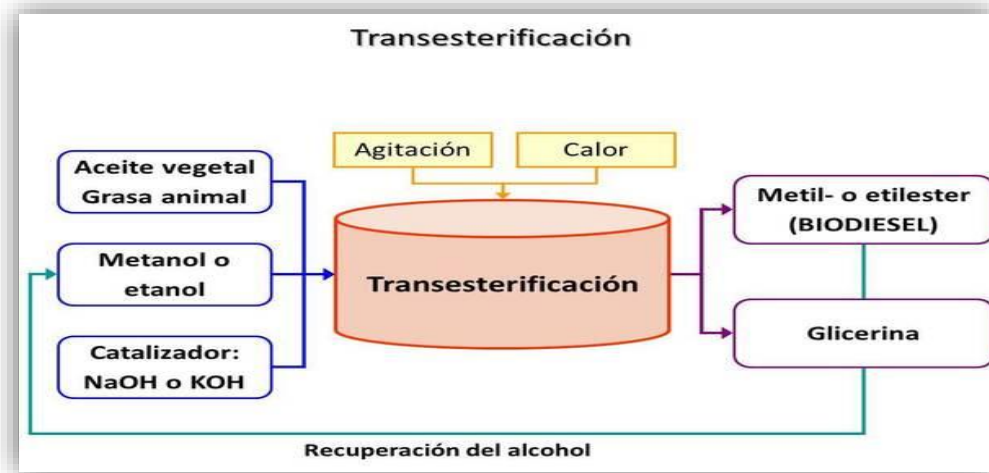
Esta reacción química es la que mejores resultados ha demostrado para la obtención del Biodiésel.

A continuación, se presenta un esquema básico del proceso de transesterificación.

³⁰ LOPEZ FUNTAL, Elkin Mauricio. Extracción de aceite de café. *Revista Ingeniería e Investigación*. {En línea}. 2007, Vol. 27, nro. 1, pp. 25-31. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v27n1/v27n1a04.pdf>

³¹ CANO AMÓRTEGUI, Manuel Andrés. Evaluación de la Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Moringa Oleífera asistido por la Técnica de Ultrasonido. Bogotá, 2015, p 18. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental.

Figura 4. Esquema básico de la Transesterificación para obtención de Biodiésel

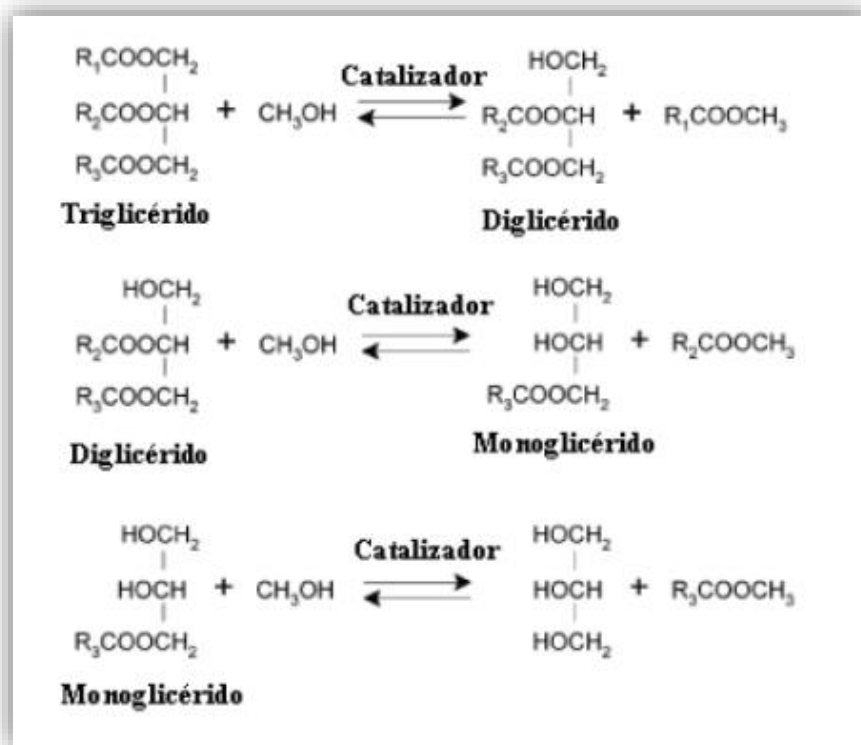


Fuente: BIODIESEL EN PERÚ. Educación en Ingeniería química. [Sitio web]. Perú [consultado: marzo del 2019] Disponible en: <https://www.ssecoconsulting.com/biodiesel-i-parte.html>

El primer paso para llevar a cabo la reacción de transesterificación es la conversión de triglicéridos a diglicéridos, seguido por la conversión de diglicéridos a monoglicéridos y finalmente de monoglicéridos a glicerina, produciendo una molécula de éster por cada glicérido en cada conversión, como se puede evidenciar en la figura 5. Obteniendo así como producto en mayor proporción ésteres de ácidos de grasos (biodiesel) y glicerol³² siendo este el subproducto generado de gran utilidad en industrias tales como alimenticia, farmacéutica y de cosméticos.

³² CARDONA ALZATE, Carlos Ariel., ORREGO ALZATE, Carlos Eduardo., GUTIÉRREZ MOSQUERA, Luis Fernando. Biodiesel. Manizales, Caldas, Julio 2009, p 39. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Figura 5. Esquema de transesterificación de un triglicérido con metanol



Fuente: RIVEROS, Lina Marcela; MOLANO, Miguel Ángel. Transesterificación del aceite de palma con metanol por medio de una catálisis heterogénea empleando un catalizador ácido. {En línea}. Bogotá. Junio 2006. [consultado: diciembre de 2019] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932006000200006.

Para obtener mayor velocidad de reacción, mayor rendimiento y aumentar la conversión a ésteres en la reacción, se emplea un catalizador de origen básico o ácido e inclusive enzimas como las lipasas.

En este caso, el empleo de un catalizador básico para llevar a cabo la reacción de transesterificación de manera homogénea conlleva a que sea una reacción más rápida y que las condiciones de la misma sean moderadas respecto a los casos donde se emplean catalizadores ácidos.

1.7.1 Variables que influyen en la transesterificación: las variables en cualquier proceso son de gran importancia ya que pueden afectar las condiciones del mismo tanto en aspectos físicos, químicos o ambos según la composición de la muestra.

En el proceso de transesterificación para la producción del biodiésel es importante el control de la relación molar alcohol-aceite ya que está afecta el rendimiento de la reacción. Para llevar a cabo la transesterificación se necesitan de 3 moles de alcohol y 1 mol de triglicéridos para obtener 3 moles de éster monoalquílico de ácido graso y 1 mol de glicerina, según la figura 3.

La temperatura de reacción es otra variable que influye notablemente, tanto en la transesterificación como en el rendimiento del biodiésel. Si se tiene una temperatura muy alta se disminuye la viscosidad del aceite dando lugar a un aumento en la velocidad de reacción y disminución en el tiempo de la misma. Al tener una reacción de transesterificación empleando catálisis básica es ideal manejar una temperatura de reacción igual a 60 °C. A valores de temperatura mayores la conversión aumenta inicialmente alcanzando un máximo a concentraciones intermedias de catalizador y luego disminuye a altas concentraciones. Para concentraciones altas de catalizador las conversiones más altas se alcanzan en un rango de temperatura bajo³³. La transesterificación básica procede 4000 veces más rápido que cuando se usa la misma cantidad de catalizador ácido por lo cual se convierte en la más empleada a nivel comercial.

La velocidad de agitación es otra de las variables influyentes al llevar a cabo este proceso, al inicio de la reacción, los triglicéridos y el metanol forman dos fases inmiscibles, ya que la concentración de triglicéridos en el metanol es baja por lo que hace que el rendimiento al inicio sea menor. En estos momentos iniciales la reacción es controlada por el mecanismo de transferencia de materia. La agitación es necesaria para aumentar el grado de mezcla de las dos fases y aumentar así mismo la velocidad de transesterificación.

1.7.2 Tipos de reactores: para llevar a cabo el proceso de transesterificación se emplea un reactor que puede ser discontinuo, continuo, tubular, lecho fijo, fluidizado.

- **Reactor Batch o Discontinuo:** Generalmente se emplean para la mayoría de las reacciones llevadas a cabo en un laboratorio. Estos reactores trabajan por cargas, vertiendo la mezcla y se espera el tiempo de reacción establecido. Los reactivos se colocan en un tubo de ensayo o vaso de precipitados, mezclándose simultáneamente, se calientan para que la reacción tenga lugar y luego se enfrían. Los productos se vierten y dado el caso se purifican³⁴.
- **Reactor Continuo:** Consiste en alimentar por un punto determinado continuamente al reactor los reactivos dando lugar a la reacción para finalmente

³³ CARDONA ALZATE, Carlos Ariel. ORREGO ALZATE, Carlos Eduardo. GUITIÉRREZ MOSQUERA, Luis Fernando. Obtención Biodiésel por una tecnología convencional. En: *Biodiesel*. Manizales: 2009, p. 72-76. ISBN 978-958-44-5513-0

³⁴ GOMEZ, Cristian. Tipos de reactores con sus características [sitio web]. Santander. [consultado: octubre 23 del 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/11977961/Tipos_de_Reactores_con_sus_características.

tener el producto deseado por otro extremo. Este tipo de reactor es muy poco usado a nivel laboratorio³⁵.

- Reactor Tubular: Reactor de forma cilíndrica por el cual circula el fluido de extremo a extremo sin mezclarse a condiciones de temperatura y concentración específicas para que se lleve a cabo la reacción³⁶.
- Reactor de Lecho Fijo: Este tipo de reactor consiste en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, operando de forma vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y de forma, en algunos casos especialmente catalizadores metálicos como el platino no se emplean partículas de metal, sino que se presenta en forma de mallas de alambre. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material.³⁷
- Reactor de Lecho Fluidizado: En este tipo de reactor interviene un sólido en un fluido de gas. Asegura una buena mezcla de los reactivos de la reacción con el catalizador teniendo mayor contacto y mayor transferencia de calor, lo cual conlleva a una velocidad de reacción mayor reduciendo la variabilidad de las condiciones del proceso³⁸.

1.8 METANOL

El metanol o Alcohol metílico (CH_3OH), a condiciones normales y a temperatura ambiente, se presenta en estado líquido e incoloro, siendo tóxico e inflamable³⁹

Dentro de las propiedades fisicoquímicas del metanol a condiciones normales se encuentran:

³⁵ GOMEZ, Cristian. Tipos de reactores con sus características [sitio web]. Santander. [consultado: Octubre 23 del 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/11977961/Tipos_de_Reactores_con_sus_características.

³⁶ GOMEZ, Cristian. Tipos de reactores con sus características [sitio web]. Santander. [consultado: Octubre 23 del 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/11977961/Tipos_de_Reactores_con_sus_características.

³⁷ GOMEZ, Cristian. Tipos de reactores con sus características [sitio web]. Santander. [consultado: Octubre 23 del 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/11977961/Tipos_de_Reactores_con_sus_características.

³⁸ GOMEZ, Cristian. Tipos de reactores con sus características [sitio web]. Santander. [consultado: Octubre 23 del 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/11977961/Tipos_de_Reactores_con_sus_características.

³⁹ MÉNDEZ, Ángeles. Metanol. {En línea}. Diciembre del 13 del 2010. Disponible en: <https://quimica.laguia2000.com/quimica-organica/metanol>

Tabla 1. Propiedades Físicoquímicas del Metanol

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Estado físico	Líquido	-
Color	Incoloro	-
Solubilidad en agua	Miscible	-
Peso Molecular	32,04	G
Densidad	0.7918	g/cm ³
Punto de Ebullición	64.7	°C
Punto de fusión	-97,1	°C
Inflamabilidad	385	°C

Fuente: METANOL (ALCOHOL METÍLICO). [sitio web]. Barcelona. [Consultado: Julio 25 del 2019] Disponible

en:https://www.juntadeandalucia.es/servicioandaluzdesalud/hrs3/fileadmin/user_upload/area_servicios_generales/prevencion_riesgoslaborales/fichas_seguridad/metanol.pdf

De los puntos de fusión y ebullición se puede inferir que el metanol es un líquido volátil a temperatura y presión atmosférica. La causa de la diferencia entre los puntos de ebullición entre los alcoholes y los hidrocarburos de similares pesos moleculares como el metanol y el etano (30 g/mol) radica en que las moléculas de los alcoholes se atraen entre sí con mayor fuerza, en este caso del metanol estas fuerzas son de puente de hidrógeno⁴⁰ por lo que hace esta diferencia más notoria.

El metanol es considerado como material inflamable de primera categoría ya que tiene la capacidad de emitir vapores que al mezclarse con el aire originan mezclas combustibles. Teniendo así el metanol un gran poder calorífico que al combustionar genera una llama incolora con punto de inflamación igual a 12,2 °C⁴¹.

La materia prima en el proceso de producción de metanol en lo que a Colombia respecta es el gas natural, aunque también puede ser obtenido por medio de fermentación empleando microorganismos siendo este proceso de un alto costo. Se ha explorado la producción de metanol a partir de gas de síntesis por combustión de biomasa ligno-celulósica⁴², denominándose así bio-metanol.

⁴⁰, RODRIGUEZ, Roberto., URIBE ECHAVARRIA, Milena. Obtención de Metanol Propiedades-Usos. {En línea}. Disponible en: http://www.edutecne.utn.edu.ar/procesos_fisicoquimicos/Obtencion_de_Metanol.pdf

⁴¹ RODRIGUEZ, Roberto., URIBE ECHAVARRIA, Milena. Obtención de Metanol Propiedades-Usos. {En línea}. Disponible en: http://www.edutecne.utn.edu.ar/procesos_fisicoquimicos/Obtencion_de_Metanol.pdf

⁴² CARDONA ALZATE, Carlos Ariel., ORREGO ALZATE, Carlos Eduardo., GUITIÉRREZ MOSQUERA, Luis Fernando. Biodiesel. Manizales, Caldas, Julio 2009, p 39. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

1.9 BIODIÉSEL

El biodiésel es un biocombustible renovable compuesto de Alquil-ésteres de alcoholes de cadena corta como etanol y metanol, con ácidos grasos obtenidos a partir de Biomasa renovable⁴³. Es un combustible de origen vegetal que puede reemplazar los carburantes convencionales de origen fósil como el diésel o ACPM. La sociedad americana para Pruebas y Materiales (ASTM), establece una definición más técnica del biodiésel como de la mezcla del mismo, donde se establece:

- **Biodiésel, n:** Combustible compuesto de esterres mono-alcalinos de ácidos grasos, derivados de aceites vegetales o grasas animales denominado B100⁴⁴.
- **Biodiésel mezcla, n:** Mezcla de este junto con el diésel derivado del petróleo y denominado BXX, en donde XX hace referencia al porcentaje en volumen de biodiésel presente en la mezcla.

Existen diferentes metodologías para la producción de biodiésel, una de ellas es la reacción de transesterificación siendo esta la más empleada para su obtención. Debido a que las características del biodiésel son similares a las del diésel comercial no es necesario hacer grandes cambios en el motor para poder emplear el biocombustible. Entre las ventajas que tiene el biodiésel se encuentra la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, genera menor dependencia de los combustibles fósiles, es gran fuente de energía renovable y biodegradable, posee propiedades lubricantes que reducen el desgaste de los motores y es seguro para emplearlo en transporte⁴⁵.

El biodiésel puede emplearse puro (B100) o mezclado con diésel de petróleo en distintas proporciones como por ejemplo B20, donde describe una concentración del 20 % de biodiésel y 80 % de diésel, siendo esta la más empleada⁴⁶.

⁴³ FERNANDEZ, Luis Carlos. Montiel, Jorge. MILLÁN, Aarón. Producción de Biocombustibles a partir de Microalgas. {En línea}. Septiembre del 2012. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46125177011.pdf>

⁴⁴ BIODIÉSEL. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las américas [sitio web]. Costa Rica. [consultado: agosto 07 del 2019]. Disponible en: <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Atlas%20de%20Bioenergía%20y%20Combustibles%202.pdf>.

⁴⁵ LOPEZ QUIÑONES, Diego Alejandro. Obtención de biodiésel a partir de residuos de aguacate producido mediante el método de transesterificación en un reactor tipo Batch. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería Mecánica, 2007. 18-20 p.

⁴⁶ GANDUGLIA, Federico. Manual de biocombustibles. [sitio web]. Octubre de 2009. [consultado agosto de 2019]. Disponible en: http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Manual_Biocombustibles_ARPEL_IICA.pdf

Su uso en motores de combustión interna que emplean diésel se debe a que, en primera medida, su naturaleza es biodegradable y renovable siendo así una alternativa de desarrollo sostenible; y segundo, su quema genera reducción de emisiones contaminantes al medio ambiente en comparación con el diésel convencional.

Entre las ventajas del biocombustible está su contenido de oxígeno (11% en peso) y que no contiene azufre lo que mejora el proceso de combustión y disminuye su potencial de oxidación⁴⁷, a esta misma cantidad de oxígeno se debe que el biodiésel se degrada 4 veces más rápido que el diésel tradicional. En promedio después de 28 días el biodiésel es biodegradado en un 77 % a un 89 % mientras que el diésel en un 18 %⁴⁸.

Así como tiene grandes ventajas la producción de este biocombustible posee desventajas como el desempeño mecánico, ya que la potencia del motor disminuye debido a que el poder calorífico del biodiésel es menor por lo cual genera un consumo de combustible mayor para lograr el desempeño del diésel, conllevando un mayor costo para su empleo⁴⁹.

El Biodiésel aparte de ser ecológico y energético, también tiene la gran ventaja de emplearse en los motores de combustión interna inmediatamente al obtenerse, debido a que produce una correcta y completa combustión sin requerir ningún tipo de modificación en los motores; adicional a esto, el uso de biodiésel aumenta la vida útil de los motores debido a que posee gran lubricación.

La calidad del biocombustible como su uso en los motores debe seguir unos requerimientos adoptados por la norma técnica colombiana (NTC 5444) de la "American Society for Testing and Materials" (ASTM) para el fomento del uso de esta nueva fuente de energía alternativa. En la tabla 2 se evidencian algunos de los parámetros relevantes que debe cumplir este biocombustible.

⁴⁷ LOPEZ QUIÑONES, Diego Alejandro. Obtención de biodiésel a partir de residuos de aguacate producido mediante el método de transesterificación en un reactor tipo Batch. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería Mecánica, 2007. 18-20 p.

⁴⁸ AVELLANEDA, Fredy. Producción y caracterización de biodiésel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso Batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Tesis doctoral. Tarragona. Universidad Rovira I Virgili. Departamento de ingeniería química, 2010.

⁴⁹ LOPEZ QUIÑONES, Diego Alejandro. Obtención de biodiésel a partir de residuos de aguacate producido mediante el método de transesterificación en un reactor tipo Batch. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería Mecánica, 2007. 20 p.

Tabla 2. Especificaciones de las propiedades de Biodiésel.

Propiedad	Unidades	Requisito	Métodos de ensayo.
Densidad a 15 °C	kg/m ³	860-900	ASTM D4052 ISO 12185 ISO 3675 (3)
Número de cetano	Cetanos	55 mínimo	ASTM D613 ISO 5165
Viscosidad Cinemática a 40 °C	mm ² /s	3,5 – 5,0	ASTMD445 ISO 12937
Contenido de agua	mg/kg	24 máximo	ASTM E203 ISO 12937
Contaminación total	mg/kg	24 máximo	En 12662
Punto de inflamación	°C	120 mínimo	ISO 2719 (4,5) ISO 3679 (6)
Contenido de metanol	% en masa	0,2 máximo	En 14110
Corrosión en lámina de cobre	Unidad	Clase1	ASTM D130 ISO 2160
Estabilidad a la oxidación.	Horas	12 mínimo	En 14112 En 15751
Cenizas sulfatadas	% en masa	0,02 máximo	ASTM D874 ISO 3987
Número de ácido	mg de KOH/g	0,5 máximo	ASTM D664 En 14104
Índice de yodo	g yodo/ g muestra	120 máximo	En 14111
Punto de fluidez	°C	Reportar (1)	ASTM D97
Punto de nube/enturbiamiento	°C	Reportar (1)	ASTMD2500 ISO 3015
Contenido de fósforo	mg/kg	4,0 máximo	ASTM D4951 ISO 14107
Carbón residual	% en masa	0,3 máximo	ASTM D 4530 ISO 10370 (5)
Contenido de sodio y potasio	mg/kg	5 máximo	ASTM D 5853 En 14109 En 14108
Contenido de calcio y magnesio	mg/kg	5 máximo	ASTM D 5853 En 14109 En 14108
Contenido de monoglicéridos	% en masa	0,70 máximo	ASTM D6584 ISO 14105

Tabla 2. (Continuación)

Propiedad	Unidades	Requisito	Métodos de ensayo.
Contenido de Diglicéridos	% en masa	0,20 máximo	ASTM D 6584 ISO 14105
Contenido de Triglicéridos	% en masa	0,20 máximo	ASTM D 6584 ISO 14105
Glicerina libre y total	% en masa	0,02/ 0,25	ASTM D 6584 ISO 14105 ISO14106
Contenido de metanol o etanol	% en masa	0,2 máximo	ISO 14110
Contenido de éster	% en masa	96,5 mínimo	En 14103

Fuente: elaboración propia. Con base en: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 5444. Bogotá D.C.: El instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018. 4-5 p.

1.9.1 Biodiésel de segunda generación. Es producido a partir de materias primas como residuos agroindustriales y plantas herbáceas de alta producción de biomasa, siendo está la alternativa desarrollada para el proyecto.

1.9.2 Biodiésel en el mundo: Con el pasar del tiempo ha tomado más auge el empleo de bioenergías que permiten contribuir con la disminución de los problemas ambientales que genera el empleo de los combustibles fósiles, por lo cual el uso de biocombustibles, es una gran alternativa para mitigar los impactos negativos que genera la combustión de los derivados del petróleo.

Para contribuir con el desarrollo de energías alternativas se están empleando biomasa para la producción de bioetanol, biogás y biodiésel teniendo así energías más limpias y renovables, los cuales hoy en día tienen un papel importante en el mercado y en expansión a nivel mundial.

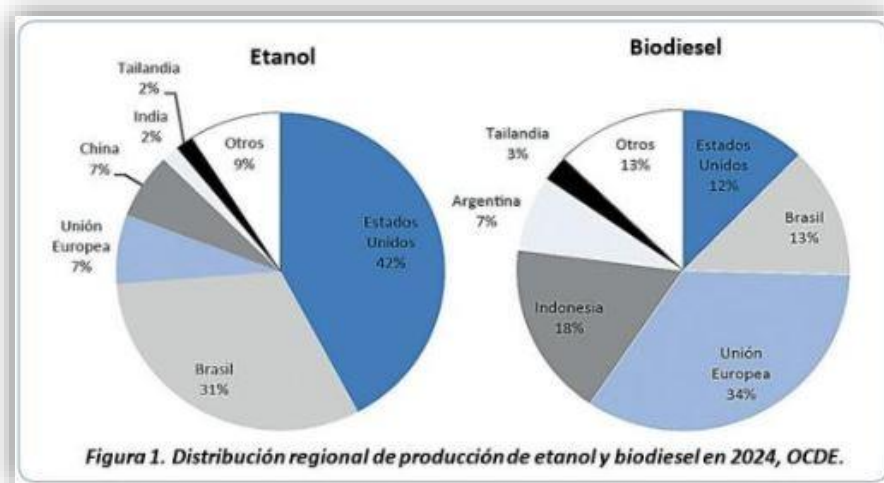
Este biocombustible puede ser empleado en vehículos con motor diésel. Por lo general se puede emplear en vehículos de transporte. Su correcta obtención genera una composición química de similar a la del diésel comercial, con la gran ventaja de que su combustión es más limpia y por ende tiene un impacto positivo ambientalmente hablando. Adicional a ello es un biocarburante biodegradable, su uso ya sea puro o en mezcla es viable y económicamente competitivo.

A nivel mundial, Europa emplea el biodiésel tanto puro (B100) como en mezcla con diésel en proporciones B5 y B20. Brasil y Argentina utilizan una mezcla obligatoria B5 del biocombustible. El uso del biodiésel en México representa un 7 % de

economía respecto al diésel tradicional, en mezcla maneja una proporción B10 y B20 sin conllevar modificaciones en los motores⁵⁰.

Respecto a la producción de biodiésel, de acuerdo con la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, se estima que la producción mundial de biodiésel llegue a 39 mil millones para 2024 con un incremento del 27 % respecto al 2014. En la gráfica 1 se evidencia esta estimación en la Unión Europea, Indonesia, Brasil, Estados Unidos, Argentina y entre otros.

Gráfica 1. Proyección de la producción de biodiésel para el año 2024.



Fuente: BIODIÉSEL, la alternativa verde. Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: octubre 21 del 2019] Disponible en: https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-2780-titulo-biocombustibles__la_alternativa_verde.htm.

1.9.3 Biodiésel en Colombia. El uso de biodiésel en Colombia se dio gracias a un proyecto de ley que hacía posible la producción de este biocombustible bajo el mandato del ex presidente Álvaro Uribe. La ley 939 del 2004 fue el punto de partida para la producción y empleo de la mezcla biodiésel - diésel para dar inicio el 1 de enero del 2008. La política de los biocombustibles en el país se da también gracias a la disponibilidad de materia prima ya que Colombia cuenta con gran disponibilidad de suelo, altas precipitaciones, luminosidad y afluencia de fuentes hídricas⁵¹.

La producción y comercialización de este biocombustible trajo consigo beneficios en el país como exenciones de impuestos, ya que los consumidores no deben pagar

⁵⁰ BIOCMBUSTIBLES. Situación del mercado. [sitio web]. 2017. [consultado el 21 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-BT092s.pdf>

⁵¹ SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, Martha Helena. Evolución de los biocombustibles en Colombia y su incidencia sobre el precio de los alimentos. Trabajo de grado Magister en ciencias económicas. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas, 2015. 25-29 p.

los impuestos por el porcentaje de los biocombustibles mezclados caso contrario a los combustibles fósiles. Adicionalmente a esto la generación de empleo en el sector agroindustrial ya que la construcción de una planta productora de biocarburantes conlleva inversiones equivalentes a 75,000 salarios mínimos mensuales, por lo anterior dichas plantas podría ser catalogada por el gobierno como zonas francas lo cual permite exonerar de arancel los equipos y materias primas⁵².

En el país para la producción del biodiésel se implementa como materia prima principal el aceite de palma debido al rendimiento que posee frente a otros aceites además de generar mayor eficiencia energética. Para el 2008 fue necesario adaptar las tierras cultivadas para el aprovechamiento de su potencial energético y económico. El desarrollo de la industria se ha focalizado en la Costa Atlántica alrededor de las grandes plantaciones de palma en Bolívar y Cesar⁵³.

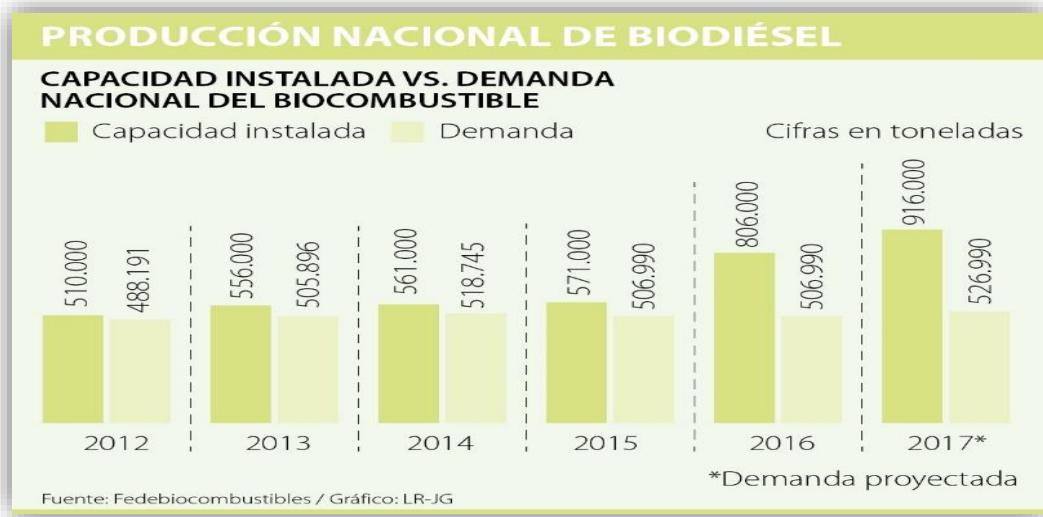
A continuación, en la figura 7, en base a Fedebiocombustibles se evidencia que en el país se cuenta con gran disponibilidad de capacidad instalada la cual puede suplir la demanda que se tiene de biocombustibles. Para el año 2016 la producción de biodiésel llegó a 447,768 toneladas, representó una caída del 12,7 % respecto al año anterior. Así mismo se establece que Colombia cuenta con una capacidad instalada de 850,000 toneladas / año para la producción de biodiésel, de las cuales el mercado consume 550,000 toneladas por lo que las refinerías con las cuales cuenta el país pueden producir 300,000 más⁵⁴.

⁵² MITOS y LEYENDAS de los biocombustibles en Colombia. Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: octubre 21 del 2019] Disponible en: [http://www.fedebiocombustibles.com/files/REVISTA%20MITOS%20Y%20REALIDADES\(1\).pdf](http://www.fedebiocombustibles.com/files/REVISTA%20MITOS%20Y%20REALIDADES(1).pdf)

⁵³ SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, Martha Helena. Evolución de los biocombustibles en Colombia y su incidencia sobre el precio de los alimentos. Trabajo de grado Magister en ciencias económicas. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas, 2015. 27 p.

⁵⁴ PRODUCCIÓN NACIONAL de biodiésel podría atender la demanda del biocombustible. Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: octubre 21 del 2019] Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-2894.htm>.

Gráfica 2. Producción Nacional de biodiésel.



Fuente: PRODUCCIÓN NACIONAL de biodiésel podría atender la demanda del biocombustible. Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: octubre 21 del 2019] Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-2894.htm>.

2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EXTRACCIÓN ACEITE ASERRÍN DE CAFÉ

La extracción de aceite se puede llevar a cabo por distintos métodos como extrusión, extracción con fluido supercrítico (SFE) y extracción en fase sólida (soxhlet). La primera consiste en la compresión en frío de los granos, estas al estar molidas se someten a prensado. Las prensas que se emplean pueden ser hidráulicas o discontinuas y continuas, por economía en temas de instalaciones se suele emplear más estas últimas. La extracción SFE, es una técnica de separación de sustancias disueltas que utiliza la habilidad de compuestos de convertirse en disolventes para determinados solutos modificando su capacidad de disolución a determinada temperatura y presión. El termino supercrítico es importante resaltar que hace referencia a que un gas o liquido se encuentre por encima de su temperatura y presión crítica⁵⁵.

2.1 MÉTODO DE EXTRACCIÓN

Con el fin de separar la muestra de interés se seleccionó el método de extracción en fase sólida, soxhlet, por razones económicas, por la fácil disponibilidad de los equipos según Palacios⁵⁶

La extracción Soxhlet también conocida como lixiviación, la extracción sólido líquido es una operación de ingeniería química que tiene gran uso en procesos industriales, mediante la cual se separan componentes de sólidos disolviéndolos en líquidos. El empleo de un disolvente o mezcla de ellos tiene como fin extraer selectivamente uno o varios solutos que se hayan dentro de una matriz sólida⁵⁷. El componente o componentes que se transfieren se denominan "solute" y el sólido insoluble se denomina "inerte", bajo un proceso de transferencia de masa.

La extracción sólido - líquido puede ser una operación de régimen permanente o intermitente según los volúmenes que se manejen. El mecanismo de transferencia de masa se realiza inicialmente con la difusión del disolvente a través del sólido,

⁵⁵ PANTOJA, Ana Lucia. Extracción de aceites con fluidos supercríticos a partir de semillas de frutas con potenciabilidad en la industria cosmética. [En línea]. Trabajo de investigación Magister en Ingeniero Agroindustrial. Palmira. Universidad Nacional de Colombia. Facultad Ingeniería y administración. Departamento Ingeniería Química, 2016. 14 p. [consultado: 16 de agosto de 2016]. Disponible en: http://bdigital.unal.edu.co/54767/1/Tesis-Ana_Lucia_Pantoja_Chamorro-2016.pdf.

⁵⁶ PALACIOS, Julio Cesar y SANCHEZ, Regina. Diseño, construcción y evaluación de parámetros de operación de un equipo de extracción sólido-líquido para el laboratorio de procesos unitarios de la facultad de ingeniería química de la universidad nacional de Perú. Trabajo de grado ingeniero químico. Huancayo: Universidad Nacional de Perú. Facultad de ingeniería, 2008. 3-20 p

⁵⁷ PALACIOS, Julio Cesar y SANCHEZ, Regina. Diseño, construcción y evaluación de parámetros de operación de un equipo de extracción sólido-líquido para el laboratorio de procesos unitarios de la facultad de ingeniería química de la universidad nacional de Perú. Trabajo de grado ingeniero químico. Huancayo: Universidad Nacional de Perú. Facultad de ingeniería, 2008. 3-20 p.

seguido de la disolución del soluto en el disolvente y finalmente la transferencia del soluto desde el interior a la superficie y luego hacia la solución como consecuencia del gradiente de la concentración.

2.2 VARIABLES

Para la extracción es necesario tener presente que los sólidos como portadores de soluto, son de gran importancia en la operación. Para que el soluto a emplear sea accesible con cualquier disolvente se tiene en cuenta su estructura y caracteres físicos y por lo general los solutos pasan por tratamientos mecánicos o térmicos antes de la operación de extracción por medio de operaciones de preparación como trituración, pulverización, compresión, calentamiento, tratamiento con vapor o humedecimiento. Adicionalmente a esto se debe tener en cuenta las variables que están ligadas a la extracción tanto de manera independiente como dependiente, las cuales se describen a continuación.

2.2.1 Variables Independientes

- Relación masa de disolvente a masa de aserrín de café: es la cantidad relativa del disolvente con respecto a la cantidad de aserrín de café⁵⁸. De esta relación depende el porcentaje de aceite a extraer.
- Tiempo de contacto entre disolvente y aserrín de café: es una variable medible en unidades de tiempo en la cual dos componentes químicos entran en contacto para lograr una reacción determinada.⁵⁹ En este caso, es el tiempo que tiene que estar en contacto el disolvente y el aserrín de café para la extracción del correspondiente aceite.
- Temperatura del disolvente al entrar en contacto con el aserrín de café: es la cantidad de energía que contiene un componente químico para obtener mayor eficiencia en la reacción.⁶⁰ Para la extracción del aceite de aserrín de café se expresa en grados Celsius que requiere el disolvente para extraer el contenido presente en el aserrín.

⁵⁸ PINEDA, Wendy Carolina. Estudio y desarrollo técnico-económico para la extracción del aceite contenido en la pulpa de café. Trabajo de grado licenciatura en ingeniería química industrial. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. Facultad de ingeniería, 2004. 31-49 p.

⁵⁹ PINEDA, Wendy Carolina. Estudio y desarrollo técnico-económico para la extracción del aceite contenido en la pulpa de café. Trabajo de grado licenciatura en ingeniería química industrial. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. Facultad de ingeniería, 2004. 46-49 p.

⁶⁰ PINEDA, Wendy Carolina. Estudio y desarrollo técnico-económico para la extracción del aceite contenido en la pulpa de café. Trabajo de grado licenciatura en ingeniería química industrial. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. Facultad de ingeniería, 2004. 46-49 p.

- Tamaño de partícula del aserrín de café: es la característica de una partícula sólida y de su tamaño depende el contacto con el disolvente.⁶¹

2.2.2 Variables dependientes

- Porcentaje de aceite extraído del aserrín de café: se refiere a la cantidad de aceite contenido en determinados gramos de muestra después de llevada a cabo la extracción.⁶²

2.3 FACTORES

- Selección del disolvente: la escogencia de un disolvente adecuado contribuye a obtener una extracción más eficaz. Existe gran variedad de líquidos que se pueden emplear para tal operación; un punto de importante consideración es que sea recuperable para su posterior uso en otros ensayos, su densidad lo que ayuda a la separación; debe ser estable e inerte químicamente con respecto a los otros componentes de la separación; y para que contribuya con el medio ambiente, no debe ser de gran toxicidad.
- El tamaño de partícula: es otro factor que tiene influencia en la velocidad de extracción ya que cuanto más pequeño sea mayor es el área de contacto entre el sólido y el líquido por lo cual hay mayor velocidad de transferencia de masa.
- La temperatura de extracción: se ve influenciada debido a que su incremento conlleva que la velocidad de extracción se acelere, lo que genera que el coeficiente de difusión sea mayor. La temperatura máxima para llevar a cabo la operación se ve limitada por el punto de ebullición del disolvente.

En el proceso de extracción se consideran los siguientes pasos para llevarlo a cabo

- Preparación del sólido para la extracción.
- Contacto del disolvente con el sólido (aserrín de café).
- Separación de la disolución del resto del sólido.
- Separación aceite-disolvente y recuperación del mismo por medio de destilación o evaporación.

⁶¹ PINEDA, Wendy Carolina. Estudio y desarrollo técnico-económico para la extracción del aceite contenido en la pulpa de café. Trabajo de grado licenciatura en ingeniería química industrial. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. Facultad de ingeniería, 2004. 46-49 p.

⁶² CANO AMÓRTEGUI, Manuel Andrés. Evaluación de la producción de biodiesel a partir de aserrín de moringa olifeira asistido por la técnica de ultrasonido. Bogotá, 2015, P 22. Universidad libre. Facultad d ingeniería. Departamento ingeniería ambiental.

2.4 EXTRACCIÓN DE ACEITE ASERÍN DE CAFÉ

De acuerdo con el fundamento mencionado en el numeral 2.1 se extrajo el aceite del aserrín de café por medio de una extracción sólido líquido haciendo uso de disolventes orgánicos, la cual se caracteriza por su rendimiento y la recuperación del disolvente empleado. La solución obtenida aceite-solvente (micela) se llevó a destilación para separar el aceite del disolvente.

2.4.1 Adecuación de materia prima. El aserrín de café a emplear proviene de la cafetería Café y Leyenda de la Fundación Universidad de América, donde se evidenció gran disponibilidad del residuo por su constante uso para toda la comunidad. En una jornada laboral diaria se pudo obtener 500 gramos en las dos primeras horas de operación de la cafetería para su posterior almacenamiento y secado.

El aserrín es secado posteriormente en un horno a 105 °C durante 4 horas para asegurar la reducción de humedad presente en la muestra⁶³.

2.4.2 Selección de disolvente. Existen gran variedad de disolventes que pueden emplearse para la extracción de aceites. Los más habituales son agua acidificada, etanol, metanol, Isopropanol, hexano, ciclohexano, tolueno, xileno, éter etílico, éter isopropílico, acetona, cloroformo, entre otros⁶⁴. Se debe escoger el disolvente más apropiado para llevar a cabo la operación.

La Asociación Italiana de Ingeniería Química realizó un estudio de los posos de café para la producción de biodiésel, en donde se plantea un estudio experimental de varios disolventes, tanto puros como mezclados entre ellos para la extracción de aceite de café, tales como hexano, Isopropanol, etanol, octano, heptano, mezcla de hexano Isopropanol en diferentes proporciones. El disolvente que permitió una mayor extracción de aceite fue el octano, pero con la menor recuperabilidad del mismo y el mayor tiempo de extracción. Tanto el etanol y el hexano lograron extraer menor cantidad de aceite, donde el primero demora más que el hexano para cumplir con la extracción y con menor recuperación. Teniendo en cuenta tiempo de extracción y valor de recuperación, el estudio concluye que el hexano permite la extracción de aceite y un tiempo mayor de extracción y gran capacidad de recuperabilidad. Por otro lado el Isopropanol, permitió una mayor extracción de aceite, con un tiempo y recuperabilidad considerable. Pero la mezcla hexano Isopropanol tiene mayor capacidad de extracción de aceite pero baja recuperación de disolvente, con menor tiempo de extracción en comparación al hexano el cual es el más empleado para llevar a cabo esta operación, siendo el disolvente más empleado en la actualidad por su fácil manejo, bajo punto de ebullición, bajo costo,

⁶³ CAETANO S., Nidia; SILVA, Vania y MATA, Teresa. Valorization of coffee grounds for biodiesel production. The Italian Association of Chemical Engineering. Italia, 2012, Vol.26. ISSN 1974-9791.

⁶⁴ TABIO GARCÍA, Danger, *et al.* Extracción de aceites de origen vegetal. Monografía. 2017. 10 p.

gran disponibilidad y de gran recuperación generando menos pérdidas durante el proceso.

Teniendo como fundamento el estudio anteriormente presentado, se estableció el uso de hexano, y mezcla del mismo en una relación 50:50 v/v con Isopropanol para la extracción del aceite de aserrín de café.

El Isopropanol, mayor punto de ebullición y densidad en comparación al hexano, de fácil disponibilidad, económico, es de gran uso en la industria ya sea para cosmética, como anticongelante, productos de limpieza, conservante, como disolvente para extracción, entre otros.

Tabla 3. Propiedades de los Disolventes de estudio

DISOLVENTE	PROPIEDADES				COSTO (\$)
	DENSIDAD (g/cm ³)	VISCOSIDAD (cp)	TEMPERATURA EBULLICIÓN (°C)	FLASH POINT (°C)	
Octano	703	0,542 (20 °C)	126	13	-
Heptano	0.684	0,408 (20°C)	98	-4	-
Etanol	0,789	1,074(25°C)	78,5	13	16,000 (Galón)
Hexano	0,659	0,294 (25°C)	69	-22	22,000 (250 mL)
Isopropanol	0,785	2,08 (25 °C)	82,4	12	7,000(250mL)

Fuente: elaboración propia. Con base en: Division of organic chemistry. American chemical society. Common solvents used in organic chemistry: Table of properties. [sitio web]. Bogotá. [Consultado: Marzo del 2019]. Disponible en: https://www.organicdivision.org/wpcontent/uploads/2016/12/organic_solvents.html

2.4.3 Parámetros de extracción. Tomando como base el estudio anteriormente mencionado, para la extracción se realizó inicialmente la operación con hexano, donde se tomaron tres cantidades distintas (20, 25,40 g) de aserrín de café y 200 mL de disolvente⁶⁵.

La segunda parte de la operación de extracción se llevó a cabo con la mezcla de hexano e Isopropanol en una relación 50:50 (v/v)⁶⁶ con las mismas cantidades de aserrín empleadas en la extracción mediante hexano.

⁶⁵ CAETANO S., Nidia; SILVA, Vania y MATA, Teresa. Valorization of coffee grounds for biodiesel production. The Italian Association of Chemical Engineering. Italia, 2012, Vol.26. ISSN 1974-9791

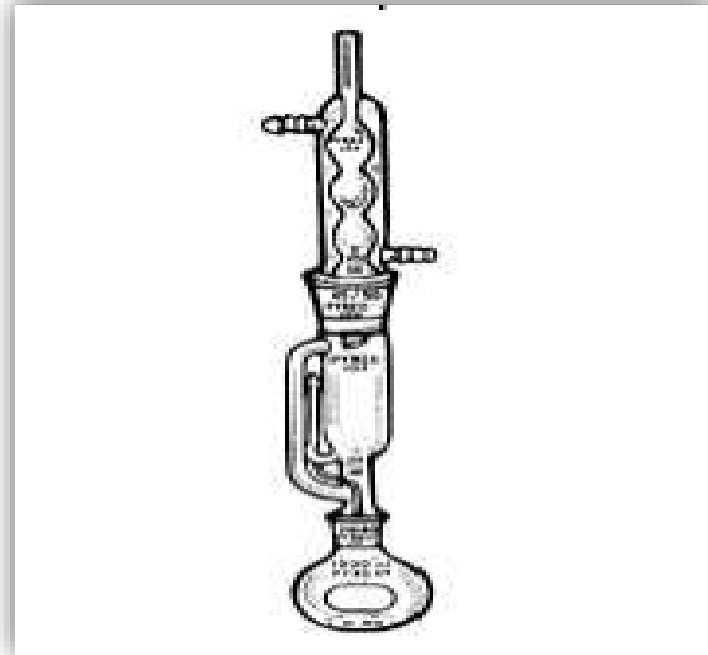
⁶⁶ CAETANO S., Nidia; SILVA, Vania y MATA, Teresa. Valorization of coffee grounds for biodiesel production. The Italian Association of Chemical Engineering. Italia, 2012, Vol.26. ISSN 1974-9791

En ambos casos se empleó un montaje soxhlet, donde la muestra se ubicó en la cámara de extracción en filtros de café, a una temperatura de 69 °C y 82°C para hexano y hexano- Isopropanol respectivamente. Al calentar los disolventes el vapor de este asciende para condensarse en el refrigerante y caer dentro de la cámara de extracción para impregnar la muestra ubicada en el filtro. Este mismo se va llenando lentamente de líquido hasta llegar a realizar su descarga dentro del balón por efecto de sifón junto con el aceite extraído. Se realizaron cuatro sifones para cada montaje con el fin de extraer todo el aceite posible.

Posteriormente, al tener la muestra aceite-disolvente se realizó una destilación para separar la mezcla y recuperar disolvente para su posterior uso en otro experimento.

2.4.4 Remoción de impurezas del aceite extraído. El aceite extraído para una mayor limpieza se llevó a calentamiento a 100 °C con el fin de eliminar el disolvente residual en la muestra, para finalmente realizar una filtración, eliminando cualquier partícula del aserrín de café.

Figura 6. Equipo Soxhlet a nivel laboratorio.



Fuente: PINEDA, Wendy Carolina. Estudio y desarrollo técnico-económico para la extracción del aceite contenido en la pulpa de café. Trabajo de grado licenciatura en ingeniería química industrial. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. Facultad de ingeniería, 2004. 32 p

2.5 CARACTERIZACIÓN

El aceite de café extraído se caracterizó mediante la determinación del índice de acidez, el índice de yodo, índice de saponificación, densidad y viscosidad para garantizar la viabilidad de la muestra para la posterior producción del Biodiésel.

2.5.1 Porcentaje de Aceite extraído. Para determinar el porcentaje del aceite extraído se pesó el aserrín de café antes y después de la extracción en base seca. La determinación de la cantidad de aceite extraído se realizó aplicando la ecuación 1.

Ecuación 1. Porcentaje de aceite extraído

$$\%A = 100 \% - \left(\frac{m_f}{m_i} * 100 \right)$$

Fuente: CANO AMÓRTEGUI, Manuel Andrés. Evaluación de la Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Moringa Oleífera asistido por la Técnica de Ultrasonido. Bogotá, 2015, p 22. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental.

Donde:

- %A: Porcentaje en masa presente en el aserrín de café, %.
- m_f : Peso final del aserrín de café después de la extracción, g.
- m_i : Peso inicial del aserrín de café antes de la extracción, g.

2.5.2 Densidad.(NTC 237- ASTM D 4052). Es la relación de la masa, en este caso de una grasa en aire con su volumen a una temperatura dada. El principio bajo el cual se determina es la medida de la masa a una temperatura determinada, de un volumen de grasa líquida en un picnómetro⁶⁷.

El valor de la densidad no varía al determinarla para un aceite que se encuentre puro, por el contrario, incide en este parámetro la edad, rancidez y cualquier tratamiento especial que se le haga al aceite variando su valor.

Para la determinación de este parámetro inicialmente se pesó un picnómetro de 1 mL vacío en una balanza analítica, luego se purgo el picnómetro con el aceite y finalmente se adicionó la muestra para pesar el picnómetro completamente lleno. Para calcular la densidad del aceite del aserrín de café se empleó la ecuación 2, teniendo en cuenta los pesos anteriormente medido.

⁶⁷ SANCHEZ.M, Iris Adriana y HUERTAS.G, Karina. Obtención y caracterización de biodiésel a partir de aceite de semillas de *Ricinus communis* (Higuerilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero. Trabajo de grado Químico Industrial. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de tecnología, 2012. 52 p.

Ecuación 2. Determinación Densidad.

$$\rho = \frac{W_{PM} - W_{PV}}{V_M}$$

Fuente: CANO AMÓRTEGUI, Manuel Andrés. Evaluación de la Producción de Biodiésel a partir de Aceite de Moringa Oleífera asistido por la Técnica de Ultrasonido. Bogotá, 2015, p 22. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental.

Donde:

- w_{PM} : Masa picnómetro lleno, g.
- w_{PV} : Masa picnómetro vacío, g.
- V_M : Volumen de la muestra en el picnómetro, mL.

2.5.3 Índice de Acidez. (NTC 218). El índice de acidez se expresa como el número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para neutralizar los ácidos grasos libres en un gramo de aceite.

Para su determinación se emplearon dos matraz de 250 mL, donde en el primer matraz se adicionaron 2,5 gramos de aceite. En el segundo matraz se adicionaron 50 mL de etanol al 96 % con 0,5 mL de fenolftaleína, para calentar hasta ebullición (78,6 °C). Posteriormente, se adicionó el etanol caliente al matraz con aceite para mezclar homogéneamente. Posteriormente se tituló con hidróxido de potasio (0,1 mol/L), agitando constantemente hasta que se evidenció cambio de color.

Finalmente se calcula el Índice de acidez con la ecuación 3.

Ecuación 3. Determinación Índice de Acidez

$$W_{AV} = \frac{(56,1) * V * C}{m}$$

Fuente: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Biodiésel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 218. Bogotá D.C.: El instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018. 4 p.

Donde:

- W_{AV} : Índice de acidez, mg KOH/g
- V : Volumen de KOH gastado en la titulación, mL.
- C : Concentración molar KOH (0,1 M)
- m : Masa del aceite empleado, g.

2.5.4 Índice de yodo. (NTC 283). El índice de yodo indica la tendencia que tiene el biocombustible a la oxidación, por ende, se determina el grado de instauración de los ésteres que este posee. Este parámetro depende de la naturaleza del aceite o la grasa empleada como materia prima.

Para hallar este parámetro se tomaron 0,20 g de aceite en un Erlenmeyer de 500 mL, como se especifica en la norma técnica colombiana 283, después se vertieron 20 mL de cloroformo y 25 mL de solución Wijs para dejar la muestra en zona oscura a temperatura ambiente por 60 minutos aproximadamente. Al cumplirse este tiempo se añadieron 20 mL de yoduro de potasio al 15 % y 150 mL de agua destilada para su posterior titulación con Tiosulfato de sodio 0,1 N agitando hasta que el color amarillo fuera disminuyendo y se adicionaron gotas de almidón para continuar con la titulación hasta que el color azul desapareciera. Simultáneamente a lo descrito anteriormente se prepara un blanco.

Se determina el valor del índice de yodo con la ecuación 4.

Ecuación 4. Determinación Índice de Yodo

$$VI = \frac{(V_1 - V_2) * N_{Na_2S_2O_3} * 12,69}{m_M}$$

Fuente: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 283. Bogotá D.C.: El instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018. 5 p.

Donde:

- VI : Índice de yodo
- V_1 : Volumen de Tiosulfato de sodio gastado en el blanco, mL.
- V_2 : Volumen de Tiosulfato de sodio gastado en el aceite, mL.
- $N_{Na_2S_2O_3}$: Normalidad del Tiosulfato de sodio.
- m_M : Cantidad de aceite empleado, g.

2.5.5 Índice de saponificación. (NTC 335). Este parámetro se encuentra relacionado con el peso molecular medio de los ácidos grasos presentes en el aceite. Determina la fracción de una muestra que puede reaccionar con hidróxido de potasio para producir jabón.

Con base en la respectiva normatividad se pesaron 2 gramos de muestra; se adicionaron a un Erlenmeyer 25 mL de solución etanólica de hidróxido de potasio 0,5 M; se acopló a este el condensador de reflujo y posteriormente el montaje a la plancha de calentamiento a temperatura de ebullición con una duración de aproximadamente 1 h. Se añadió 0,5 mL de fenolftaleína para su posterior titulación con ácido clorhídrico hasta que desapareciera el color del indicador. Simultáneamente se preparó un blanco para el mismo procedimiento anteriormente mencionado.

Para su determinación se emplea la ecuación 5.

Ecuación 5. Determinación del Índice de Saponificación.

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

Fuente: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Biodiésel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 335. Bogotá D.C.: El instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018. 4 p.

Donde:

- I_S : Índice de saponificación
- V_1 : Volumen de solución de HCL gastado en la titulación del blanco, mL.
- V_2 : Volumen de solución de HCL gastado en la titulación del aceite, mL.
- N : Normalidad de la solución HCL estandarizado.
- m : Masa del aceite empleado, g.

2.5.6 Viscosidad Cinemática: (ASTM D445). Con base en la norma ASTM D6751, la viscosidad es la resistencia a fluir de un fluido cuando se encuentra bajo el efecto de gravedad. Puede determinarse siguiendo como directriz el estándar ASTM D445.

Su determinación consiste en medir el tiempo que toma cierto volumen del líquido en fluir por gravedad a través del viscosímetro a una temperatura determinada, en este caso 40 °C, así mismo empleando un baño termostatado.

La viscosidad del biodiésel puede tener variaciones dependiendo de la naturaleza de los ácidos grasos a partir del aceite empleado como materia prima.

Es un parámetro importante ya que indica la fluidez y facilidad de atomización del combustible además de tener influencia en la lubricidad del combustible.

Experimentalmente se inició con la preparación de un baño termostático con un viscosímetro de Oswald dentro, llenando el bulbo superior con agua destilada de la cual se conoce la viscosidad y se ajustó la temperatura a 40 °C, para tomar el tiempo que tardó en fluir entre las líneas límites.

2.6 RESULTADOS

A continuación, se evidenciará los resultados obtenidos en la extracción del aceite y su respectiva caracterización con los ítems evaluados en el laboratorio.

Adicionalmente se evidencia un cálculo típico para la determinación del porcentaje de rendimiento.

$$r = \left(\frac{2,43g}{20g} \right) * 100$$

$$r = 12,15 \%$$

$$r = \left(\frac{4,01g}{20g} \right) * 100$$

$$r = 20 \%$$

2.6.1. Extracción de aceite empleando hexano: mediante la tabla 4 y 5, se puede observar el porcentaje de aceite extraído respecto a la masa de aserrín empleada al llevar a cabo la operación.

Tabla 4. Resultados de aceite extraído con hexano

Cantidad (g)	Porcentaje de Aceite extraído	Disolvente recuperado (mL)	Porcentaje de Rendimiento
20	10%	128,5	12,15% ±0,043
25	8 %	110,2	9,4%± 0,05
40	7,5%	32,5	6,85%±0.075

Fuente: elaboración propia.

2.6.2. Extracción de aceite empleando mezcla de hexano- Isopropanol

Tabla 5. Resultados de aceite extraído con hexano-Isopropanol

Cantidad (g)	Porcentaje de Aceite extraído	Disolvente recuperado (mL)	Porcentaje de Rendimiento
20	12%	45	20%±0.067
25	10%	39,2	14,6%±0.084
40	4,25%	36,4	8,85%±0.10

Fuente: elaboración propia

Los rendimientos anteriores se obtienen por medio de tres réplicas y mediante la aplicación de la ecuación 6 como se puede evidenciar a continuación:

Ecuación 6. Determinación del rendimiento de extracción

$$r = \left(\frac{g \text{ aceite obtenidos}}{g \text{ aserrin empleado}} \right) * 100$$

Fuente: Revista cubana de farmacia [en línea]. Instituto de Farmacia y Alimentos Universidad de la Habana, enero-abril, 2001, nro. 1. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75152001000100008

Los valores de rendimiento tuvieron tendencia a disminuir conforme se aumentó la masa de aserrín empleada, debido a que, a mayor masa de aserrín se requería más tiempo, pero por cuestiones del uso del laboratorio, se tenía limitado el mismo para completar la operación.

Los rendimientos obtenidos mediante el uso de hexano para las tres cantidades de aserrín empleadas fueron inferiores a lo reportado en el artículo "Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing"⁶⁸. A pesar de ser relativamente bajos, estudios elaborados por el Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFÉ), plantea que el rendimiento de extracción de aceite del aserrín por reflujo es de un 9 a 10% en promedio empleando éter de petróleo.

Empleando la mezcla hexano Isopropanol en una relación 50:50 (v/v), se obtuvieron los mejores rendimientos para las tres cantidades de aserrín de café empleadas y consigo un menor tiempo de extracción en comparación a la extracción por medio

⁶⁸ AL-HAMMARE, Zayed; FOERSTER, Sascha; HARTMAN, Franziska; KROGER, Michael y KALTSCHMITT, Martin. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. En: El Sevier. 12, junio, 2012, 70-76 p.

de hexano, siendo este de 4 horas. Su desventaja radica en que tiene menor capacidad de recuperación de disolvente y por ende su uso en otras extracciones es menor. Lo cual comprueba lo mencionado en el artículo, valorización de los posos de café⁶⁹, donde indican el anterior comportamiento para estos dos mismos disolventes.

El porcentaje de aceite extraído varió respecto a la cantidad de aserrín empleada. Según el artículo de evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para producción de biodiésel para la red de revistas científicas en América Latina⁷⁰, establece que el contenido de aceite extraído tanto en los granos de café como en el aserrín es del 10% al 15 %. De acuerdo al porcentaje obtenido por medio del desarrollo experimental se evidencia que la mezcla hexano-Isopropanol conlleva a tener mejores resultados respecto al hexano teniendo similitud con lo estipulado en el artículo anteriormente mencionado.

2.6.3. Caracterización de Aceite: la caracterización de aceite se llevó a cabo en el laboratorio de la Universidad de América. Es importante resaltar que la caracterización no se realiza por cromatografía por los elevados costos que esta conlleva.

Se determinó en el laboratorio el índice de acidez, de yodo, de saponificación el cual permitió la determinación del peso molecular del aceite, la densidad y viscosidad ambos parámetros a 40 °C. Los resultados de la caracterización realizada se pueden apreciar en la tabla 6.

⁶⁹ CAETAM, Nidia; SILVA Vania y MATA, Teresa. Valorización de los posos de café para producción de biodiésel. Asociación italiana de ingeniería química. Italia. 2012, Vol. 26, 270 p.

⁷⁰ URRIBRRI, Aidin; ZABLA, Albert; SANCHEZ, Jhon; ARENAS, Elsy, CHANDLER, Cintia; RINCÓN, Maricela; GONZLAEZ, Eduardo y MAZZARRI, Cateryna Aiello. Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiésel. *Red de Revistas Científicas en América Latina*. España. 2014, Vol. 12, nro. 2. 130-139 p. ISSN 1317-2255.

Tabla 6. Datos Caracterización de aceite de aserrín de café

Parámetro	Resultado	Unidades	Referente Bibliográfico ⁷¹
Índice de acidez	9,45	mg KOH/g aceite	61,70
Índice de yodo	86,48	g I ₂ /g aceite	54,3
Índice de saponificación	179,76	mg KOH/ g muestra	-
Densidad	894,68	kg/m ³	896,00 _(40°C)
Viscosidad Cinemática	27,92	mm ² /s	31,35 _(40°C)

Fuente: elaboración propia.

El valor del índice de acidez obtenido es mucho menor al del referente bibliográfico pero superior a la normativa correspondiente, donde el índice de acidez debe ser menor a 3, ya que una mayor acidez genera menor conversión a ésteres, además en el proceso de transesterificación conlleva la formación de jabón, consumiendo el catalizador y evitando que cumpla con su efecto en la reacción. Por lo anterior fue necesario adicionar una etapa de esterificación empleando ácido sulfúrico como catalizador para disminuir este valor al máximo posible durante cuatros horas a temperatura de 60 °C.

La viscosidad es menor al valor del referente bibliográfico a una temperatura de 40 °C. La densidad dio muy similar.

El índice de yodo se encuentra en mayor proporción para el aceite extraído en comparación al valor presentado en la tabla 6 del referente bibliográfico. Finalmente, para el índice de saponificación no se encontró ningún valor teórico para esta materia prima.

⁷¹ URRIBRRI, Aidin; ZABLA, Albert; SANCHEZ, Jhon; ARENAS, Elsy, CHANDLER, Cintia; RINCÓN, Maricela; GONZLAEZ, Eduardo y MAZZARRI, Cateryna Aiello. Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiésel. *Red de Revistas Científicas en América Latina*. España. 2014, Vol. 12, nro. 2. 130-139 p. ISSN 1317-2255.

3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

El desarrollo del presente del proyecto se basó en una investigación cuantitativa experimental. En este capítulo se desarrolló y se evaluó la producción de biodiésel a partir del aceite de aserrín de café mediante un diseño factorial donde se evaluó el proceso de transesterificación para la obtención del biodiésel a concentraciones diferentes de catalizador básico, a valores de relación molar alcohol aceite y temperatura fijos. Lo anterior con la finalidad de determinar la combinación de variables más idóneas y la eficiencia global del proceso.

3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Con base en la investigación previa se determinaron aquellos parámetros influyentes en la producción del biodiésel, para la extracción del aceite, en la reacción de transesterificación y por ende su influencia en la producción en sí. Con el fin de determinar las variables y condiciones para dicha producción, bajo la investigación cuantitativa experimental, se tuvieron en cuenta datos tanto científicos como numéricos y se estudiaron variables influyentes para la producción del biodiésel. Para tener una mayor certeza sobre la calidad del biodiésel producido, se empleó un diseño de experimentos 2^2 realizando dos réplicas en el punto medio, generando así diez combinaciones para establecer la más adecuada.

3.1.1 Hipótesis. Se podrá producir biodiésel a partir del aceite de aserrín de café, teniendo la mejor combinación de parámetros tales como temperatura y concentración de catalizadores más idóneos con el mayor rendimiento posible, cumpliendo los requisitos necesarios para obtener un biodiésel que cumpla con los estándares estipulados por la normatividad correspondiente tanto nacional e internacionalmente.

3.1.2 Selección de factores. La reacción de transesterificación se puede llevar a cabo haciendo uso de condiciones diferentes teniendo en cuenta el medio catalítico donde se realizará la reacción ya sea ácido o básico.

La reacción de transesterificación de catálisis básica su principio es el uso de KOH o NaOH como catalizador básico para su mezcla con el metanol y aceite para obtener el biodiésel. Una de las variables influyentes para llevar a cabo la reacción es la relación molar alcohol-aceite ya que repercute en el rendimiento de la reacción y se debe tener en cuenta la estequiometría de la misma ya que se requiere 3 moles de alcohol y 1 mol de triglicéridos para producir 3 moles de éster monoalquílico de ácido graso y 1 mol de glicerina. Considerando que la transesterificación es un equilibrio químico se puede generar un desplazamiento de este mismo hacia la derecha utilizando relaciones molares metanol-aceite superior a la estequiometría.

La temperatura de reacción es una variable de importancia ya que influye en la reacción y en el rendimiento de la misma, una temperatura elevada puede disminuir la viscosidad del aceite dando lugar a una mayor velocidad de reacción y una disminución en el tiempo para que se lleve a cabo. Cuando el valor de la temperatura de reacción sobrepasa el punto óptimo, la conversión del biodiésel disminuye ya que elevadas temperaturas aceleran la reacción de saponificación, es decir la transformación en jabón de los triglicéridos. Se tiene que tener en cuenta que la temperatura debe ser menor al punto de ebullición del alcohol (metanol) para evitar pérdidas por su vaporización.

La velocidad de agitación tiene incidencia en la reacción debido a que los triglicéridos y el metanol forman dos fases inmiscibles, lo cual se debe a que la concentración de los triglicéridos en metanol es baja, el rendimiento inicial de la reacción igual. Por ende, al principio de la reacción es controlada por el mecanismo de transferencia de materia. Es por tal motivo que la agitación es necesaria para aumentar la mezcla de las dos fases e incrementar la velocidad de transesterificación.

Adicionalmente a las variables y condiciones anteriormente mencionadas es importante resaltar el papel de la materia prima para llevar a cabo el proceso, debido a que existen gran variedad de materias primas que contienen triglicéridos necesarios para la obtención de biodiésel.

3.1.2.1 Factores constantes

A continuación se parametrizaron los factores para llevar a cabo el desarrollo experimental teniendo en cuenta la metodología estipulada por Cardona⁷²

Tabla 7. Factores Constantes a trabajar

FACTOR	PARÁMETRO
Catalizador	KOH
Alcohol	Metanol
Tiempo reacción	60 min
Relación molar alcohol: aceite	6:1
Velocidad de agitación	600 rpm

Fuente: elaboración propia.

⁷² CARDONA. A, Carlos; ORREGO. A; Carlos y GUTIERREZ. M, Luis. Obtención del biodiesel por una tecnología convencional. En: Biodiesel. 1 ed. Manizales: Artes gráficas Tizan, 2009. P.75.

3.1.2.2 Factores de estudio

- Concentración del catalizador: Se seleccionaron dos concentraciones del catalizador, las cuales son 1% y 1,5% denominándolas factor B. La réplica de las combinaciones se genera en una concentración de catalizador igual a 1,25 %.
- Temperatura de reacción: La temperatura se estudió en tres valores diferentes, 50, 55 y 60 °C denominando este factor como factor A. Generando también la réplica correspondiente en el punto medio.

3.1.2.3 Factor Respuesta

- Rendimiento: Factor dependiente del factor A y B.

Tabla 8. Niveles de Diseño

FACTORES	DOMINIO EXPERIMENTAL	
	NIVEL BAJO (-)	NIVEL ALTO (+)
A	50°C	60°C
B	1,0%	1,5%

Fuente: elaboración propia.

3.2 RESULTADOS

De acuerdo a lo anterior, el diseño de experimentos se desarrolló como se evidencia en la tabla 9 a continuación.

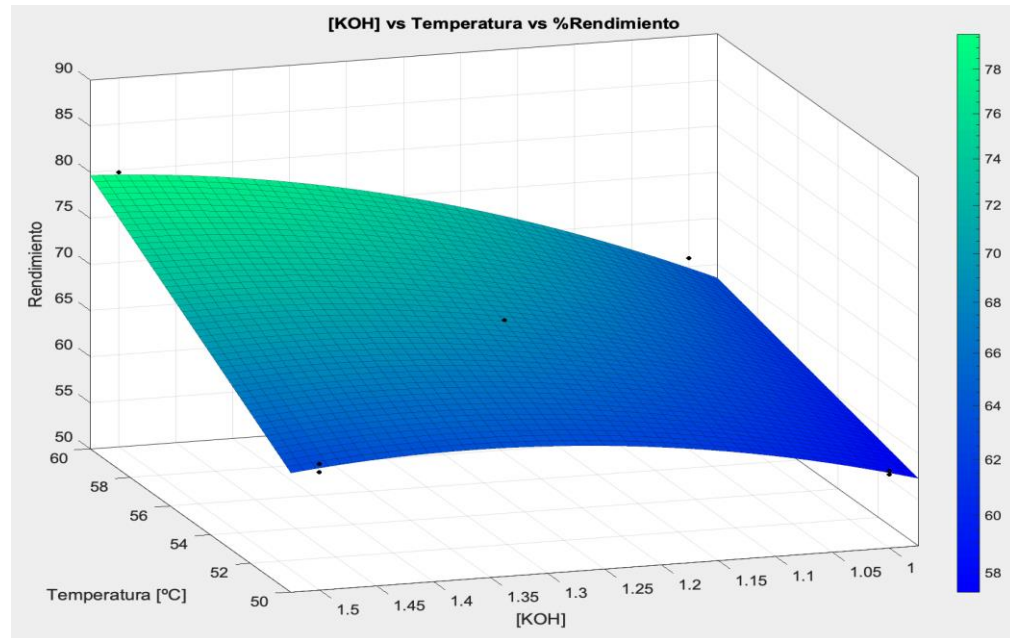
Tabla 9. Diseño de experimentos

EXPERIMENTO	TEMPERATURA (°C)	CATALIZADOR (%)	RENDIMIENTO (%)
1	60	1	65,890
2	50	1,5	63,650
3	50	1	57,980
4	60	1,5	79,746
5	50	1,5	62,239
6	60	1,5	79,198
7	55	1,25	69,239
8	55	1,25	68,973
9	50	1	58,350
10	60	1	63,820

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los datos obtenidos del diseño de experimentos factorial se construyó la figura 9 permitiendo observar el comportamiento del rendimiento de extracción.

Figura 7. Rendimiento vs temperatura de reacción vs concentración de catalizador



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la figura 9, se evidenció que a una mayor temperatura y mayor concentración de catalizador se obtiene un mayor rendimiento en el proceso. Mediante la utilización de la herramienta ajuste de curva en MATLAB R 2018 b se determinó que el comportamiento para la obtención de biodiésel a partir de aserrín de café es por un modelo polinómico como se puede evidenciar en la ecuación 6 obteniendo un coeficiente de correlación igual a 0,9946.

Ecuación 7. Ecuación ajuste polinomial para obtención de biodiésel a partir de aserrín de café

$$f(T, \%KOH) = \alpha_{00} + \alpha_{10} * T + \alpha_{01} * \%KOH + \alpha_{11} * T * \%KOH + \alpha_{02} * \%KOH^2$$

Fuente: elaboración propia

Donde:

α_{00} : 45,98

α_{10} : -1,244

α_{01} : 21,6

α_{11} : 1,913

α_{02} : -42,87

La temperatura es un factor incidente de gran importancia en la reacción de transesterificación, ya que su incremento conlleva el mismo comportamiento de la velocidad y rendimiento de conversión de los triglicéridos en esteres alquílicos.

Al emplear el catalizador básico se debe hacer mucho énfasis en las condiciones de reacción respecto a su cantidad y la temperatura para lograr disminuir al máximo la reacción de saponificación. Junto con este factor, es importante mencionar el tiempo de reacción ya que a medida que se incrementa la conversión de los triglicéridos también este incrementa.

4. EVALUACIÓN DEL BIODIÉSEL PRODUCIDO

4.1 CARACTERIZACIÓN

La caracterización del biodiésel obtenido se realizó en el laboratorio siguiendo la misma directriz usada para la caracterización del aceite. Cabe resaltar que la caracterización se realiza para el biodiésel de mejor rendimiento.

Tabla 10 Resultados caracterización biodiésel

PARÀMETRO	RESULTADO	UNIDADES	NORMATIVIDAD ⁷³
Índice de Acidez	0,387	mg KOH/g aceite	0,5 máximo
Índice de Yodo	117,788	g I ₂ /g aceite	120 máximo
Densidad	0,826	g/cm ³	0,860-0,900
Viscosidad	24,761	mm ² /s	1,9-6,0

Fuente: elaboración propia.

Según los valores reportados en la tabla 10, la viscosidad es mayor al valor requerido por la normatividad. Preferiblemente se debe tener una viscosidad baja para que el biodiésel no produzca una mala atomización en la cámara de combustión generando así una combustión incompleta, además de evitar pérdidas de potencia debido a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector.

El valor de la viscosidad del biodiésel aumenta con la longitud de cadena del éster y el grado de saturación⁷⁴. Una viscosidad alta afecta la atomización del combustible lo que conlleva una mala combustión y formación de depósitos en el motor, así mismo puede facilitar la dilución del lubricante.

La densidad no cumplió con lo establecido según la Resolución número 9 0963⁷⁵. En función de su valor se llega a determinar la cantidad de combustible necesaria para inyectar en la cámara y con ello la relación aire- combustible

El índice de yodo del biodiésel obtenido cumple con lo establecido en NTC 283, este índice permite tener indicio de la oxidación del biodiésel y por ende del grado de insaturación de sus ésteres dependiendo fundamentalmente de la naturaleza del aceite de aserrín de café.

⁷³ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 5444. Bogotá D.C.: El instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018. 5 p

⁷⁴ AVELLANEDA, Fredy. Producción y caracterización de biodiésel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso Batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Tesis doctoral. Tarragona. Universidad Rovira I Virgili. Departamento Ingeniería Química, 2010.

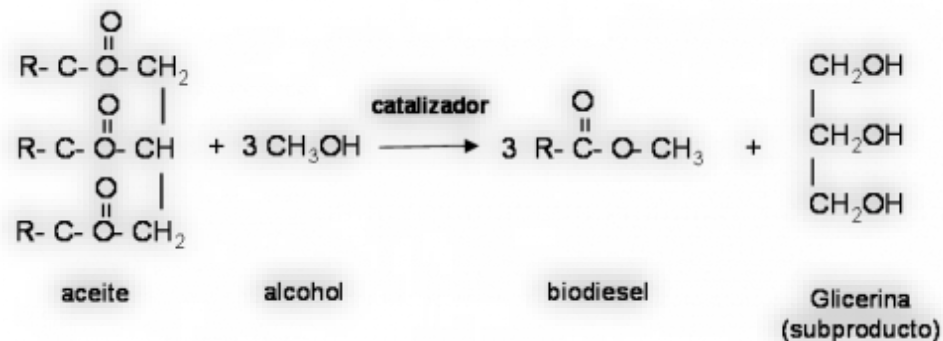
⁷⁵ RESOLUCIÓN NÚMERO 9 0963. Ministerio de minas y energía y ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [sitio web]. Bogotá. [consultado: Marzo del 2019]. Disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com/files/90963.pdf>

El índice de acidez debe cumplir con la normativa como se evidenció en la tabla 10, ya que un índice alto puede genera corrosión indeseada.

4.2 BALANCE DE MATERIA

Es relevante mencionar que se debe tener en cuenta la estequiometria de la reacción química involucrada en el proceso. Para tener el conocimiento de cuánta materia prima y cantidad de catalizador se requiere para producir 1 gramo de biodiésel.

Figura 8. Reacción química de transesterificación.



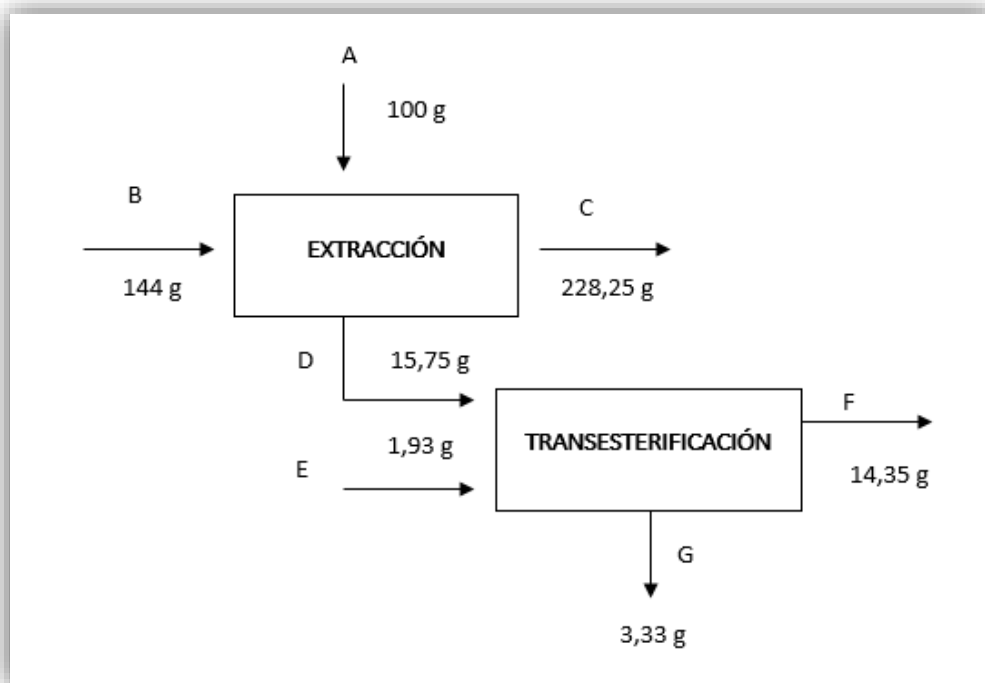
Fuente: Grupo de Investigación en Biotecnología. Obtención de Biodiésel, a escala de laboratorio, a partir de aceites comestibles de desecho: Una nueva alternativa de energía renovable. En: Revista de Investigación, Ediciones Universidad de América. Vol. 5; No 2 (Oct, 2012); p. 8-20.

De acuerdo con la figura 9 se describe el balance de materia para la obtención de biodiésel de aserrín de café. Donde se contemplan dos etapas, la primera la operación de extracción y la segunda la transesterificación. Así mismo se indican las cantidades a reaccionar y las cantidades producidas de biodiésel e impurezas contemplando subproducto (glicerol) y algún tipo de residuo.

Donde:

- A: Aserrín de café
- B: Disolvente
- C: Disolvente después de la extracción
- D: Aceite extraído
- E: Metanol
- F: Biodiésel
- G: Impureza

Figura 9. Balance de materia para producción de biodiésel de aserrín de café.



Fuente: elaboración propia

4.3 SELECCIÓN DE LA MEJOR COMBINACIÓN DE VARIABLES

De acuerdo con el diseño de experimentos desarrollado el punto óptimo en el cual se genera mayor rendimiento y por lo cual favorece la producción del biodiésel a partir de aceite de aserrín de café es a una temperatura de reacción de 60 °C, una concentración de catalizador de 1,5 % p/p, relación molar alcohol: aceite de 6:1 con tiempo de reacción igual a 60 minutos.

4.4 EFICIENCIA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Con base al punto óptimo se determinó la eficiencia global del proceso de obtención de biodiésel.

$$Eficiencia\ Biodiésel = \frac{g\ biodiésel\ obtenido}{g\ aceite\ extraído} * 100^{76}$$

⁷⁶ Grupo de Investigación en Biotecnología. Obtención de Biodiesel, a escala de laboratorio, a partir de aceites comestibles de desecho: Una nueva alternativa de energía renovable. En: Revista de Investigación, Ediciones Universidad de América. Vol. 5,; No 2 (Oct,2012); p. 10

$$Eficiencia\ Biodiésel = \frac{14,35\ g}{15,75\ g} * 100$$

$$Eficiencia\ Biodiésel = 91,11\%$$

Adicionalmente se determinó la eficiencia global de todo el proceso incluyendo la extracción de aceite y posterior producción de biodiésel.

$$Eficiencia\ Proceso = \frac{g\ biodiésel\ obtenido}{g\ totales\ aserrín\ usado} * 100$$

$$Eficiencia\ Proceso = \frac{14,35\ g}{100\ g} * 100$$

$$Eficiencia\ Proceso = 14,35\%$$

4.5 BIODIÉSEL A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIAL

En Colombia la mayor producción de biodiésel es a partir de aceite de palma por tal motivo se decidió comparar los parámetros caracterizados del biodiésel de aserrín de café versus el biodiésel de palma, como se evidencia en la tabla 11.

Tabla 11. Propiedades Biodiésel de aserrín de café vs. Biodiésel de palma

PARÁMETRO	UNIDADES	BIODIÉSEL OBTENIDO	BIODIÉSEL ⁷⁷ DE PALMA	REQUISITO ⁷⁸
Densidad	g/mL	0,826	0,875	0,860-0,900
Viscosidad	mm ² /s	24,761	4,49	1,9-6,0
Índice de acidez	mg KOH/g	0,387	<0,1	0,5 máximo
Índice de yodo	g I ₂ /100 g	117,788	58	120 máximo

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en los valores de la tabla 11, el biodiésel obtenido tiene características distintas respecto al de palma, sin embargo, cumple con el requisito establecido en la Norma Técnica Colombia, en el índice de acidez y yodo.

A pesar de que en Colombia se produce la mayoría de biodiésel a partir de aceite de palma y es una alternativa de energía limpia, este presenta una desventaja de gran importancia debido a que influye en la disponibilidad de tierra para cultivos en

⁷⁷ FEDEPALMA (Colombia). Características del biodiésel de palma y las mezclas. [en línea]. [consultado 23 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/files/Caracteristicas%20del%20Biodiésel%20y%20sus%20mezclas%20V1.pdf>.

⁷⁸ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 5444. Bogotá D.C.: El instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018. 5 p

los cuales se produzcan alimentos por ende requieren mayor cantidad de agua siendo posible su uso para la producción de los mismos.

Por otro lado las actividades desarrolladas en el sector agroindustrial generan diversos residuos que pueden ser aprovechados como alternativas para producción de biodiésel siendo un tema de estudio que con el pasar del tiempo toma más importancia Por lo cual se comparó el biodiésel producido respecto al biodiésel obtenido a partir de aceites comestibles de desecho, producción realizada por grupo de investigación de la Fundación Universidad de América.⁷⁹

Tabla 12. Biodiésel obtenido vs Biodiésel a partir de aceites usados

PARÁMETRO	UNIDADES	BIODIÉSEL OBTENIDO	BIODIÉSEL DE ACEITES USADOS⁸⁰	REQUISITO⁸¹
Densidad	g/mL	0,826	0,836	0,860-0,900
Viscosidad	mm ² /s	24,761	-----	1,9-6,0
Índice de acidez	mg KOH/g	0,387	0,53	0,5 máximo
Índice de yodo	g I ₂ /100 g	117,788	128,82	120 máximo

Fuente: elaboración propia.

Los aceites usados son alternativas económicas para la producción de biocombustible, su empleo evita gastos del tratamiento como residuo, además de tener gran capacidad de reutilización⁸².

Teniendo en cuenta los valores reportados en la tabla 12 según el referente bibliográfico se evidencia que el biodiésel obtenido posee mejores propiedades respecto a su obtención a partir de los aceites usados, debido a que el biocombustible de aserrín de café cumple con dos parámetros establecidos en la norma en comparación al de aceites usados que cumple únicamente con el índice de acidez.

⁷⁹ GRUPO DE Investigación en Biotecnología. Obtención de Biodiesel, a escala de laboratorio, a partir de aceites comestibles de desecho: Una nueva alternativa de energía renovable. En: Revista de Investigación, Ediciones Universidad de América. Vol. 5, No 2 (Oct, 2012); p. 8-20.

⁸⁰ GRUPO DE Investigación en Biotecnología. Obtención de Biodiesel, a escala de laboratorio, a partir de aceites comestibles de desecho: Una nueva alternativa de energía renovable. En: Revista de Investigación, Ediciones Universidad de América. Vol. 5, No 2 (Oct, 2012); p. 13.

⁸¹ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 5444. Bogotá D.C.: El instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018. 5 p

⁸² AVELLANEDA, Fredy. Producción y caracterización de biodiésel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso Batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Tesis doctoral. Tarragona. Universidad Rovira I Virgili. Departamento Ingeniería Química, 2010.

5. CONCLUSIONES

- El primer parámetro fundamental para la extracción de aceite a partir de aserrín de café, fue la selección del disolvente debido a que se obtuvo mejor resultado tanto en el porcentaje de aceite extraído como del rendimiento en la mezcla de hexano Isopropanol en una relación 50:50 (v/v), adicionalmente se tuvo un menor tiempo de extracción respecto al hexano siendo este de 4 horas teniendo en cuenta el primer sifón realizado por la muestra.
- Los mejores parámetros para llevar a cabo el proceso de transesterificación fueron relación molar alcohol aceite de 6:1, tiempo de reacción igual a 60 min, agitación de 600 rpm, 60 °C y concentración de catalizador KOH de 1,5 % p/p, teniendo así un mayor rendimiento. En donde, los tres primeros factores se toman como referente bibliográfico como se indica en el apartado 3.1.2.1 y los dos últimos determinados experimentalmente. El comportamiento para la producción de biodiésel a partir de aserrín de café y de acuerdo al ajuste de curva mediante la herramienta MATLAB R 2018 b es una ecuación polinómica obteniendo un coeficiente de correlación igual a 0,9946.
- El biodiésel de aserrín de café de acuerdo a los parámetros evaluados de índice de acidez, índice de yodo, viscosidad y densidad. Demuestra que los dos primeros parámetros cumplen con lo establecido en la Norma Técnica Colombiana correspondiente, mientras que la viscosidad y densidad no cumplieron. Sin embargo, la producción del biodiésel llevada a cabo tiene una eficiencia de producción del biocombustible de 91,11 % y una eficiencia del proceso de 14,35 %.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para la extracción del aceite emplear otro método como fluido súper crítico.
- Por medio de la extracción en fase sólida (soxhlet) emplear disolventes distintos a los empleados en el presente proyecto como éter de petróleo y la mezcla de hexano Isopropanol en diferentes proporciones.
- Variar la relación molar alcohol aceite junto con la temperatura de reacción y concentración de catalizador para evidenciar su influencia en el rendimiento de conversión para generar la mayor cantidad de biodiésel posible.
- Evaluar el poder calorífico del biodiésel con el fin de determinar su capacidad de combustión.
- Realizar un análisis de costo beneficio donde se evidencie el retorno de la inversión y se identifiquen los precios del biodiésel en el mercado en la actualidad, con el fin de determinar la rentabilidad de producción respecto a la cantidad de biodiésel obtenida para obtener así la viabilidad económica del proyecto a nivel laboratorio.
- Evaluar el aserrín de café después de la extracción como fertilizante para plantas, elaboración de briquetas para la generación de energía.

BIBLIOGRAFÍA

BALLESTER DÍEZ, Ferrán. Efectos de la contaminación Atmosférica Sobre la Salud. En: Revista Española de salud pública. Vol.; 73 No 2 (Mar, 1999).

Llegó la hora cero para las licitaciones de Transmilenio. {En Línea}. Noviembre 02 del 2018. Disponible en: https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150485/publicacionesllego_la_hora_cero_para_las_licitaciones_de_transmilenio/

BIODIESEL EN PERÚ. Educación en Ingeniería química. [sitio web]. Perú. [consultado: marzo del 2019] Disponible en: <https://www.ssecoconsulting.com/biodiesel-i-parte.html>

CANO AMÓRTEGUI, Manuel Andrés. Evaluación de la Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Moringa Oleífera asistido por la Técnica de Ultrasonido. Bogotá, 2015, p 18. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental.

CLEAN FUEL FROM COFFE WASTE. [Sitio web]. Reino Unido. [Consultado: Febrero 2019]. Disponible en: <https://www.bio-bean.com/>

Café para Cardiólogos. En: Revista Colombiana de Cardiología. {En línea} Vol. 11; No 8 (Mar, 2005); pág. 357. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcca/v11n8/v11n8a1.pdf>

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 18 2087 (17, diciembre, 2007). Por la cual se modifican los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de la mezcla con el combustible diésel de origen fósil en procesos de combustión. [En línea]. Bogotá D.C. [consultado: marzo 2019]. Disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com/files/RESOLUCI%C3%93N%2018%202087%20DE%202007.pdf>

COLOMBIA. Resolución 0950 (27, abril, 2010). Por la cual se da por terminado un encargo y un nombramiento provisional. . [En línea]. Bogotá D.C. [consultado: marzo 2019]. Disponible: <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Resolucion-650-de-2010.pdf>

DOCUMENTO CONPES. Consejo nacional de política económica y social República de Colombia. [Sitio web] Bogotá. [Consultado: marzo del 2019]. Disponible: <https://www.fenalce.org/archivos/conpesbiocombustibles.pdf>

EMISIONES POR FUENTES MÓVILES. Ideam. [Sitio web] Bogotá. [Consultado: marzo 2019]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/emisiones-por-fuentes-moviles>

FERNANDEZ, Luis Carlos. Montiel, Jorge. MILLÁN, Aarón. Producción de Biocombustibles a partir de Microalgas. {En línea}. Septiembre del 2012. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46125177011.pdf>

Grupo de Investigación en Biotecnología. Obtención de Biodiesel, a escala de laboratorio, a partir de aceites comestibles de desecho: Una nueva alternativa de energía renovable. En: Revista de Investigación, Ediciones Universidad de América. Vol. 5, No 2 (Oct, 2012); p. 8-20.

HIISTORIA DEL CAFÉ. Café de Colombia. [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: Marzo del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/

INDUSTRIALIZACIÓN DEL CAFÉ. Café de Colombia. [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: Marzo del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/industrializacion/

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos NTC -1486-6166. Bogotá D.C El instituto, 2018 ISBN 9789588585673.

MÉNDEZ, Ángeles. Metanol. {En línea}. Diciembre del 13 del 2010. Disponible en: <https://quimica.laguia2000.com/quimica-organica/metanol>

METANOL (ALCOHOL METÁLICO). [Sitio web]. Barcelona. [Consultado: Marzo del 2019] Disponible en: https://www.juntadeandalucia.es/servicioandaluzdesalud/hrs3/fileadmin/user_upload/area_servicios_generales/prevencion_riesgoslaborales/fichas_seguridad/metanol.pdf

REGIONES CAFETERAS. Café de Colombia. [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: Marzo del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/

REGIONES CAFETERAS. Café de Colombia. [Sitio web]. Bogotá. [Consultado: Marzo del 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/

RESIDUOS DE CAFÉ. La patria.com. [Sitio web]. Manizales. [Consultado: marzo del 2019]. Disponible en: <http://www.lapatria.com/opinion/columnas/elizabeth-ortiz-palacio/residuos-del-cafe>

ANEXOS

ANEXO A.

BALANCE DE MATERIA PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ASERRÍN DE CAFÉ

Peso Molecular: 32,04 g/mol

Densidad Metanol: 0,7918 g/ mL

Peso Molecular Aceite aserrín de café: 934,58 g

Teniendo en cuenta las cantidades estequiométricas involucradas se estimó la cantidad de metanol a utilizar, como se expresa a continuación.

$$15,75 \text{ g} * \frac{1 \text{ mol de aceite}}{934,58 \text{ aceite}} * \frac{3 \text{ moles de MeOH}}{1 \text{ mol de aceite}} * \frac{32,04 \text{ g de Me OH}}{1 \text{ mol de MeOH}} = 1,6198 \text{ g de MeOH}$$

Se toma como consideración que el metanol debe estar en exceso en un 20 % para favorecer la conversión de ésteres en el proceso por lo cual la cantidad requerida es equivalente a 2,454 mL de alcohol.

$$1,6198 \text{ g de MeOH} * 20\% = 1,9437 \text{ g MeOH}$$

$$\frac{1,9437 \text{ g de MeOH} * \text{mL}}{0,7918 \text{ g}} = 2,454 \text{ mL de MeOH}$$

En base a lo establecido en el capítulo 2, se considera para la concentración de catalizador valores de 1% y 1,5%, de acuerdo a lo anterior:

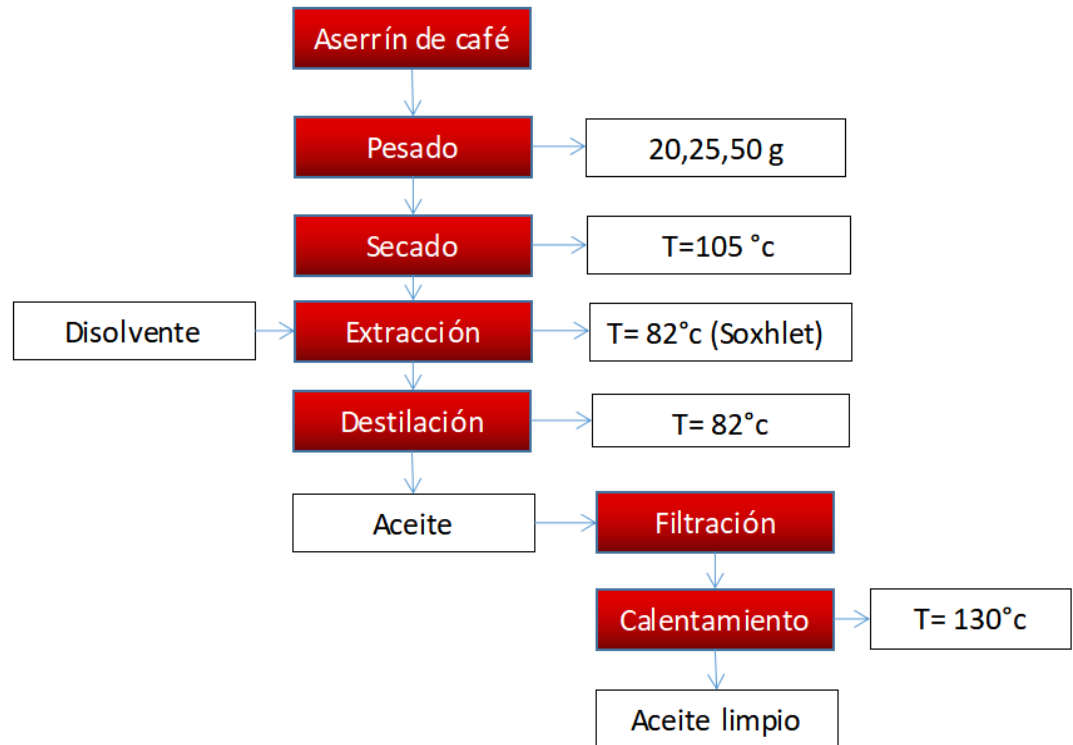
$$15,75 \text{ g aceite} * 1\% = 0,1575 \text{ g de KOH}$$

$$15,75 \text{ g aceite} * 1,25\% = 0,1968 \text{ g de KOH}$$

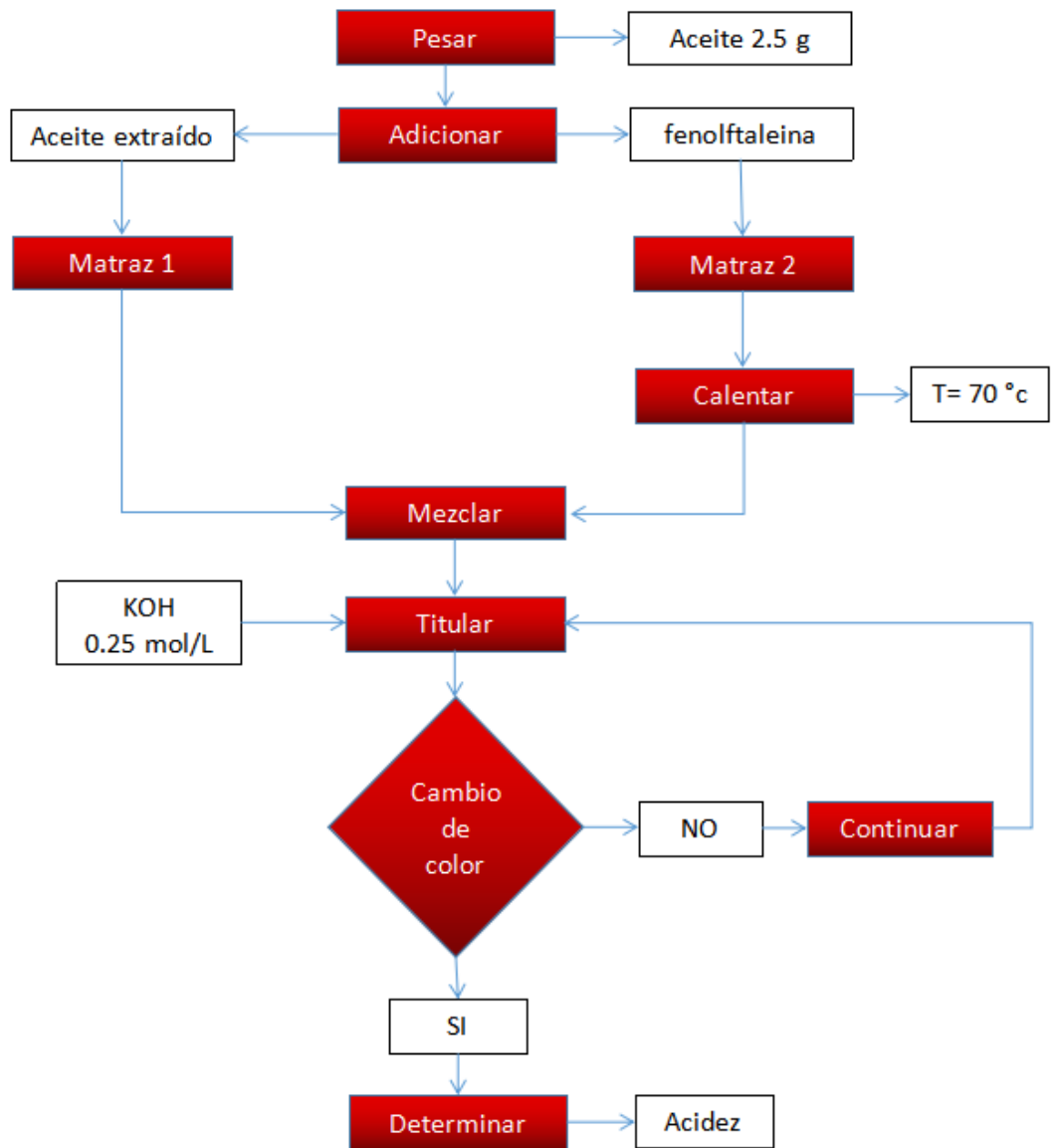
$$15,75 \text{ g aceite} * 1,5\% = 0,2362 \text{ g de KOH}$$

ANEXO B.

DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE ASERRÍN DE CAFÉ

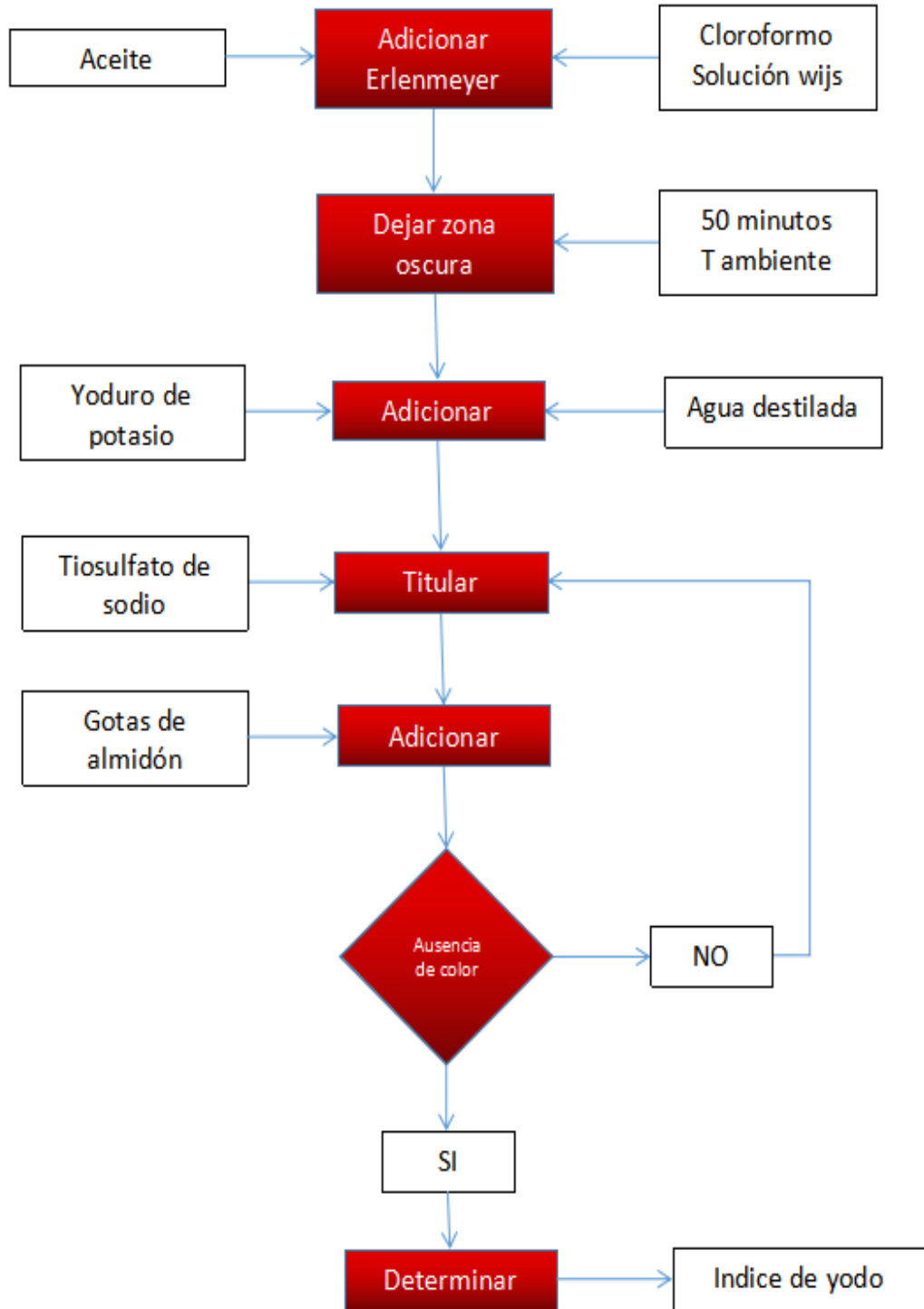


ANEXO C.
DETERMINACIÓN ÍNDICE DE ACIDEZ



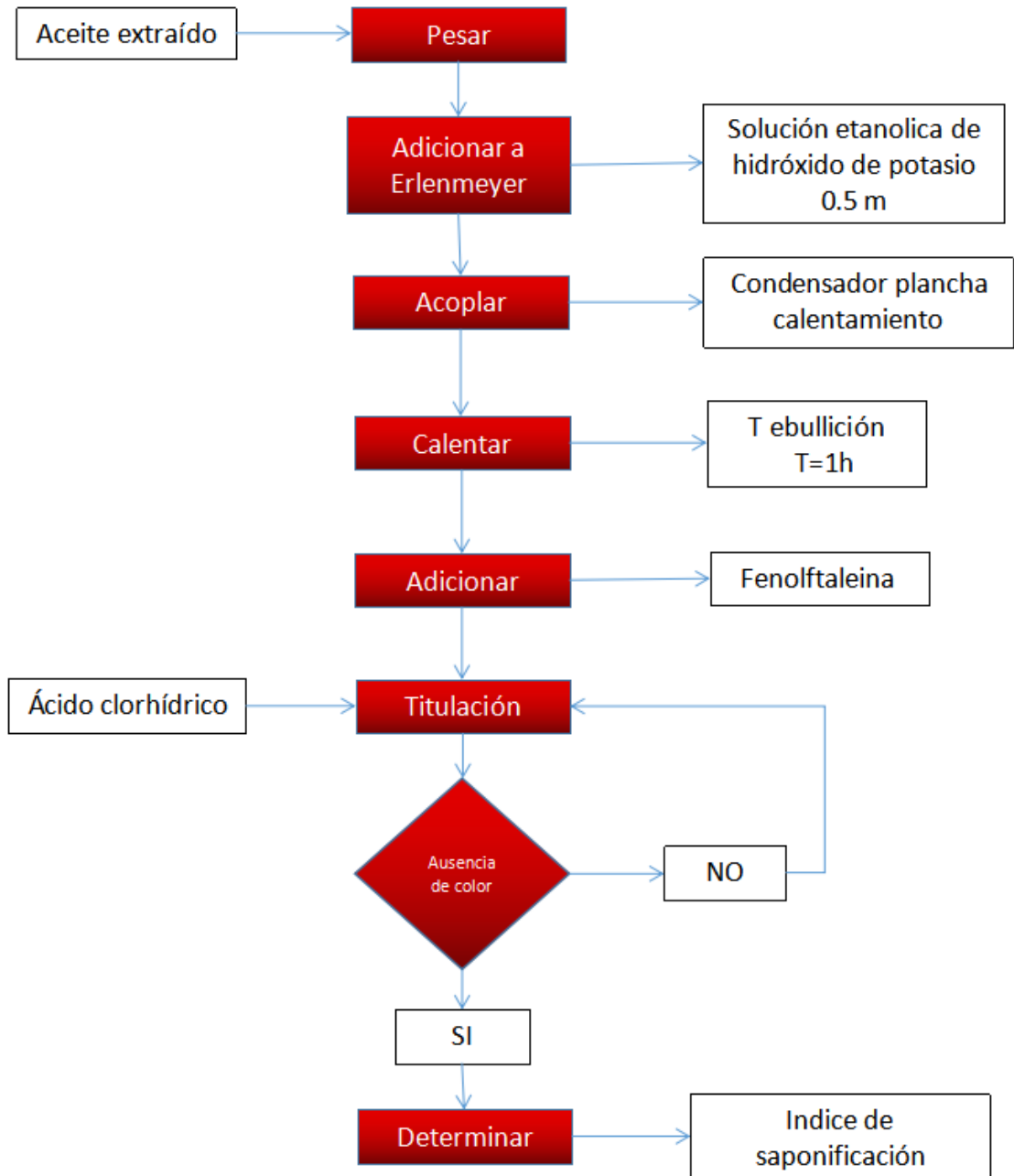
ANEXO D.

DETERMINACIÓN ÍNDICE DE YODO

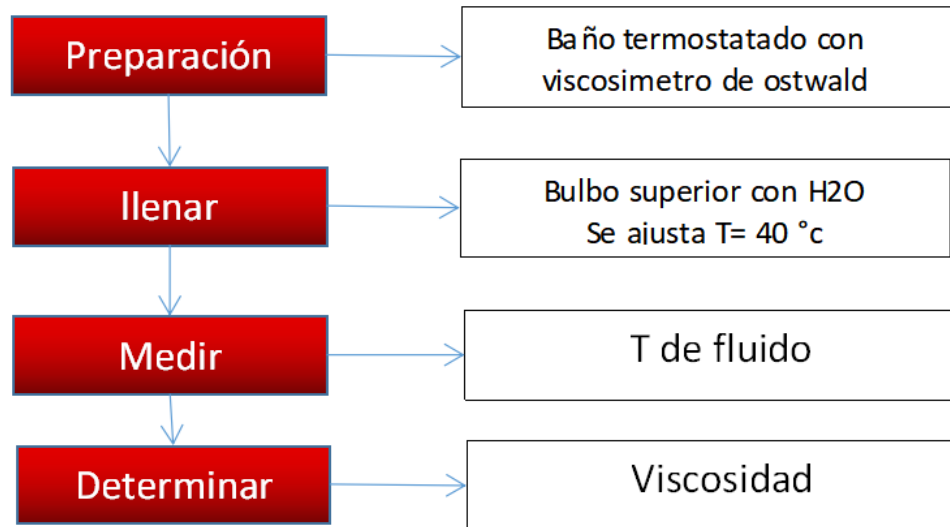


ANEXO E.

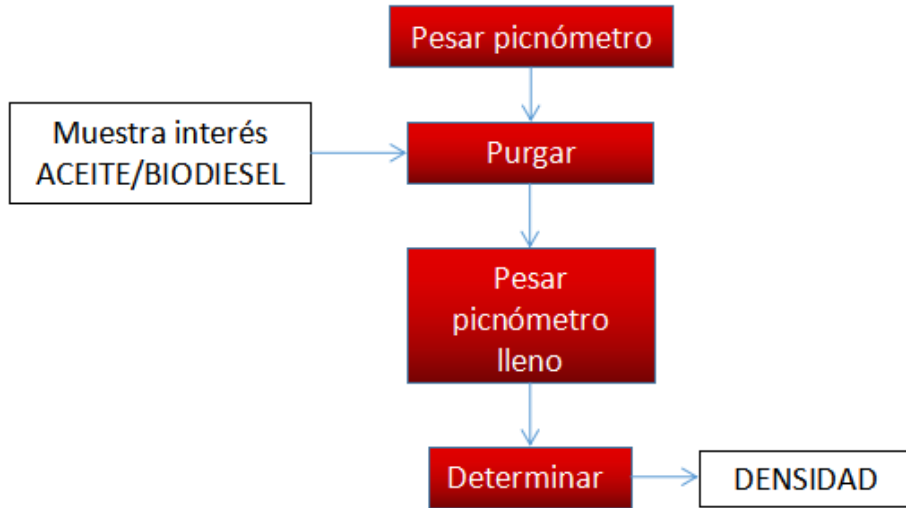
DETERMINACIÓN ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN



ANEXO F.
DETERMINACIÓN VISCOSIDAD



ANEXO G.
DETERMINACIÓN DENSIDAD

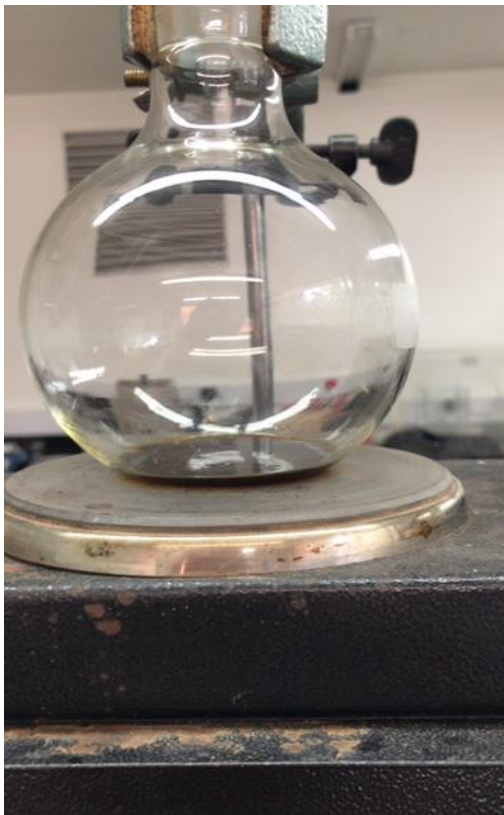


ANEXO H

EXTRACCIÓN DE ACEITE DE ASERRÍN DE CAFÉ



**ANEXO I
RESULTADOS PRODUCCIÓN BIODIÉSEL**



ANEXO I

RESULTADOS ANNOVA

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	513,927	128,482	231,51	0,000
Lineal	2	456,678	228,339	411,44	0,000
Temperatura	1	263,282	263,282	474,40	0,000
KOH	1	193,395	193,395	348,48	0,000
Cuadrado	1	11,485	11,485	20,70	0,006
Temperatura*Temperatura	1	11,485	11,485	20,70	0,006
Interacción de 2 factores	1	45,764	45,764	82,46	0,000
Temperatura*KOH	1	45,764	45,764	82,46	0,000
Error	5	2,775	0,555		
Total	9	516,702			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,744967	99,46%	99,03%	97,85%