

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS AMBIENTALES



**OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE
DOMÉSTICO RESIDUAL**

Tesis

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

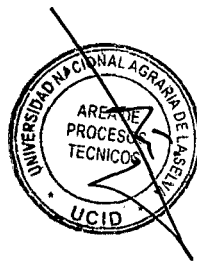
Presentada por:

IVET VICTORIA FALCÓN RAMÍREZ

PROMOCIÓN 2010 - II

Tingo María – Perú

2012



P06

F18

Falcón Ramirez, Ivet Victoria

Obtención de biodiesel a partir de aceite doméstico residual - Tingo María 2012

92 páginas.; 11 cuadros; 07 figuras.; 25 ref.; 30 cm.

Tesis (Ingeniería Ambiental) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Recursos Naturales Renovables.

- | | | |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1. MEDIO CATALIZADO | 2. TRATAMIENTO | 3. METANOL |
| 4. BIODIESEL | 5. TRANSESTERIFICACIÓN | 6. RESIDUAL |



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 18 de diciembre del 2012, a horas 5:45 p.m. en la Sala de Grados de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para calificar la Tesis titulada:

“OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DOMÉSTICO RESIDUAL”

Presentado por la Bachiller: **Ivet Victoria Falcón Ramirez**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara aprobado con el calificativo de “**BUENO**”

En consecuencia, la sustentante queda apta para optar el Título de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del Título correspondiente.

Tingo María, 19 de diciembre del 2012.


Dr. CESAR SAMUEL LÓPEZ LÓPEZ
PRESIDENTE


Dr. GILBERTO MEDINA DÍAZ
VOCAL


Ing. M.Sc. SERGIO RODRÍGUEZ RUBIO
VOCAL


Ing. M.Sc. TANIA E. GUERRERO VEJARANO
ASESORA



AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la vida, por protegerme y por haberme brindado el mejor regalo que podré tener, mi familia.

A mis padres, Porfirio y Elsa, con profundo amor y eterno agradecimiento por su esfuerzo, sacrificio e incondicional apoyo en todas las etapas de mi vida, en especial durante mi formación profesional.

A mis hermanos Yohana, Limber, Minelva y Ursula, a mis abuelos, primos, y tíos, que siempre estuvieron a mi lado para aconsejarme y brindarme su apoyo.

A mi asesora, Ing. M.Sc. Tania E. Guerrero Vejarano, por su orientación profesional en el desarrollo del presente trabajo de investigación y por su respaldo incondicional.

A mis compañeros de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por su compañerismo y amistad cultivada en todos estos años y por todos aquellos momentos inolvidables que perdurarán siempre en mi corazón.

A Laura, Adiany, Sarela, Dahiane, Gina, Diana, Danitza, Luz, Franco, Luis, Petter, entre muchos otros, por su amistad sincera y apoyo brindado durante el desarrollo la presente investigación.

A los señores miembros de mi jurado, Dr. Cesar López López, Ing. M.Sc. Sergio Rodríguez Rubio y Dr. Gilberto Medina Díaz, por sus oportunas sugerencias.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN -----	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA -----	14
2.1. Antecedentes del biodiesel -----	14
2.1.1. Antecedentes en el Perú -----	16
2.2. Biodiesel -----	17
2.3. Marco legal del biodiesel en el Perú -----	19
2.4. Especies oleaginosas para la obtención de biodiesel -----	22
2.5. Principales ventajas del biodiesel -----	23
2.6. Principales desventajas del biodiesel -----	25
2.7. Determinación del índice de acidez de un aceite -----	27
2.8. Insumos: alcohol y catalizador -----	28
2.8.1. Alcoholes -----	28
2.8.2. Catalizador -----	29
2.9. Preparación del metóxido -----	31
2.10. Proceso de transesterificación -----	31
2.10.1. Reacción de la síntesis -----	33
2.11. Proceso de producción de biodiesel -----	35
2.12. Propiedades del biodiesel para motores -----	36
2.13. Parámetros fisicoquímicos para el control del biodiesel -----	37
2.14. Investigaciones realizadas en la producción de biodiesel -----	40
2.14.1. Obtención de biodiesel a partir de aceite quemado de	

	cocina por el método ácido-base -----	40
2.14.2.	Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiesel) --	41
2.14.3.	Análisis químico de mezclas de biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja -----	43
2.14.4.	Evaluación de la purificación de biodiesel en la etapa final de producción -----	46
2.14.5.	Metodología para la fabricación de biodiesel a partir del aceite de palma africana (<i>Elais guineensis</i>) y aceite de soya usado-----	46
2.14.6.	Opciones para la producción de biodiesel en el Perú -----	47
III.	MATERIALES Y METODOS-----	49
3.1.	Ubicación política -----	49
3.2.	Metodología -----	49
3.2.1.	Recolección del aceite doméstico residual -----	49
3.2.2.	Pre tratamiento del aceite doméstico residual-----	50
3.2.3.	Determinación del índice de acidez del "aceite doméstico residual" -----	50
3.2.4.	Determinación de la cantidad de catalizador -----	51
3.2.5.	Transesterificación de los ácidos grasos del "aceite doméstico residual" -----	52
	3.2.5.1. Preparación del metóxido de sodio -----	52
	3.2.5.2. Obtención del biodiesel del aceite doméstico residual -----	52
3.2.6.	Separación de biodiesel y glicerina -----	53
3.2.7.	Lavado del biodiesel -----	53
3.2.8.	Secado de biodiesel -----	54
3.2.9.	Prueba de rendimiento de producción de biodiesel -----	54

3.2.10.	Pruebas de calidad -----	55
3.3.	Unidades y variables experimentales -----	56
3.3.1.	Unidades experimentales -----	56
3.3.2.	Variables dependientes -----	56
3.3.3.	Variables independientes -----	56
3.4.	Diseño estadístico -----	56
3.4.1.	Tratamientos -----	57
3.4.2.	Estructura del diseño experimental -----	58
3.5.	Flujograma del proceso de obtención de biodiesel-----	59
IV.	RESULTADOS-----	60
4.1.	Determinación del índice de acidez -----	60
4.2.	La temperatura optima necesaria para obtener mayor rendimiento de biodiesel -----	61
4.3.	Cantidad de metanol optimo para obtener mayor rendimiento de biodiesel -----	62
4.4.	Interacción del factor temperatura y del factor metanol para obtener mayor rendimiento de biodiesel -----	64
4.5.	Pruebas de calidad al biodiesel obtenido a partir del aceite doméstico residual -----	66
V.	DISCUSION -----	68
VI.	CONCLUSIONES -----	74
VII.	RECOMENDACIONES -----	75
VIII.	ABSTRACT -----	76
IX.	BIBLIOGRAFIA -----	78
X.	ANEXO -----	82

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Especies oleaginosas que se emplean para la obtención de biodiesel ---	22
2. Estándares internacionales para biodiesel (B100) -----	38
3. Determinación de parámetros de biodiesel de maíz y canola -----	41
4. Análisis de la materia prima y producción de biodiesel: índices de acidez, cantidades usadas y rendimiento de biodiesel -----	45
5. Características de los aceites en relación con los rendimientos de producción de biodiesel -----	48
6. Determinación del índice de acidez del aceite doméstico residual -----	60
7. Prueba TUKEY para el factor temperatura -----	61
8. Prueba TUKEY para el factor metanol -----	62
9. Análisis de varianza del diseño factorial 3A x 5B completamente al azar-	64
10. Prueba TUKEY para la combinación del factor temperatura y metanol---	65
11. Pruebas de calidad realizadas al biodiesel a partir del aceite doméstico residual-----	66

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Reacción de la transesterificación -----	34
2. Reacción global de la transesterificación -----	34
3. Flujograma para la obtención de biodiesel -----	59
4. Cantidad de mg de NaOH/g de aceite -----	61
5. Influencia del factor temperatura en el rendimiento de biodiesel -----	62
6. Influencia del factor metanol en el rendimiento de biodiesel -----	63
7. Interacción de la temperatura y metanol en el rendimiento de biodiesel ---	66

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de fitoquímica de la facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, teniendo por objetivo la obtención de biodiesel a partir de aceite doméstico residual; la materia prima fue recolectado de diversas fuentes, tales como restaurantes, comedor universitario, pollerías, entre otros, realizándose así un pretratamiento respectivo, posteriormente se determinó el índice de acidez obteniendo como resultado 0,3976 mg de NaOH/g de aceite; a ello se aplicó la ecuación establecida por TIKELL (2002), con el fin de determinar la cantidad de catalizador necesaria para la reacción, siendo ésta 0,3861 g de NaOH por 100 mL de aceite doméstico residual. luego, se procedió a evaluar empleándose cantidades de metanol (20 mL, 30 mL, 40 mL, 50 mL o 60 mL) a temperaturas diferentes (45°C, 55°C y 65°C) para cada muestra de 100 mL de aceite doméstico residual. Posteriormente, se realizó un proceso de reacción denominado *transesterificación* para cada tratamiento, donde el metanol reaccionó en un medio catalizado (NaOH) con el aceite a una temperatura constante y por un tiempo de dos horas obteniéndose así biodiesel, para luego pasar un proceso de lavado y secado. A los datos obtenidos de cada muestra se aplicó el diseño factorial completamente al azar (3A X 5B) para los factores metanol y temperatura, haciendo un total de 15 tratamientos, cuyos resultados del análisis de varianza fueron corroborados con la prueba Tukey. De los resultados se pudo colegir que, la temperatura óptima para un mayor rendimiento de biodiesel se encuentra en un rango de 45°C a 65°C, porque estadísticamente no presentan diferencias significativas entre

ellos, la cantidad óptima de metanol necesaria es de 40 mL, cuyo rendimiento fue de 79,4 %. Asimismo, el tratamiento del cual se obtuvo la combinación más eficiente entre los factores temperatura y metanol -a fin de obtener un mayor rendimiento- es el tratamiento signado con el número 8, el mismo que fue evaluado a una temperatura de 55° C y 40 mL de metanol, obteniéndose un rendimiento de 86 %. Finalmente, cabe precisar que a todos los tratamientos se les realizó pruebas de calidad, tales como pH, densidad y viscosidad, además de comparar los resultados arribados con las especificaciones técnicas establecidas en las normas internacionales y nacionales para biocombustibles, permitiéndonos de esta manera obtener un biocombustible con propiedades físico-químicas dentro de los estándares y parámetros prescritos en el ordenamiento jurídico vigente.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero vienen creando serios problemas de contaminación en nuestro ecosistema aéreo; siendo así, que en los últimos años esta situación ha empeorado debido al incremento del parque automotor abastecido por diésel a nivel mundial, afectando nuestro ambiente y la salud de las personas. Sin embargo, la disminución de las reservas mundiales de petróleo y el incremento de diferentes problemas ambientales relacionados con el uso de este tipo de combustibles, ha incentivado la búsqueda de nuevas fuentes de energía provenientes de materias primas renovables, como el biodiesel, que es obtenido a partir de aceites vegetales o de grasas de animales, mediante un proceso de transesterificación, donde el aceite reacciona con un alcohol en un medio catalizado, produciendo éster etílico o metílico, recibiendo finalmente el nombre de biodiesel. Estas moléculas resultantes están compuestas por un ácido graso de cadena larga y un alcohol (CASTRO *et al.*, 2007).

Los aceites vegetales empleados para la producción de biodiesel, provienen de especies oleaginosas como: el girasol, soya, canola (colza), coco, palma, maíz, entre otros; destacando en el Perú: el aguaje, umari, sachu inchi, palma, palmiste, castaña, tempate o piñón, ricino o higuera, pijuayo. A la vez, éstos presentan como inconveniente el alto costo de manufactura y como la

utilización de tierras de cultivo, deforestación de bosques y el uso de materia prima, que en vez de ser destinadas para el consumo alimenticio o la conservación de estas áreas, se utilizan en la producción de biodiesel. Una alternativa de solución en particular es el uso de aceite doméstico residual, como materia prima para la producción de biodiesel por ser menos costoso que los aceites de especies vegetales comúnmente empleados para dicha producción.

Por otro lado; un problema ambiental poco estudiado, pero no menos importante es la contaminación del agua, que es vertido directamente al sistema de alcantarillado sin un previo tratamiento, llegando a cuerpos naturales de agua, formando una película superficial que afecta el intercambio de oxígeno y produce altos niveles de contaminación.

Ante esta problemática, en el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal la obtención de biodiesel a partir de aceite doméstico residual, con la finalidad de aminorar problemas ambientales mediante el uso de estos aceites, como la reducción de la contaminación de las aguas, reducción de emisiones de anhídrido carbónico aproximadamente en un 80% y casi 100% de dióxido de azufre. En cuanto a los objetivos específicos trazados, se plantea determinar el índice de acidez del aceite doméstico residual, la temperatura óptima y cantidad de metanol necesario para obtener mayor rendimiento de biodiesel, el porcentaje de rendimiento de producción de biodiesel interaccionando la temperatura y metanol, así como realización de pruebas de calidad del biodiesel obtenido (pH, densidad, viscosidad).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes del biodiesel

Los biocombustibles en general y el biodiesel en particular han cobrado mucho protagonismo en los últimos años debido al alza de precio del petróleo. No obstante, el biodiesel es un combustible tan antiguo como el motor que le da nombre, que ha evolucionado implementando químicamente mejoras para su comportamiento en los coches y embarcaciones.

El uso de aceites vegetales como combustible, se remonta al año 1900, siendo Rudolph Diesel, quien lo utilizó por primera vez en su motor térmico en la feria internacional de París el año 1900, haciendo uso de aceites vegetales puros de coco o palma.

El uso de los aceites vegetales como combustible y fuente energética podrá ser insignificante hoy, pero con el curso del tiempo será tan importante como el petróleo y el carbón, Rudolph Diesel.

Durante la Segunda Guerra Mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en el Brasil, sobre el diesel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiesel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética

que sucedía en el momento y al elevado costo del petróleo; Las primeras pruebas técnicas con biodiesel se llevaron a cabo en 1982 en Austria y Alemania, pero solo hasta el año de 1985 en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de RME (Rapeseed Methyl Ester - metiléster de aceite de semilla de colza).

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles. En los últimos años se ha producido biodiesel a partir de soya, girasol y palma, siendo esta última la principal fuente vegetal utilizada en países como Malasia para la producción de biodiesel PME y PEE (Palm Methyl Ester y Palm Ethyl Ester); en la Unión Europea se estipuló que para 2005, el 5% de los combustibles debía ser renovable, porcentaje que debió duplicarse para el 2010. En Francia, todos los combustibles diésel poseen un mínimo del 1% de biodiesel. En Alemania, el biocombustible se comercializa en más de 350 estaciones de servicio y su empleo es común en los cruceros turísticos.

En Europa y los EE UU, el biodiesel es producido y utilizado en cantidades comerciales. En 1998, el DOE (Departament of Energy) designó al biodiesel puro (B100), como un combustible alternativo y estableció un programa de créditos para el uso de biodiesel. Sin embargo, el biodiesel mezclado, cuya forma más común se llama B20 (20% biodiesel, 80% diésel convencional), no ha sido designado como un combustible alternativo (MOTA, 2007).

Los primeros ensayos documentados de producción de biodiesel en el Perú se realizaron en Practical Action en el año 2000; los mismos que se probaron con éxito en motocultores de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM. Posteriormente, desde el año 2003, y hasta la actualidad, estas instituciones conformaron un equipo permanente de investigación, con sede en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la UNALM para el estudio de los posibles escenarios para la producción y uso de biodiesel a pequeña escala en el Perú. Hasta el momento se han logrado pruebas exitosas de producción y uso de biodiesel a partir de aceites usados y de especies oleaginosas nativas e introducidas; así como también el desarrollo y prueba de modelos tecnológicos de bajo costo para la producción de biodiesel a pequeña escala, establecimiento del primer sistema regular de reciclaje de aceites usados para la producción de biodiesel en el Perú y la construcción de la primera planta piloto de producción de biodiesel a mediana escala con capacidad para elaborar 2 mil galones mensuales de biodiesel (CALLE *et al.*, 2005).

1.2.1. Antecedentes en el Perú

Las materias primas que mayor interés ha despertado en el Perú por su potencial para la producción de biodiesel son, sin duda alguna, la palma aceitera en la selva y la colza llamada también canola en la sierra. Otras materias primas potenciales serían también, la soya en la selva, el girasol en la sierra, la semilla de algodón en la costa, el piñón o tempate en zonas diversas, así como algunas fuentes alternativas que son los aceites y grasas usadas, el aceite de pescado y el sebo animal (CASTRO *et al.*, 2007).

Cabe destacar que en el Perú hasta la actualidad se incrementó el número de plantas productoras de biodiesel; entre ellos tenemos a: biodiesel Perú International S.A.C, Interpacific Oil S.A.C., Inter Latinoamericana S.R.L., Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) (a nivel piloto), como también proyectos para la producción en Industrias del Espino S.A. - División Agroenergía, Grupo Romero, Heaven Petroleum Operators S.A.C. Grupo Herco, Pure Biofuels Corporation (OCROSPOMA, 2007)

2.2. Biodiesel

El término bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diésel tradicional derivado del petróleo; mientras que diésel se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible, el biodiesel puede ser usado en forma pura o mezclado con diésel de petróleo (MITTELBAACH, 1996).

La definición de biodiesel propuesta por las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Material), asociación internacional de normativa de calidad) lo describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión (motores diésel), (CRESPO *et al.*, 2001).

De acuerdo al D.S. 021 – 2007, lo define de la misma forma que la ASTM y para fines del presente Reglamento se entiende como una sustancia oleaginosa obtenida a partir del aceite de palma, higuera, piñón, soya, colza,

girasol y otros vegetales oleaginosos, así como grasas de animales y aceites comestibles usados (PCM, D.S. 021-2007).

Una alternativa la constituye los residuos de aceite de cocina usado en frituras, por cuanto ellos han demostrado ser una fuente económica para la producción de biodiesel, en virtud a su alta disponibilidad y bajo costo, además su reciclaje y reutilización como forma de energía renovable, disminuye el poder contaminante de estos residuos al ser vertidos en los fregaderos (LAFONT, 2011).

Los componentes básicos de los aceites y grasas son triglicéridos, los cuales provienen tanto de ácidos grasos saturados como insaturados. Dependiendo de estas y otras características del origen de los triglicéridos se obtendrá un biodiesel con unas cualidades y otras. Las mezclas al 20% de biodiesel con diésel del petróleo (B20) son las más comunes y se pueden utilizar generalmente en motores diésel sin modificar. También se puede utilizar en su forma pura (B100), pero puede requerir ciertas modificaciones del motor para evitar problemas del mantenimiento y de funcionamiento (MOTA, 2007).

Los datos obtenidos en varios países indican que el biodiesel obtenido de aceites reciclados de cocina probablemente no reemplace al combustible diésel completamente; sin embargo una sustancial cantidad de diésel puede ser mezclado con biodiesel preparado de aceites reciclados de cocina, ayudando en parte a disminuir la dependencia de combustible basado en petróleo (BARRIGA, 2011).

2.3. Marco legal del biodiesel en el Perú

Las principales normas que regulan la actividad son:

- Ley 28054, Ley de promoción de los biocombustibles, agosto 2003.

- DS N° 013–2005–EM, Reglamento de la Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles.

- DS N° 021–2007–EM, Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles.

La Ley 28054 establece en su Artículo 1. El marco general para promover el desarrollo del mercado de los biocombustibles sobre la base de la libre competencia y el libre acceso a la actividad económica, con el objetivo de diversificar el mercado de combustibles, fomentar el desarrollo agropecuario y agroindustrial, generar empleo, disminuir la contaminación ambiental y ofrecer un mercado alternativo en la lucha contra las drogas.

El DS N° 013–2005–EM, intenta concretar aspectos sobre los porcentajes de mezcla y cronogramas de aplicación, normas técnicas de calidad, registro y autorizaciones para productores y comercializadores, lugares de mezcla, promoción de cultivos para biocombustibles, promoción del desarrollo de tecnologías, y el Programa de Promoción del Uso de los Biocombustibles.

El DS N° 021–2007–EM, no reemplaza totalmente al Reglamento de la Ley descrito anteriormente, pero sí mejora substancialmente varios puntos críticos que dificultaban iniciativas y emprendimientos, derogando y reemplazando artículos específicos del mismo. Este nuevo Reglamento establece:

- Nuevas normas que regulan la comercialización y distribución de biocombustibles puros y sus mezclas con combustibles líquidos derivados de los hidrocarburos.

- Normas técnicas de calidad específicas que se deberán cumplir hasta que se desarrollen las normas técnicas peruanas respectivas.

- Normas para el registro de las mezclas de biocombustibles con combustibles derivados de los hidrocarburos ante la Dirección General de Hidrocarburos.

- Una nueva programación de fechas con respecto a la comercialización de los biocombustibles y sus mezclas.

Las principales novedades y mejoras que incorpora este Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles son:

- Definiciones: se mejoran las definiciones del biodiesel y el etanol anhidro.

- Porcentajes de mezcla: para el caso del biodiesel, se contempla la comercialización de mezclas que contengan 2% de biodiesel en 98% de diésel

(Diesel B2), 5% de biodiesel en 95% de diésel (Diesel B5), 20% de biodiesel en 80% de diésel (Diesel B20). No está permitida la comercialización de mezclas en proporciones diferentes. Para el etanol, el porcentaje de mezcla sigue fijo en 7,8% (gasohol).

- Cronograma para la comercialización de las mezclas de biocombustibles: se aclara la obligatoriedad del uso de mezclas: se establece que a partir de abril del 2007 será posible comercializar biodiésel puro y Diesel B20 a los consumidores directos autorizados por la Dirección General de Hidrocarburos, así como Diesel B2 y gasohol en todo el país; desde el 1ro de enero del 2009 será obligatoria la comercialización del Diesel B2 en reemplazo del Diesel N° 2; desde el 1ro de enero del 2010 será obligatorio el uso de gasohol en reemplazo de las gasolinas; y desde el 1ro de enero del 2011 será obligatoria la comercialización del Diesel B5 en reemplazo del Diesel B2.

- Normas técnicas de calidad: se establecen las normas técnicas de calidad para el Biodiesel B100 y el Alcohol Carburante que se utilizarán hasta que INDECOPI emita las normas técnicas peruanas respectivas.

- Autoridades competentes.

- El MEM, a través de la Dirección General de Hidrocarburos, está encargado de otorgar registros y autorizaciones para la comercialización de los biocombustibles y sus mezclas.

- El Organismo Supervisor de la Inversión de Energía y Minería (OSINERGMIN) debe fiscalizar la comercialización, transporte y calidad de los biocombustibles y sus mezclas.

- El Ministerio de la Producción otorga las autorizaciones para la instalación y funcionamiento de plantas productoras de biocombustibles.

- El Ministerio de Agricultura identifica y promueve las áreas disponibles con aptitud agrícola para la producción de biocombustibles (CASTRO *et al.*, 2008).

2.4. Especies oleaginosas para la obtención de biodiesel

Cuadro 1. Especies oleaginosas que se emplean para la obtención de biodiesel (CASTRO *et al.*, 2007).

Nombre común del cultivo	Nombre científico	Parte oleaginosa	Rendimiento estimado de aceite en plantación (kg/ha/año)	Contenido de aceite del fruto o semilla (%)
Palma aceitera	<i>Elaeis guineensis</i>	Pulpa de fruto	5000	45–55
		Semilla	800	44–57
Soya	<i>Glycine max</i>	Semilla	280–580	18–20
Colzay canola	<i>Brassica napus</i>	Semilla	700–1500	40
	<i>Brassica rapa</i>			
Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	Semilla	600–950	45–55
Algodón	<i>Gossypium hirsutum</i>	Semilla	300	18–25
Ricino hiquerilla	<i>Ricinus communis</i>	Semilla	1200	45–55
Piñón	<i>Jatropha curcas</i>	Semilla	1590	50–60
		Con cáscara		24–34
Aguaje	<i>Mauritia flexuosa</i>	Pulpa	2.400	21,1
Almendro	<i>Caryocar villosum</i>	Pulpa y semilla	270	

Almendro colorado	<i>Caryocar glabrum</i>	Semilla		37
Babasu	<i>Orbignia phalerata</i>	Semilla	90–150	72
Bacuri	<i>Platonia insignis</i>	Semilla		46
Castaña	<i>Bertholletia excelsa</i>	Semilla	1575	69,3
Chopé	<i>Gustavia longifolia</i>	Pulpa		30
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Endocarpio	610–732	66
Copoasu	<i>Theobroma grandiflorum</i>	Semilla	482–808	
Hamaca Huayo	<i>Couepia dolycopoda</i>	Semilla	70–80	
Huasaí	<i>Euterpe precatoria</i>	Pulpa y semilla		
Inchi	<i>Caryodendron orinocense</i>			41–59
Marañón	<i>Anacardium occidentale</i>	Nuez		46,3
Olla de Mono	<i>Lecythis pisonis</i>	Almendra		
Pijuayo	<i>Bactris gasipaes</i>	Pulpa y semilla	2.000	23
Poloponta	<i>Elaeis oleifera</i>	Pulpa y semilla	1.800	16,2
Sacha Inchi	<i>Plukenetia volubilis</i>	Almendra	51,4	
Sacha Mangua	<i>Grias neuberthii</i>	Pulpa	165	
Sinamillo	<i>Oenocarpus mapora</i>	Pulpa		
Totali	<i>Acrocomia totai</i>	Pulpa y semilla	12-15 (pulpa)	60 (almendra)
Tucuma	<i>Astrocaryum vulgare</i>	Pulpa y semilla		43,7
Umari	<i>Poraqueiba sericea</i>	Pulpa	530	21,2
Ungurahui	<i>Oenocarpus bataua</i>	Pulpa	240 - 525	14,5
Uxi	<i>Dickesia verrucosa</i>	Pulpa	20,2	

Fuente: Adaptada de COELLO, 2006; Tratado de Cooperación Amazónica, 1997; CASTRO, 2007. Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú.

2.5. Principales ventajas del biodiesel

Respecto a la aplicación de los aceites vegetales usados en la producción de biodiesel, se pueden destacar los siguientes puntos:

- Se trata de una fuente de energía renovable de características semejantes a las del gasoil, pero con unas emanaciones más respetuosas con el medio ambiente.

- El ciclo biológico en la producción y el uso del biodiesel reduce aproximadamente en 80% las emisiones de anhídrido carbónico, y casi 100% las de dióxido de azufre. La combustión de biodiesel disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados, y entre 75-90% en los hidrocarburos aromáticos. El biodiesel, además proporciona significativas reducciones en la emanación de partículas y de monóxido de carbono, que el diésel de petróleo, el biodiesel proporciona un leve incremento o detrimento en óxidos de nitrógeno dependiendo del tipo de motor.

- El biodiesel es biodegradable en solución acuosa, el 95% desaparece en 28 días.

- El biodiésel ofrece ventajas de seguridad sobre el diesel del petróleo ya que tiene un punto de inflamación mayor (150°C en promedio), comparado al diésel del petróleo (50°C). Esto lo hace más seguro de almacenar y transportar.

- Los biodiesel preparados a partir de aceites vegetales usados, tienen unas características físico-químicas muy parecidas a los obtenidos a través de aceites vegetales frescos (colza, soja, girasol, etc.).

- Es posible su aplicación como combustibles para motores diesel.
Mejora el rendimiento de los motores.

- Contienen mucho menos azufre que el gasóleo, cantidades prácticamente despreciables, por lo cual apenas se producen óxidos de azufre en su combustión.

- La prácticamente nula corrosión al cobre de estos productos, supone un trato adecuado de los motores de combustión interna y calderas. El biodiesel funciona en cualquier motor diésel convencional, sin ser necesaria ninguna modificación. Puede almacenarse puro o en mezcla, igual que el gasoil. El biodiesel puede usarse puro o mezclarse en cualquier proporción con el combustible diesel de petróleo (CLARIMÓN *et al.*, 2005).

2.6. Principales desventajas del biodiesel

El principal problema es que la cadena de producción del biodiesel es tan larga que el precio final se incrementa mucho. Para conseguir un precio competitivo se debe optimizar el proceso uniendo varias fases como la extracción, trituración y transesterificación en una sola instalación, a continuación se menciona las principales desventajas:

- **Incompatibilidad a bajas temperaturas:** El biodiesel posee malas propiedades a bajas temperaturas. Tanto los Puntos de Congelación (PC), Puntos de Nube (PN), como el Punto de Obstrucción por Filtros Fríos (POFF) son desde ligeramente superiores a muy superiores dependiendo del origen del éster (aceite de maíz, oliva, etc.). Para un biodiesel procedente de un aceite residual el POFF está entre -7 y 0°C, lo cual es insuficiente para

el invierno riguroso de algunos países. Utilizando un biodiesel de origen animal el POFF es todavía superior.

- **Mayor viscosidad:** Debido a que el biodiesel tiene una viscosidad mayor que el diésel pueden existir problemas de pérdidas de flujo a través de los filtros e inyectores.

- **Coquización del inyector:** Se incrementa con el aumento de la viscosidad, del peso molecular y del poder calorífico. Aunque esta disminuye con el grado de instauración.

- **Dilución del lubricante:** Se necesita un lubricante que tenga una capacidad dispersante superior a la utilizada con el diésel (TBN alto). Existen estudios que indican que un aceite de motor se degrada mucho más rápido si el combustible utilizado es biodiesel en vez de diésel y por lo tanto se recomiendan cambios en el aceite en períodos más cortos de tiempo que para un diésel normal.

- **Problemas de corrosión:** Pueden aparecer algunos problemas debido a corrosiones y partículas de desgaste en el aceite, que puede afectar al motor y se deben hacer consideraciones respecto a la instalación. El contenido de agua acelera la presencia de microbios que puede provocar la corrosión del sistema y una colmatación de los filtros prematura.

- **Presencia de K y Na:** Puede causar la precipitación de jabones obstruyendo los filtros. Estos se presentan en el biodiesel debido a un defectuoso proceso de lavado en su producción.

- **Colmatación de filtros:** Como el biodiesel es un buen disolvente, disuelve toda la suciedad que haya en el circuito de combustible hasta dejarlo limpio. Por ello, al principio, puede que se colmaten los filtros rápidamente.

- **Problemas de estabilidad:** Posee menor estabilidad a la oxidación que el diésel debido a que posee dobles enlaces y oxígeno en su molécula. Esto es importante a la hora de almacenar durante mucho tiempo el biodiésel (CIRIA, 2004).

2.7. Determinación del índice de acidez de un aceite

Se entiende por índice de acidez, o valor ácido, los miligramos de NaOH o KOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en gramo de muestra. se determina la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución estándar de KOH o NaOH. Un valor elevado para este índice muestra que el aceite contiene una alta cantidad de ácidos grasos libres, ya que ha sufrido un alto grado de hidrólisis. Cabe mencionar que es la parte más importante del proceso y deberá ser lo más exacta posible ya que de ella depende la cantidad de catalizador básico (hidróxido) que se ha de utilizar (MOTA, 2007).

Los aceites y grasas refinados deben tener un nivel de ácidos grasos libres inferior al 0,2 % como ácido oleico para ser aptos para su uso en la alimentación, sin embargo, los aceites crudos y los usados previamente en frituras, comúnmente tienen un contenido de ácidos grasos libres

significativamente superior a éste (2% o más). Este índice es particularmente importante para el proceso de transesterificación, ya que el alto contenido de ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH o KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiesel. La saponificación no solo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel (ZAPATA *et al.*, 2007).

2.8. Insumos: alcohol y catalizador

2.8.1. Alcoholes

Es el principal insumo para la producción de biodiesel. En volumen, representa alrededor del 10-15% de los insumos consumidos. Los alcoholes que más comúnmente se utilizan para producir biodiesel son metanol y etanol. Se puede utilizar otros alcoholes – propanol, isopropanol, butanol y pentanol – pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua (es decir, la presencia de agua en mínimas cantidades inhibe la reacción).

El metanol es tóxico cuando se ingiere, se inhala o al contacto con la piel, y además altamente inflamable – sus gases se encienden a una temperatura de 12°C. Por encima de esta temperatura las mezclas de aire y vapor de etanol (con al menos 6% de metanol) son explosivos. Cabe mencionar además que el metanol se obtiene principalmente de fuentes fósiles no renovables: del gas natural o gas metano. También es posible obtenerlo

mediante destilación seca de la madera, pero este proceso aún no se aplica a gran escala, es recomendable emplearlo porque produce una reacción del biodiesel más estable.

El etanol es menos tóxico – aunque puede tener efectos negativos (ebriedad, coma etílico) cuando se ingiere en grandes cantidades – pero también es altamente inflamable. Su uso requiere de menores medidas de seguridad ocupacional, pero sí de seguridad contra incendios. La desventaja de su uso para producir biodiesel es que es mucho menos reactivo que el metanol, y la transesterificación se ve afectada principalmente por cualquier cantidad de agua presente en los insumos. Se requiere entonces que el etanol utilizado tenga una pureza superior al 99%; el etanol, proviene de materias primas renovables: caña de azúcar, remolacha azucarera, papa, otros vegetales celulósicos, etc. (MOTA, 2007).

2.8.2. Catalizador

La transesterificación de los triglicéridos puede ser realizada mediante diferentes procesos catalíticos. El proceso más conocido, utilizado y hasta el momento más efectivo es el que emplea catalizadores alcalinos. Sin embargo, si el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres, la catálisis alcalina no es apropiada debido a que los hidróxidos reaccionan con los ácidos grasos formando jabones, lo cual reduce el rendimiento de producción de biodiésel. En este caso, se requiere otro tipo de transesterificación, o un pretratamiento con catalizadores ácidos.

En el caso de la catálisis alcalina, es muy importante que los catalizadores se mantengan en un estado anhidro. Debe evitarse su contacto prolongado con el aire, pues éste disminuye su efectividad debido a la interacción con la humedad y con el dióxido de carbono. Los catalizadores cáusticos tienen ventajas y desventajas:

- **Hidróxido de sodio (NaOH):** Viene en forma de cristales que deben ser disueltos en el alcohol antes de la transesterificación. Es un producto muy barato y fácil de conseguir, pero es cáustico e irritante, y su manipulación directa sin protección respiratoria y para la piel debe evitarse. Al igual que en el caso del KOH, la manipulación de este insumo sólido puede ser complicada (especialmente en plantas de producción grandes, donde se quieren evitar operaciones manuales). Además, el NaOH es muy higroscópico (absorbe humedad del ambiente), lo cual hace que los cristales se peguen, sean más difíciles de manipular, y además reduce su eficacia.

- **Hidróxido de potasio (KOH):** Muy similar al hidróxido de sodio, el hidróxido de potasio viene también en forma de cristales que deben ser disueltos antes de la transesterificación. Es un producto barato y disponible en la mayoría de lugares, debido a su mayor peso molecular, se necesita mayor cantidad de KOH que de NaOH para hacer el mismo trabajo, lo cual puede elevar costos. Las dificultades de operación y riesgos son similares a los que existen con NaOH (CASTRO, 2007).

Los catalizadores como KOH y NaOH se emplean en proporciones variadas, que oscilan entre 0.5 y 1.5 % peso del aceite, encontrándose para la

mayoría de las reacciones de transesterificación con aceites refinados 1 % como la cantidad óptima, sin embargo, con aceites de elevada acidez se recomienda ajustar este valor aun cuando esta práctica puede llevar a formación de jabones y emulsiones que reducen el rendimiento de la reacción (ROBALINO, 2009).

2.9. Preparación del metóxido

En la preparación del metóxido, la reacción se lleva a cabo con un 20% de metanol ó 30% de etanol y un 0.35% de soda cáustica ó 1% de KOH. Sin embargo, en el transcurso de la investigación se ha comprobado que estas cantidades solo son válidas cuando se trabaja con aceites refinados. En el caso de emplear aceites crudos o usados, éstos contienen ácidos grasos libres que interfieren en la reacción de transesterificación (ZHANG *et al.*, 2003), si su porcentaje supera el 1%, deben ser separados previamente mediante un proceso de saponificación. Si su concentración no es tan alta, es suficiente con realizar una titulación del aceite con el catalizador a utilizar, determinar su grado de acidez y agregar una mayor cantidad de catalizador a la reacción que permita neutralizar los ácidos (TICKELL, 2000).

2.10. Proceso de transesterificación

En la producción de biodiesel, hay distintos métodos para poder realizar el proceso de transesterificación, como son la transesterificación ácida (ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico), transesterificación enzimática (lipasas), transesterificación heterogénea (catalizadores en fase

sólida), transesterificación supercrítica (los reactivos se llevan a condiciones críticas del alcohol utilizado), transesterificación alcalina (KOH, NaOH); siendo éste último el más empleado; ya que son baratos, presentan menor corrosión que los catalizadores ácidos, se logra alcanzar conversiones superiores al 99% y la cinética es relativamente rápida; se puede añadir que no requiere equipos complicados y la separación de los productos es fácil de realizar. Presenta como desventaja la necesidad de tener aceites con ausencia total de agua, puesto que esta induce una hidrólisis con formación de jabones y pérdidas de éster; asimismo se requiere un bajo contenido de ácidos grasos libres, y otras impurezas (BARRIGA, 2011).

Debido a que los aceites vegetales y las grasas animales están constituidos por moléculas de ácidos grasos y una molécula de glicerol. A éste último, los aceites y grasas le deben su elevada viscosidad. Por ello el proceso de transesterificación, en sencillo, ya que consiste en reemplazar el glicerol (alcohol trivalente) por un alcohol monovalente («más ligero») usualmente Metanol o Etanol, formando moléculas más pequeñas (ésteres monoalquílicos, comúnmente denominado biodiesel), cual es con una viscosidad similar a la del combustible diésel derivado del petróleo (CASTRO *et al.*, 2007). Este proceso permite disminuir la viscosidad del aceite, la cual es principalmente ocasionada por la presencia de glicerina en la molécula; la alta viscosidad del aceite impide su uso directo en motores diésel, desventaja que supera mediante este proceso. Para lograr la reacción se requiere de temperaturas que oscilan entre 40 y 60 °C, así como la presencia de un catalizador que puede ser la soda o potasa caustica (WHITMAN, 2007).

2.10.1. Reacción de la síntesis

Los aceites vegetales y las grasas animales están compuestos principalmente por moléculas denominadas triglicéridos, las cuales se componen de tres cadenas de ácidos grasos unidas a una molécula de glicerol (CANAKCI y VAN GERPEN, 2001). En la reacción de transesterificación la molécula de triglicérido se divide en tres moléculas de metiléster y una de glicerina. El hidróxido, actuando como un catalizador, rompe los enlaces que unen a los ácidos grasos con la glicerina, la glicerina se separa y las cadenas de ácidos grasos se unen al metanol. En esta reacción hay tres partes, primero una cadena de ácido graso se separa del triglicérido y se une al metanol formando una molécula de metiléster, quedando un diglicérido. Después se separa de la glicerina otra cadena de ácido graso, que se une al metanol formando la segunda molécula de metiléster, dejando un monoglicérido. Finalmente el monoglicérido se convierte en metiléster sustituyendo la glicerina por metanol. Cuando termina esta última etapa se completa la reacción (ARIAS, 2012).

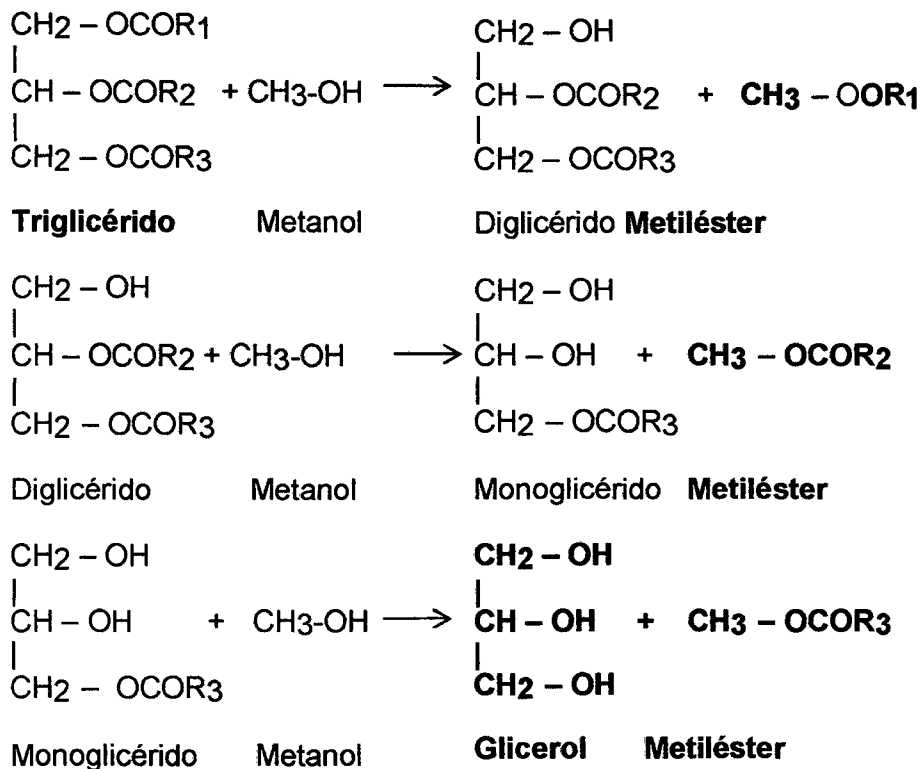


Figura 1. Reacción de la transesterificación

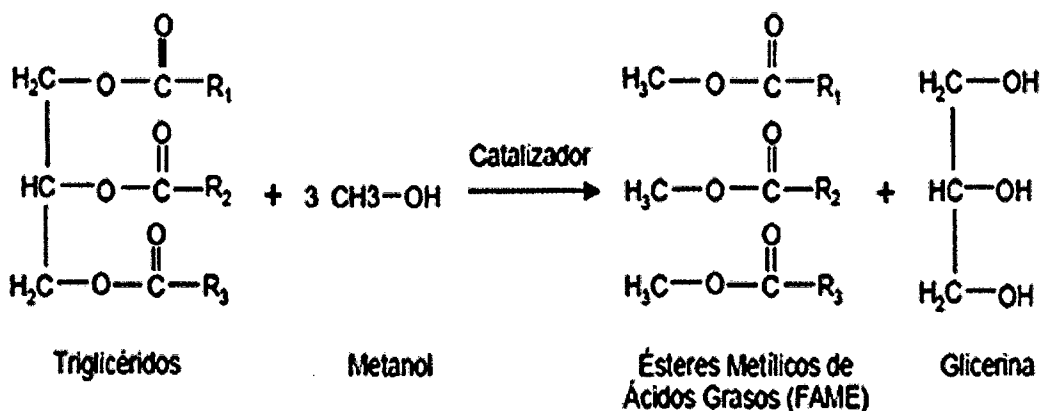


Figura 2. Reacción global de la transesterificación

2.11. Proceso de producción de biodiesel

El proceso de producción de biodiesel se basa en la reacción de transesterificación del aceite, TICKELL (2000) y ZHANG *et al.* (2003). Para lograr esta reacción se requieren temperaturas entre 40 y 60°C, así como la presencia de un catalizador, que puede ser la soda o potasa cáustica (NaOH o KOH, respectivamente). Luego de precalentar el aceite a la temperatura deseada, se incorpora el metanol con el catalizador disuelto y se mantiene reaccionando durante 1 a 2 horas con agitación constante, TICKELL (2000) y BUSTILLO *et al.* (2003). Después de la reacción se separan dos fases en la mezcla: una superior líquida y cristalina, el biodiesel; y otra inferior, de color por lo general más oscuro y alta viscosidad, la glicerina que tiene numerosos usos en diversas industrias químicas, cosméticas y farmacéutica.

Al obtener el biodiesel, éste requiere un pos-tratamiento para asegurar que el biodiesel cumpla con los estándares de calidad exigidos, pues éste aún contiene impurezas derivadas del proceso parte de metanol en exceso, posiblemente jabones, y trazas de catalizador. Los metilésteres se someten a temperatura y vacío para evaporar el metanol y recuperarlo, y luego son llevados a un proceso de lavado para separar todas las impurezas. El lavado se realiza con agua, el cual permite separar cualquier resto de glicerina, metanol, catalizador y jabón que hayan podido quedar en el biodiesel, ya que todas estas moléculas son más solubles en agua que en el biodiesel. Además, el lavado ayuda a determinar si la reacción ha sido completa, ya que si en el biodiesel quedan mono-, di- y triglicéridos sin reaccionar, éstos formarán una

emulsión con el agua (espuma) muy difícil de separar. Así, si una muestra de biodiesel es mezclada vigorosamente con agua y tras aproximadamente media hora de reposo no hay una separación aceptable de las dos fases, entonces es necesario mantener la agitación y calentamiento hasta que concluya la reacción (TICKELL, 2000).

2.12. Propiedades de biodiesel para motores.

Los motores diésel de hoy requieren un combustible que sea limpio al quemarlo, además de permanecer estable bajo las distintas condiciones en las que opera. El biodiesel es el único combustible alternativo que puede usarse directamente en cualquier motor diésel en proporciones de 2-30% de acuerdo con la normas EN 590 y EN 14214, sin ser necesario ningún tipo de modificación, en mezclas con mayor proporción de biodiesel se requiere de adaptaciones al motor como precalentadores o pre-cámaras de combustión (HERRERA, 2008).

Uno de los motivos por los que se realiza una mezcla con Gasóleo convencional (EN590), es que los aceites vegetales son capaces de disolver la goma y el caucho, materiales utilizados en la fabricación de los conductos y juntas del sistema de alimentación de los vehículo. Por este motivo, el uso prolongado de biodiesel 100% podría llegar a degradar dichos conductos y juntas y se podrían producir poros o pérdidas de combustible, siendo biodegradable en un 98,3% en 21 días.

Desde mediados de los años 90, casi todos los fabricantes de vehículos, ya han substituido estos conductos y juntas por otras fabricadas con materiales plásticos o derivados, por lo que el biodiesel 100% no les afecta. En el Estado Español, y debido a la imposibilidad de controlar si los vehículos están o no preparados para la utilización del biodiesel 100%, las empresas distribuidoras optan por ofrecer una mezcla (10% Biodiesel + 90% Gasóleo), posibilitando de esta manera, que cualquier vehículo lo pueda utilizar sin ningún tipo de problema (CLARIMÓN *et al.*, 2005).

2.13. Parámetros fisicoquímicos para el control del biodiesel

La calidad del biodiesel ha de ser controlada con mucho rigor, ya que la presencia de determinados contaminantes puede provocar diversos problemas en lo que respecta tanto su obtención como a su uso como combustible en los motores diésel. Así, la glicerina en exceso presente en el mismo puede causar problemas durante el almacenamiento o en el sistema de alimentación, pudiendo conducir a ensuciar inyectores o en la formación de mayores emisiones de aldehídos, así como la corrosión del sistema de inyección. Los parámetros del biodiesel que se estudiaron en esta investigación se enumeran en la sección de metodología y aunque no se estudiarán todos (por falta de recursos y métodos implementados), éstos nos darán una idea general de las características y la calidad de los productos obtenidos para el control de calidad de biodiesel.

- **Densidad:** La densidad del aceite es la relación entre su peso y su volumen, y en este caso está afectada por la temperatura, la densidad nos da idea del contenido de energía del combustible, donde a mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible mejor. La densidad de los aceites vegetales varía dependiendo del tipo que sea y también varía dependiendo la temperatura a la que se encuentre, la densidad estándar para los aceites vegetales va de un mínimo de 0.90 g/ml a un máximo de 0.93 g/ml a una temperatura media de 15°C (AVELAR, 2008).

- **Viscosidad:** El biodiésel debe tener una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia por fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible. También se limita la viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño de los motores, y en las características del sistema de inyección (MOTA, 2007).

Cuadro 2. Estándares internacionales para biodiesel (B100)

Propiedad	Unidad	Austrian Standard C1190 Feb.91	ASTM D6751	Euro Standard EN14214	NTP 321.125
Densidad a 15°C	g/cm ³	0.86-0.90		0.86-0.90	
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	6.5-9.0 (20°C)	1.9-6.0	3.50-5.00	1.9-6.0
Flashpoint	°C (°F)	min.55	Min.93	min.120	130 min
CFPP	°C(°F) verano invierno	max.0(32) max.-8(17.6)			
Azufre total	mg/kg	max.200	max.500	max.10.0	

Carbón Conradson 100% a10%	%masa	max.0.1	max.0.05	max.0.30	
Número de Cetano	-	min.48	min.47	min.51	min.47
Ceniza Sulfatada	%masa	max.0.02	max.0.02	max.0.02	max.0.02
Contenido de agua	mg/kg	Libre de agua		max.500	
Agua y sedimento	%Vol.		max.0.05		max.0.05
Contaminación total	mg/kg			max.24	
Corrosión en lámina de cobre(3h,50°C)			No.3b máx.	1	3
Valor de neutralización	mg	max.1	Max.0.8	max.0.50	
Estabilidad de oxidación	H			min.6.0	min.3.0
Contenido de metanol	%masa	max.0.30	Max.0.2	max.0.20	max.0.20
Contenido de ésteres	%masa			min96.5	
Monogliceridos	%masa			max.0.80	
Digliceridos	%masa			max.0.20	
Trigliceridos	%masa			max.0.20	
Glicerina libre	%masa	max.0.03	max.0.02	max.0.02	max.0.02
Glicerina total	%masa	max.0.25	max.0.24	max.0.25	max.0.24
Índice de yodo				max.120	
Ácido Linolénico ME	%masa			max.12.0	
Polinsaturado (>=4db)	%masa			max.1	

Contenido de fósforo	mg/kg			max.10.0	max.10.0
Contenido alcalino(Na+K)	mg/kg			max.5.0	max.5.0
Metales alcalinotérreos (Ca+Mg)	mg/kg			max.5.0	max.5.0

Fuente: RAFAEL A, [En línea]

2.14. Investigaciones realizadas en la producción de biodiesel.

2.14.1. Obtención de biodiesel a partir de aceite quemado de cocina por el método ácido-base (VELASCO *et al.*, 2011).

El biodiesel es una fuente de energía limpia, renovable y económicamente viable, que además contribuye a la conservación del medio ambiente, por lo que representa una alternativa a los combustibles fósiles. El objetivo de este trabajo es obtener el biodiesel mediante el método ácido-base de dos tipos de aceite que se utilizan en la cocina, siendo aceite de maíz y de canola. Para producir biodiesel de forma eficiente a partir de aceites usados hay que evitar un gran problema: la formación de jabón. El jabón se forma durante la transesterificación alcalina catalizada (la reacción que forma el biodiesel) cuando los iones de sodio se combinan con los ácidos grasos libres. El jabón perjudica el rendimiento del proceso porque une a los metilésteres con el agua formando emulsión. Esos ésteres unidos al jabón se pierden en la fase de lavado; es más difícil separar el biodiesel del agua. El proceso ácido-base consta de dos etapas, siendo la primera etapa la esterificación y la segunda de transesterificación. En la primera etapa se formó un compuesto a partir de un ácido y de un alcohol. El alcohol, como en otros procesos, fue metanol (20 mL),

pero en vez de hidróxido de sodio el catalizador es ácido sulfúrico (0,25 mL) con una concentración del 95%, mezclándose a una temperatura de 35°C. En la segunda etapa el ión sulfato procedente del ácido sulfúrico se combina con el ión sodio procedente del metóxido de sodio en la segunda etapa para formar sulfato de sodio, que es una sal soluble en agua que se separa del biodiesel durante el lavado. En el biodiesel no queda nada de azufre. A continuación se muestra los siguientes resultados de dicho estudio.

Cuadro 3. Determinación de parámetros de biodiesel de maíz y canola

Aceite	Maíz	Canola
Densidad a 15°C.	0.876572 kg/L	0.877632 kg/L
pH.	7.19	7.03
Viscosidad cinemática	6.4797 mm ² / s	6.4719 mm ² / s.

Fuente: Obtención de biodiesel a partir de aceite quemado de cocina por el método ácido-base

2.14.2. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiesel) (HERRERA, 2008)

En este trabajo se presenta un estudio experimental llevado a cabo con el fin de evaluar la posibilidad de aprovechar el aceite de desecho de frituras de la industria alimenticia para la obtención de biodiesel. En la caracterización física de la materia prima se realizaron las pruebas de densidad, índice de Refracción y humedad. En la caracterización química se realizaron pruebas de acidez, índice de Saponificación, índice de yodo, índice de Peróxidos y se seleccionó e implementó una metodología para la obtención

de biodiesel con base en los recursos disponibles utilizando una proporción de 30 mL de Metanol, 1 g de KOH y 100 mL de aceite residual. Finalmente se caracterizó el biodiesel obtenido mediante las pruebas físico-químicas; densidad, índice refracción, viscosidad cinemática, punto de inflamación, poder calorífico, contenido de agua, índice de yodo y corrosión lámina de cobre; además se realizó una determinación cuantitativa de los metilesteres en el biodiesel por medio de cromatografía de gases. Todos los resultados de la caracterización fueron comparados con las especificaciones técnicas estipuladas en las normas internacionales para biocombustibles, concluyéndose que se obtuvo un biocombustible con propiedades físico-químicas dentro de los rangos aceptados por las normas ASTM, lo cual hace a este residuo una materia prima adecuada para la obtención del biodiesel, contribuyendo al aprovechamiento de este subproducto industrial y a la reducción del impacto ambiental que este pueda estar causando. Los resultados de este estudio se mencionan a continuación:

Las características físicoquímicas obtenidas del aceite residual fueron las siguientes: La densidad del aceite residual de frituras se realizó por triplicado obteniendo un resultado de 0,9156. g/mL, la acidez fue de 2.47 % en ácido oleico, el índice de refracción a 25°C fue $n_{25 D} = 1,4670.$, la humedad fue de 1,257 % en masa, el índice de saponificación fue de 199,7 mg de KOH/g de aceite, el índice de yodo fue 110,06 g de I/100g de aceite, el índice de peróxidos fue de 10,4483 meq O₂ / kg de aceite.

Las características del biodiesel obtenido a partir aceite residual fueron las siguientes: La densidad fue de 0,8760 g /mL, la viscosidad cinemática a 40°C fue 3,91950 mm²/s, el índice de refracción del biodiesel a 25°C fue $n_{25 D} = 1,4492$, punto de inflamación fue de 170,67 °C, poder calorífico fue de 46913.18 kJ/kg, contenido de agua fue del 0,26 % de humedad, el índice de yodo del biodiesel fue de 96.41 g de I/100g de aceite.

2.14.3. Análisis químico de mezclas biodiesel de aceite de cocina usado y diésel por espectroscopia infrarroja (LAFONT, 2011).

Se propone un método eficiente para determinar los porcentajes óptimos de mezclas biodiesel de aceite usado y diésel, para uso automotor. El procedimiento consiste en recolección del aceite usado, limpieza de residuos, y obtención del biodiesel mediante una reacción de transesterificación, con diferentes proporciones molares metanol/aceite (1:3, 1:6, 1:8, 1:10), en presencia de hidróxido de potasio al 1% p/p como catalizador, a 65°C y 270rpm durante 1.5 horas a presión atmosférica, en un sistema de reflujo. Las muestras fueron analizadas por espectroscopia infrarroja. De las proporciones molares estudiadas en la reacción de producción del biodiesel se encontró que la proporción 1:8 metanol/aceite fue la que presentó mayor rendimiento de reacción con un $92.046 \pm 0.641\%$. A medida que aumenta el porcentaje de metanol, la producción de biodiesel se mejora significativamente. La proporción 1:10 es comparable con la 1:8, con un porcentaje de rendimiento del $91.310 \pm 0.712\%$, que no justifica el mayor gasto de metanol, ya que se disminuye el rendimiento de la reacción, debido a que el exceso de metanol

dificulta la separación del glicerol por decantación. Las proporciones molares de 1:6 y 1:3 presentaron un rendimiento menor del 70%, lo que se atribuye a que la reacción es incompleta. En otros estudios realizados con diversos tipos de aceites, se encontró la proporción 1:6 como la más adecuada para obtener altos rendimientos de producción, condición que no presentó el aceite de cocina usado que requirió un exceso de metanol para alcanzar altos rendimientos como la proporción molar de 1:8 con un porcentaje de rendimiento de $92,046 \pm 0,641$.

2.14.4. Evaluación de la purificación de biodiesel en la etapa final de producción (CESARE *et al.*, 2009).

En el presente trabajo de investigación se ha evaluado la purificación del biodiésel en la etapa final de su producción. El biodiesel fue elaborado a partir de los aceites de soya (cruda y RBD) y de palma (cruda y RBD), cuyos índices de acidez se determinó antes del procesamiento. Para el proceso de transesterificación se empleó metanol en un 17-18 % y catalizador (KOH) de 0,1 a 1,5 %, una temperatura de reacción 60 °C por un espacio de 02 h. En la producción de biodiésel (transesterificación), además de los productos principales (los nuevos ésteres metílicos), también se obtienen algunos compuestos indeseables (jabones, glicerol, etc.) que deben ser eliminados por lavado, ya que su presencia es perjudicial para los motores y para el medio ambiente. El proceso tradicional de lavado se realizó con un 20% de su volumen de agua y variando la temperatura de lavado y en vez de hacerlo con agua fría, se hizo con agua a 90° C. La calidad de los combustibles obtenidos

(con las diferentes materias primas y tipos de lavado) fue evaluada a través del índice de acidez y los contenidos de glicerol y jabones. Se determinó que el lavado con agua caliente es más eficiente que el tradicional lavado con agua fría, por los bajos valores de índice de acidez, contenido de jabones y de glicerol. Con el lavado con agua caliente, los biocombustibles obtenidos a partir del aceite de soya (cruda y RBD) cumplen con todas las exigencias de la Norma Técnica Peruana del Biodiesel B100 NTP 321.125.2007 y las normas internacionales como la ASTM y la norma Europea NE, pero los obtenidos a partir de aceite de palma (cruda y RBD) exceden ligeramente el porcentaje de glicerol total establecido en las normas técnicas indicadas; así mismo, las normas coinciden al establecer como contenido máximo del biodiesel: 0,23% de glicerol total, 0,02% de glicerol libre y que su índice de acidez no debe exceder de 0,8. A continuación se muestran los siguientes resultados:

Cuadro 4. Análisis de la materia prima y producción de biodiesel

Características:	Aceite de soya		Aceite de palma	
	Crudo	RBD	Crudo	RBD
Índice de acidez	2,22	0,16	4,13	0,27
Cantidad de aceite (kg)	45,5	45	45,5	45
Cantidad de metanol (L)	9,0	9,0	9,0	9,0
Cantidad de catalizador (kg KOH)	0,50	0,408	0,693	0,413
Porcentaje de catalizador (% KOH)	1,10	0,91	1,52	0,91
Biodiésel crudo obtenido (kg)	40,0	44,18	38,9	43,6
Rendimiento de biodiésel crudo (%)	87,9	98,17	85,49	96,8
Peso de glicerina recuperada (kg)	10,59	7,19	11,58	7,59
Rendimiento de glicerina (%)	23,3	15,98	25,45	16,87

Fuente: Evaluación de la purificación de biodiesel en la etapa final de producción

2.14.5. Metodología para la fabricación de biodiesel a partir del aceite de palma africana (*Elais guineensis*) y aceite de soya usado (RECINOS *et al.*, 2005).

El proyecto se fundamentó en desarrollar una metodología para la fabricación de biodiesel a partir del aceite refinado y crudo de palma africana, y adicionalmente del aceite de soya usado. Se evaluaron 15 tratamientos con variables independientes de acuerdo al origen del aceite; y variables dependientes de acuerdo al tipo de alcohol y catalizador empleado en la reacción de síntesis. Se obtuvieron dos metodologías: la primera empleando metanol e hidróxido de sodio (Metodología A) y la segunda utilizando metanol, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio (Metodología B), para la fabricación del biodiesel. En la Metodología B se sintetizó biodiesel en mayor proporción que en la Metodología A, debido a la conversión de los ácidos grasos del aceite en esterés en el proceso de esterificación, previo a la reacción de transesterificación. El análisis de calidad del biodiesel cumple con el 70 % de las normas exigidas por ASTM para dicho combustible. El biodiesel producido es de calidad aceptable para emplearlo en maquinaria agrícola.

Los tratamientos a partir de los cuáles se sintetizó biodiesel fueron los de Metodología A con metanol (200 mL) y NaOH (4 g), T3 (aceite refinado de palma africana) y T13 (aceite de soya usado); y los de la Metodología B con metanol en dos fases y como catalizador al ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, T5 (80 mL metanol, 1 mL ácido sulfúrico y 120 mL metanol, 3,5 mL ácido sulfúrico) y T15 (80 mL metanol, 1 mL ácido sulfúrico y 120 mL metanol, 3,5 mL

ácido sulfúrico). Durante la elaboración del biodiesel con la Metodología A, en la fase de mezclado del metóxido de sodio y el aceite, es decir, durante la reacción de transesterificación, se observó un cambio de color notable tanto para T3, con aceite refinado de palma africana; como para T13, con aceite usado de cocina. En los primeros minutos de agitación, se aprecia un color café cremoso.

2.14.6. Opciones para la producción de biodiesel en el Perú (CALLE *et al.*, 2005)

Intermediate Technology Development Group (ITDG) y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) desarrollaron un trabajo de investigación con el fin de explorar las opciones para la producción de biodiesel en el Perú. Se diseñaron, construyeron y evaluaron dos propuestas tecnológicas: una para la producción artesanal de biodiesel a nivel familiar en zonas aisladas de la selva, a partir de aceites de especies vegetales abundantes, como una posible solución al problema de acceso a la energía de dichas comunidades; otra, para la producción de biodiesel a pequeña escala con aceites vegetales usados o de descarte, para ser utilizado como aditivo del combustible diésel en vehículos de transporte terrestre, reduciendo sus emisiones y ofreciendo una alternativa para la disposición final de los aceites usados.

Se realizaron pruebas de transesterificación de los aceites obtenidos a escala de laboratorio, la transesterificación se realizó utilizando

20% en volumen de metanol (95% de pureza) e hidróxido de sodio o de potasio (grado industrial) como catalizadores. Se trabajó con aceites de diversa procedencia (refinado de cocina, crudo de palma, palmiste, sachá inchi, umarí, aguaje, tempate, ricino, girasol, soya, castaña y aceites vegetales usados). De acuerdo con las características de cada aceite, se realizaron tratamientos de refinación previos a la transesterificación, tales como: filtrado de impurezas, secado y neutralización y filtrado de ácidos grasos libres. A partir de las pruebas a escala de laboratorio y de la revisión de modelos de pequeñas plantas de producción de biodiesel en otros países, se diseñaron y construyeron dos sistemas, a continuación se muestra resultados:

En el cuadro 5 se presentan los rendimientos en la producción de biodiesel, se puede apreciar que existe una relación directa entre la acidez del aceite y el rendimiento de la transesterificación por catálisis alcalina. A menor índice de acidez, la transformación en biodiesel presenta mejores resultados.

Cuadro 5. Características de los aceites en relación con los rendimientos de producción de biodiesel.

Insumo	Aguaje	Umarí	Lempate	Sacha		Castaña	Girasol	Soya	Palma
				Inchi	Palmiste				
Acidez del aceite (g NaOH) / L aceite)	10,0	2,0	8,0	6,0	6,5	0,6	1,7	1,3	5,0
Rendimiento biodiesel v. aceite	81,02%	90,6%	77,86%	96,5%	88,8%	97,5%	93,0%	95,3%	87,2%

Fuente: Opciones para la producción de biodiesel en el Perú

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación política

El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Fitoquímica de la Facultad de Recursos Naturales Renovables “Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicado a 1,5 Km de la carretera Tingo María – Huánuco. Políticamente ubicado en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco, encontrándose a una altitud de 668 m.s.n.m, con una temperatura media de 24,9 °C y una humedad relativa de 86 %.

3.2. Metodología

3.2.1. Recolección del aceite doméstico residual

El aceite doméstico residual que se utilizó provino de diversas fuentes, como domicilios, pollerías y comedor universitario de la Universidad Nacional Agraria de la selva; siendo recolectados en distintos recipientes y posteriormente mezclados para poder continuar con el pretratamiento.

3.2.2. Pre tratamiento del aceite doméstico residual

El pretratamiento que se realizó al aceite doméstico residual, consistió en hacer reposar el aceite por un período aproximado de una semana, para poder así decantar en la base de los envase todas las impurezas sólidas de mayor peso, se filtró con un tamiz de 50 micras para retener las impurezas aún existentes, posteriormente calentándose a una temperatura aproximada de 145°C, hasta que se eliminó toda cantidad existente de agua.

3.2.3. Determinación del índice de acidez del “aceite doméstico residual”, (RUTPRAC, 2006).

- Se preparó una solución etanólica (96°) de hidróxido de sodio (NaOH) de 0,1 N para su valoración.
- En un matraz se añadió 5g de aceite doméstico residual.
- Seguidamente se disolvió en un matraz, 50 mL de la solución alcohol-éter, previamente con fenolftaleína al 1%.
- Continuación a esto se añadió 5mL de solución fenolftaleína al 1%, continuamente se realizó la valoración con la solución álcali utilizado (NaOH 0.1 N). La fórmula utilizada para determinar el índice de acidez, se detalla:

$$\text{Índice de acidez} = \frac{V_x N \times 40}{P}$$

Dónde:

V = Volumen en mililitros de solución de álcali utilizado

N = Normalidad de la solución de NaOH

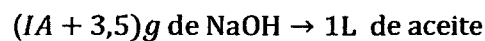
P = Peso en gramos de muestra utilizada

40 = Peso molecular del NaOH

Se realizaron cuatro repeticiones, para obtener un resultado con un menor grado de error.

3.2.4. Determinación de la cantidad de catalizador.

La cantidad de catalizador empleado para el proceso de transesterificación se determinó de acuerdo a la ecuación establecida por (TIKELL, 2002), el cual se detalla a continuación:



Como la muestra a emplearse en el trabajo de investigación es de 100 mL, se calculó por regla de tres simples la cantidad de catalizador para tal volumen.

$$X = 1A + 0,35 \text{ g}$$

Desarrollando para 100 mL:

$$X = 1A + 0,35 \text{ g}$$

$$X = 0,0361 + 0,35 \text{ g}$$

$$\mathbf{X = 0,3861 \text{ g NaOH}}$$

Por lo tanto, para neutralizar 100 mL de aceite doméstico residual, se necesitó 0,3861 g de NaOH.

3.2.5. Transesterificación de los ácidos grasos del aceite doméstico residual.

3.2.5.1. Preparación del metóxido de sodio.

- Se procedió a colocar el hidróxido de sodio en una fiola de 100 mL totalmente seco sin contacto con la humedad ambiental.

- Posteriormente se agregó 20 mL volumen determinado de metanol de acuerdo a los tratamientos.

- Se activó el agitador magnético hasta que se disuelva totalmente el hidróxido de sodio, formando el metóxido.

- Se cubrió totalmente la fiola donde se encuentra el metóxido, para evitar su hidratación con la humedad ambiental y la evaporación del metanol, (CALERO *et al.*, 2007).

3.2.5.2. Obtención del biodiesel del aceite doméstico residual.

- En un frasco se calentó 100 mL de aceite doméstico residual sobre una cocina eléctrica en un rango de 50 a 55 °C.

- Se añadió el metóxido de sodio de acuerdo a cada tratamiento.

- Luego se agitó durante 2 horas, procurando que el medio de reacción se encuentre a una temperatura constante, según el tratamiento. Controlando la temperatura de la cocina, utilizando un termómetro de 0-100°C.

- Pasando las dos horas se dejó enfriar a temperatura ambiente, posteriormente se colocó la mezcla en una pera de decantación por un lapso mínimo de 8 horas para su separación respectiva (CALERO *et al.*, 2007).

3.2.6. Separación de biodiesel y glicerina

- Pasado el lapso de tiempo, el biodiesel obtenido se encuentra en la parte superior de la pera de decantación, presentando un color similar al aceite crudo pero con una tonalidad más clara y cristalina que el aceite normal; mientras que la glicerina con otras impurezas se encuentra en la parte inferior con un color marrón oscuro.

- Se separó las dos fases, como mencionamos anteriormente, el biodiesel impuro y la glicerina impura (CALERO *et al.*, 2007).

3.2.7. Lavado del biodiesel

- De la pera de decantación, se retiró la glicerina quedando el volumen de biodiesel impuro variando para cada tratamiento, se agregó agua destilada en un 40% al volumen de biodiesel obtenido (biodiesel crudo), agitando hasta que no haya liberación de jabones.

- A esta mezcla se colocó un embudo de separación, dejándose reposar durante un día (primer lavado).

- Transcurriendo un día se pudo observar en la parte inferior de la pera de decantación una fase acuosa que contiene gran cantidad de impurezas, mostrando un color blanco lechoso.

- Se repitió este mismo procedimiento del lavado hasta obtener en la parte inferior el agua incolora, indicando que el biodiesel se encuentra sin impurezas. Se realizó tres lavados por cada tratamiento, el primer lavado duro un día de reposo, mientras que el segundo y el tercer lavado se realizó en un tiempo de reposo de 1 hora (CALERO *et al.*, 2007).

3.2.8. Secado de biodiesel

Se calentó a 48 °C manteniéndose hasta la evaporación y el secado total del agua, repitiendo el mismo procedimiento para todos los tratamientos.

3.2.9. Prueba de rendimiento de producción de biodiesel

Se determinó el rendimiento de producción del biodiesel por cada tratamiento con sus respectivas repeticiones, para ello se empleó la siguiente fórmula (CALERO *et al.*, 2007).

$$\frac{\text{volumen de biodiesel}}{\text{Volumen de aceite doméstico residual}} \times 100$$

3.2.10. Pruebas de calidad

Se realizaron tres pruebas de calidad de (pH, densidad a 27 °C y viscosidad a 40 °C).

- **Determinación de pH:** se determinó el pH por cada tratamiento con sus respectivas repeticiones para ellos se empleó un peachímetro digital. (pHmeterSG2).

- **Densidad a 28 °C:** se determinó la densidad del biodiesel por cada tratamiento y sus respectivas repeticiones, empleando un picnómetro de 50 mL, determinando así con la siguiente formula:

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

Donde:

ρ = Densidad en g/mL.

W = Peso del biodiesel en el picnómetro en g.

V = Volumen del picnómetro en mL.

- **Viscosidad a 40°C**

Se determinó la viscosidad a 40 °C, utilizando el método de Ostwald (VALDERRAMA, 2007).

3.3. Unidades y variables experimentales

3.3.1. Unidad experimental

La unidad experimental en estudio es el aceite doméstico residual.

3.3.2. Variables dependientes

En la variable dependiente tenemos:

- El rendimiento del biodiesel.

3.3.3. Variables independiente

Entre las variables independientes tenemos:

- Cantidad de metanol
- Temperatura

3.4. Diseño estadístico

Se aplicó el diseño factorial 3A x 5B completamente al azar, utilizando el programa estadístico para el procedimiento de los datos, siendo un total de 15 tratamientos evaluados. Modelo aditivo lineal del diseño factorial.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ij}$$

Con la ayuda del programa SAS 9.0; se realizó un análisis de varianza con un diseño factorial completamente al azar (DCA) para determinar si existe diferencia estadística entre los tratamientos, corroborando los

resultados del análisis de varianza con la prueba TUKEY para determinar cuál de ellos es el de mayor significancia, lo cual determinará el tratamiento donde se obtendrá el mayor rendimiento del biodiesel.

3.4.1. Tratamientos

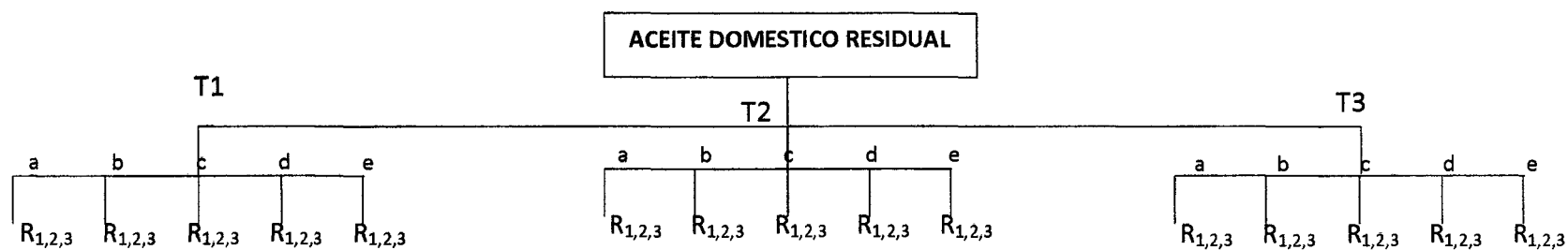
- Factor temperatura

(T1 = 45 °C ; T2 = 55 °C ; T3 = 65 °C)

- Factor cantidad de metanol

a= 20 mL, b=30 mL, c=40 mL, d=50 mL, e= 60 mL

3.4.2. Estructura del diseño experimental



Leyenda:

Aceite doméstico residual = 100 ml. Por cada combinación.

T₁, T₂ y T₃ = Factor Temperatura (T₁= 45°C; T₂=55°C; T₃=65°C).

a, b, c, d y e = Factor cantidades de metóxido(20mL, 30 mL, 40 mL, 50 mL, 60 mL).

R_{1,2,3} = 3 repeticiones

Total de tratamientos = 15

3.5. Flujoograma del proceso de obtención de biodiesel

A continuación se presenta un flujoograma del proceso para la obtención de biodiesel en el presente de trabajo de investigación.

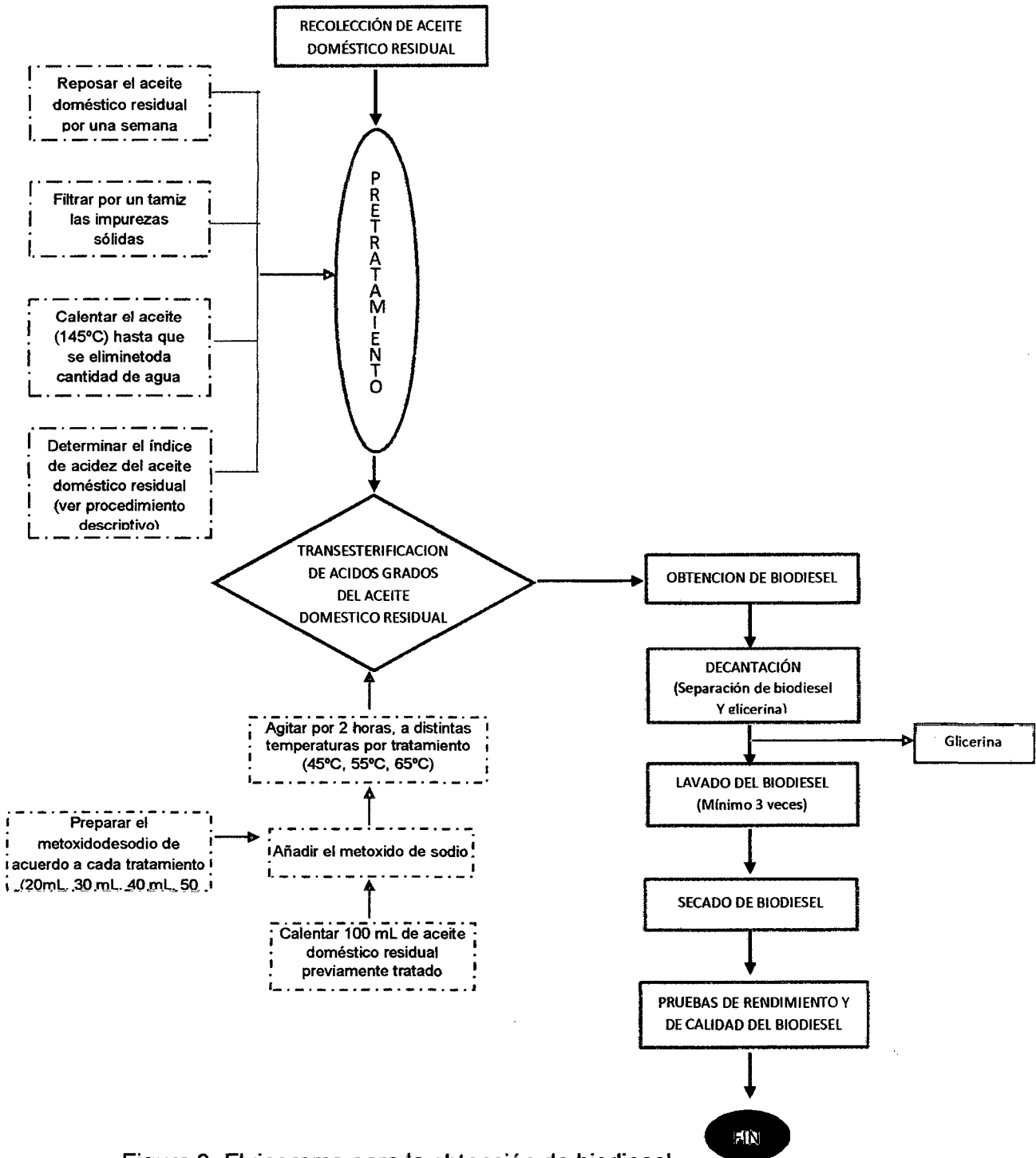


Figura 3 .Flujoograma para la obtención de biodiesel

IV. RESULTADOS

4.1. Determinación del índice de acidez.

Se determinó el índice de acidez del aceite doméstico residual, realizando 4 repeticiones, donde el volumen de la solución álcali utilizado oscilaba de 0,4mL a 0,5 mL, empleándose 5 gr de la muestra en estudio, con una normalidad de la solución de 0,1 y un peso molecular de 40 (NaOH); desarrollándose para cada muestra y empleando la fórmula que se menciona en la metodología, mostrándose los resultados en el siguiente cuadro:

Cuadro 6. Determinación del índice de acidez del aceite doméstico residual

Nº de repeticiones	Índice de acidez mg de NaOH/g de aceite
1	0,3936
2	0,3965
3	0,3976
4	0,4027
Promedio	0,3976

Fuente: Elaboración propia

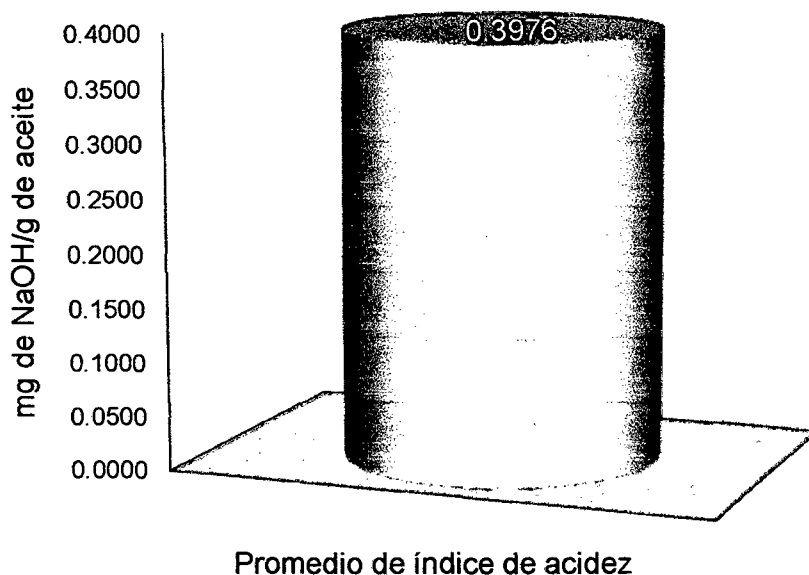


Figura 4. Cantidad de mg de NaOH/g de aceite

Por lo tanto, para la neutralización de los ácidos grasos libres de 1g de aceite doméstico residual es necesario 0,3976 mg de NaOH.

4.2. La temperatura óptima necesaria para obtener mayor rendimiento de biodiesel.

Cuadro 7. Prueba TUKEY para el factor temperatura

Orden de mérito	Factor temperatura (°C)	Promedio de biodiesel (mL)	Rendimiento (%)	Significancia
1	45	75,7	75,7	a
2	55	72,8	72,8	a
3	65	70,9	70,9	a

a, no hay diferencia significativa entre las temperaturas. En el análisis de varianza realizado, muestra que el factor temperatura no es significativo.

Realizando la prueba Tukey para el factor temperatura en el proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel, se puede apreciar que estadísticamente no hay diferencia significativa a las temperaturas que fueron evaluadas (45°C, 55°C, 65°C), presentando promedios de rendimiento de 75,7%; 72,8% y 70,9% respectivamente; mostrándose así en la siguiente figura:

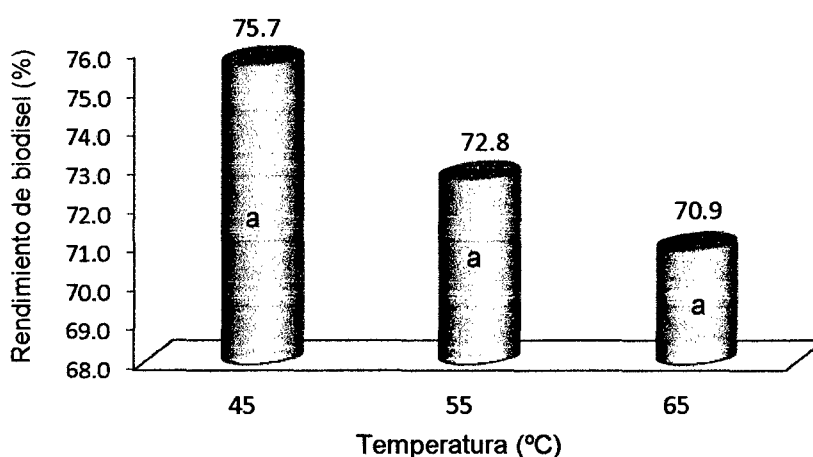


Figura 5. Influencia del factor temperatura en el rendimiento de biodiesel

4.3. Cantidad óptima necesario de metanol para obtener mayor rendimiento de biodiesel

Cuadro 8. Prueba TUKEY para el factor metanol

Orden de mérito	Factor metanol (mL)	Promedio de biodiesel (mL)	Rendimiento (%)	Significancia
3	20	73,1	73,1	ba
2	30	76,0	76,0	ba
1	40	79,4	79,4	a

4	50	69,5	69,5	b
5	60	67,6	67,6	b

a,b, hay diferencia significativa entre las cantidades de metanol empleado. En el análisis de varianza realizado, muestra que el factor metanol es significativo.

Se realizó la prueba Tukey para el factor metanol en el proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel a partir de aceites domésticos residuales, observándose que estadística y experimentalmente hay diferencias significativas entre las cantidades de metanol evaluadas, indicando así que hay una mayor significancia a una cantidad de 40 mL de metanol con un rendimiento de 79,4%, el cual al comparar con las cantidades de 30 mL y 20 mL de metanol hay una menor diferencia significativa, obteniendo un rendimiento de 76,0% y 73,1% respectivamente; por otro lado las diferencias significativas que hay entre 40 mL de metanol con 50 mL y 60 mL son mayores, siendo el rendimiento para éstos 69,5% y 67,6% respectivamente, mencionándose que la reacción de conversión fue menor para éstas dos últimas cantidades.

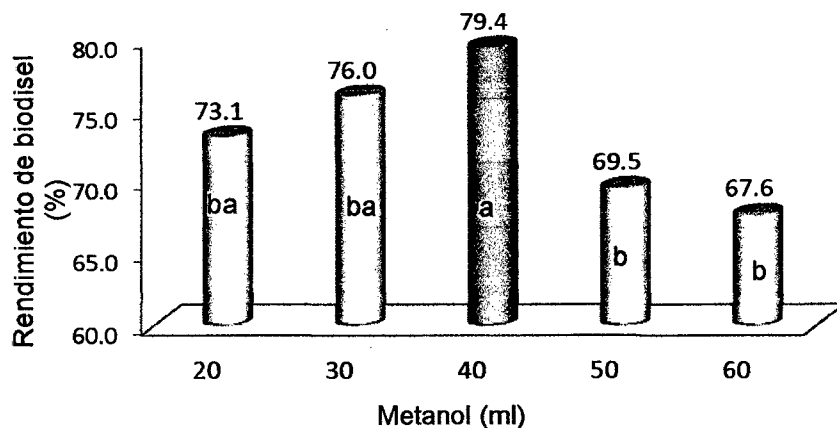


Figura 6. Influencia del factor metanol en el rendimiento de biodiesel

4.4. Interacción del factor temperatura y del factor metanol para obtener mayor rendimiento de biodiesel

Cuadro 9. Análisis de varianza del diseño factorial 3A x 5B completamente al azar.

FV	GL	SC	CM	F-valor
Metanol	4	822.09	205.52	4.89 *
Temperatura	2	174.02	87.01	2.07 N.S.
M x T	8	1836.40	229.55	5.47 **
Error	30	1259.90	42.00	
Total	44	4092.41	564.08	

CV: 8.9 %.

*: Significativo estadísticamente a un 95 % de probabilidad.

** : Altamente significativo a un 95 % de probabilidad.

N.S.: No significativo estadísticamente a un 95 % de probabilidad

Se desarrolló la prueba Tukey interaccionando la temperatura con el metanol, dando como resultado que estadísticamente la temperatura no es significativa (N.S) a un 95% de probabilidad, encontrándose por encima de 0,05 (indicando el riesgo aceptable de falla en la prueba Tukey), para el caso del metanol éste si es significativo con un 95 % de probabilidad, al estimar el grado de significancia en la interacción que hubo entre la temperatura y metanol, éste resultó altamente significativo a un 95 % de probabilidad.

Cuadro 10. Prueba TUKEY para la combinación del factor temperatura y metanol

Tratamiento	Vol. de aceite mL	Factores		Biodiesel puro (mL)	Promedio del rendimiento (%)	Orden de mérito	Significancia
		Temperatura (°C)	Metanol (mL)				
T1	100	45	20	75	75	8	ab
T2	100	45	30	78,5	78,5	5	ab
T3	100	45	40	81	81	2	a
T4	100	45	50	69	69	12	abc
T5	100	45	60	75	75	7	ab
T6	100	55	20	75,76	75,76	6	ab
T7	100	55	30	69	69	11	abc
T8	100	55	40	86	86	1	a
T9	100	55	50	79	79	4	ab
T10	100	55	60	54	54	15	c
T11	100	65	20	68,5	68,5	13	abc
T12	100	65	30	80,5	80,5	3	a
T13	100	65	40	71,27	71,27	10	abc
T14	100	65	50	60,5	60,5	14	bc
T15	100	65	60	73,87	73,87	9	ab

a,b,c; representan diferencias significativas. En el análisis de varianza nos muestra que la interacción o la combinación de los factores de temperatura y cantidad de metanol también resulto significativo por lo tanto se realizó una comparación de medias (prueba TUKEY), para saber cuál de las combinaciones resulto con mayor significancia

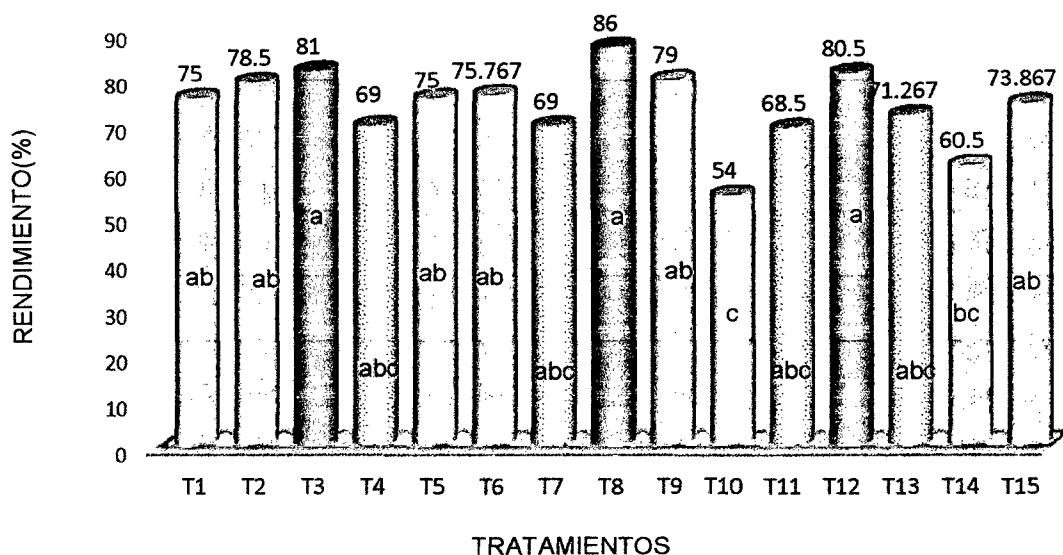


Figura 7. Interacción de la temperatura y metanol en el rendimiento de biodiesel

4.5. Pruebas de calidad al biodiesel obtenido a partir del aceite doméstico residual

Al biodiesel obtenido a partir de aceites domésticos residuales, se realizó análisis de pH, densidad y viscosidad a cada tratamiento con sus respectivas repeticiones para determinar si éstas se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la norma peruana y extranjera, obteniéndose los siguientes resultados:

Cuadro 11. Pruebas de calidad realizadas al biodiesel a partir del aceite doméstico residual

TRAT	BIODIESEL PURO (mL)	PROMEDIO DEL RENDIMIENTO (%)	DENSIDAD (g/cm ³)	pH	VISCOSIDAD (mm ² /s)
T1	75	75	0,866	7,005	4,05

T2	78,5	78,5	0,86	5,820	4,25
T3	81	81	0,86	5,875	3,75
T4	69	69	0,86	6,005	3,60
T5	75	75	0,86	6,493	3,75
T6	75,76	75,76	0,86	7,003	3,65
T7	69	69	0,86	6,535	3,80
T8	86	86	0,86	6,615	3,85
T9	79	79	0,86	7,155	3,90
T10	54	54	0,86	6,470	3,65
T11	68,5	68,5	0,86	6,465	3,60
T12	80,5	80,5	0,86	7,705	3,65
T13	71,26	71,26	0,86	6,088	3,60
T14	60,5	60,5	0,86	6,243	3,55
T15	73,867	73,867	0,86	6,960	3,80

Fuente: elaboración propia

V. DISCUSION

En la determinación de índice de acidez, MOTA, (2007) y otros autores, hacen referencia que el índice de acidez es la parte más importante del proceso y debe ser lo más exacto posible ya que de ello depende la cantidad de catalizador básico (hidróxido) que ha de utilizarse para el proceso de transesterificación. Así mismo, ZAPATA *et al.* (2007) menciona que los aceites crudos y los usados previamente en frituras, comúnmente tienen un contenido de ácidos grasos libres significativamente superior al 2%, en el caso de nuestra muestra en estudio el nivel de ácidos grasos libres fue menor al 2%, indicando que no presenta una alta cantidad de ácidos grasos libres y que no es necesario que el aceite pase un proceso de neutralización previo. En otras investigaciones realizadas como CESARE *et al.* (2009) determinó el índice de acidez para aceite de soya crudo un valor de 2,22 mg KOH/g aceite y para el refinado un valor de 0.16 mg KOH/g aceite, para aceite de palma crudo obtuvo un valor de 4,13 mg KOH/g aceite y para el refinado 0,27 mg KOH/g aceite; en el caso de CALLE *et al.* (2005), obtuvo un índice de acidez distinto para cada especie como: para el Aguaje siendo de 10 g NaOH/ L aceite, Umari 2,0 g NaOH/ L aceite, lempate 8 g NaOH/ L aceite, Sacha Inchi 6,0 g NaOH/ L aceite, Palmiste 6,5 g NaOH/ L aceite, Castaña 0,6 g NaOH/ L aceite, Girasol 1,7 g NaOH/ L aceite, Soya 1,3 g NaOH/ L aceite, Palma 5,0 g NaOH/ L aceite;

RECINOS *et al.* (2005) empleó 4g de NaOH como catalizador en 300 mL de aceite de soya usado. Por lo tanto, al realizar comparaciones de los resultados de ésta investigación con otras, se establece que el índice de acidez va a depender de la cantidad de ácidos grasos libres que se encuentran en el aceite a evaluar, en el caso de la muestra en estudio, como se mencionaba líneas arriba, éste presenta una baja cantidad de ácidos grasos libres y por ello el índice de acidez es menor en comparación a los resultados de las otras investigaciones.

De los resultados obtenidos con respecto a la temperatura óptima para obtener un mayor rendimiento de biodiesel, se puede apreciar en el cuadro 7, que estadísticamente no hay diferencia significativa a las temperaturas que fueron evaluadas (45°C, 55°C, 65°C); siendo así, que a una temperatura de 45°C hubo un rendimiento de 75,7%, de biodiesel, siendo el mayor de éstas en comparación a T° de 55°C que tuvo un rendimiento de 72,8% y por ultimo a una T° de 65°C con un rendimiento de 70,9% de biodiesel, siendo el más bajo. Muchas referencias de autores como TICKELL (2000), ZHANG *et al.* (2003), WHITMAN (2007) y CALLE *et al.* (2005) mencionan que para lograr una buena reacción en el proceso de transesterificación, se requiere temperaturas que oscilan entre 40 y 60 °C, como la presencia de un catalizador; CALLE *et al.* (2005) obtuvo rendimientos para distintas especies en el intervalo de 40-60°C, los cuales fueron por encima del 77% su rendimiento siendo del aceite de palma 87,2% y de soya 95,3%; CESARE *et al.* (2009) menciona que la temperatura que se empleó en el proceso de transesterificación para aceite crudo y refinado de soya y de palma fue de

60°C, obteniendo un rendimiento de 87,8% para aceite de soya crudo y para el refinado un rendimiento de 98,17%, para aceite de palma crudo obtuvo un rendimiento de 85,49 % y para el refinado un rendimiento de 96,8%; por lo tanto, cabe indicar que la temperatura es un factor importante en el proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel, coincidiendo así en esta investigación y en otras realizadas por diferentes profesionales, el cual los más altos rendimientos de biodiesel se obtiene en un rango de temperatura de 40-60°C.

En la determinación de la cantidad optima necesaria de metanol en el proceso de transesterificación para la obtención de biodiesel a partir de aceites domésticos residuales; en el cuadro 8 se observa que estadística y experimentalmente hay diferencias significativas entre las cantidades de metanol que fueron evaluadas, indicando así que hay un mayor rendimiento a una cantidad de 40 mL de metanol con un rendimiento de 79,4%, seguido por 30 mL y 20 mL (no presentaron diferencias significativas) con un rendimiento de 76,0% y 73,1% respectivamente, y por ultimo a 50 mL y 60 mL (no presentaron diferencias significativas) con un rendimiento de 69,5% y 67,6% respectivamente, mencionándose que la reacción de conversión fue menor para éstas dos últimas cantidades. Al realizar comparaciones con HERRERA (2008), en su investigación empleó una proporción de 30 mL de metanol para producir biodiesel a partir de aceite residual doméstico, en nuestra investigación ésta cantidad produjo un rendimiento de similar al de 40 mL de metanol, indicándose que también se pueden emplear estas cantidades para obtener mayores rendimientos; CESARE *et al.* (2009), empleó para el proceso

de transesterificación un 17-18 % de volumen de metanol; CALLE *et al.* (2005) de acuerdo al estudio que realizó, para el proceso de transesterificación empleó un 20% en volumen de metanol (95% de pureza) referente al volumen del aceite empleado, en este caso al comparar con los dos investigaciones mencionadas, se muestra que a esta cantidad los rendimientos se encuentran por debajo de la cantidad óptima de metanol, presentando estadísticamente una menor diferencia significativa a ello, así mismo se hace referencia que a 20mL y 30 mL de metanol no se encontraron diferencia significativa a estas dos volúmenes de metanol, mostrándose estadísticamente iguales, LAFONT (2011) reporto en su investigación que en las proporciones de 1:8 metanol/aceite se presenta un mayor rendimiento de reacción con un rendimiento de $92.046 \pm 0.641\%$ y en la proporción de 1:10 con un porcentaje de rendimiento del $91.310 \pm 0.712\%$ indicando que no justifica el mayor gasto de metanol, ya que se disminuye el rendimiento de la reacción, debido a que el exceso de metanol dificulta la separación del glicerol por decantación; podemos corroborar con lo mencionado por dicho autor, ya que en nuestra investigación también los resultados indican que a mayores cantidades de metanol (50 mL y 60 mL) va a disminuir el rendimiento de la reacción, como se visualiza en la figura 6, presentando estadísticamente una diferencia significativa mayor en relación a 40 mL de metanol, siendo el que obtuvo un mayor rendimiento.

Se realizó la prueba estadística Tukey a los 15 tratamientos para determinar la influencia que tiene el factor temperatura y cantidad metanol en el proceso de transesterificación para cada tratamiento, resultando así que hay estadísticamente diferencias significativas entre los tratamientos con respecto

al rendimiento de biodiesel. En la figura 7 se puede identificar las diferencias significativas que hay entre los tratamientos y sus rendimientos; el tratamiento 8 (temperatura 55 °C y metanol 40 mL) obtuvo un mayor rendimiento de 86 %, el tratamiento 3 (temperatura 45 °C y metanol 40 mL) un rendimiento de 81 % y por último el tratamiento 12 (temperatura 65 °C y metanol 30 mL) un rendimiento de 80,5 %, donde estos tres tratamientos (T8, T3, T12) no presentaron diferencias significativas indicando que estadísticamente son iguales y obtuvieron los porcentaje de rendimientos más altos; analizando y comparando con TICKELL (2000) y ZHANG *et al.* (2003) mencionan que para lograr la reacción de transesterificación se requieren temperaturas entre 40 y 60°C, así como la presencia de un catalizador, por ello visualizando las figuras 6 y figura 7, se determina que la cantidad de metanol necesario para obtener un alto rendimiento es de 40 mL, y con respecto a la temperatura en la figura 5, indica que estadísticamente son iguales, entonces se tendrá que tomar referencia de la figura 7, siendo el más óptimo a 55 °C corroborando así con lo mencionado por dicho autor. En el caso del tratamiento 1 (temperatura 45 °C y metanol 20 mL), tratamiento 2 (temperatura 45 °C y metanol 30 mL), tratamiento 5 (temperatura 45 °C y metanol 60 mL), tratamiento 6 (temperatura 55 °C y metanol 20 mL), tratamiento 9 (temperatura 55 °C y metanol 50 mL) y el tratamiento 15 (temperatura 65 °C y metanol 60 mL) nos indican que éstos tratamientos (T1, T2, T5, T6, T9, T15) estadísticamente son iguales, porque no presentaron diferencias significativas entre ellos; además, el tratamiento 4 (temperatura 45 °C y metanol 50 mL), el tratamiento 7 (temperatura 55 °C y metanol 30 mL), el tratamiento 11 (temperatura 65 °C y metanol 20 mL) y el

tratamiento 13 (temperatura 65 °C y metanol 40 mL) tampoco presentaron diferencias significativas entre ellos, siendo estadísticamente iguales (T4, T7, T11, T13). Así mismo, el tratamiento 10 (temperatura 55 °C y metanol 60 mL) y el tratamiento 14 (temperatura 65 °C y metanol 60 mL) son independientemente diferentes estadísticamente y obtuvieron los rendimientos de 54 % y 60,5 % respectivamente.

Al biodiesel obtenido a partir de aceites domésticos residuales, se realizó análisis de pH, densidad y viscosidad a cada tratamiento con sus respectivas repeticiones para determinar si éstas se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la norma peruana y extranjera, el cual al evaluar la densidad a las muestras en estudio, se obtuvo valores entre 0,86 y 0,87 g/cm³; indicando que todas las muestras se encuentran dentro de lo establecido por las distintas normas; para el caso de la viscosidad los resultados oscilaron entre 3,55 - 4,55 mm²/s, donde las muestras de biodiesel analizados están dentro del rango establecido por la norma Europea EN14214 (0.86 – 0.90 g/cm³), la norma Austrian Standard C1190 y la norma técnica peruana (NTP) (1,9 -6,0); CASTRO *et al.* (2007) mencionan que la viscosidad del biodiesel viene determinada por el aceite de origen, y por su contenido en mono, di y triglicéridos; una transesterificación completa es necesaria para asegurar el cumplimiento de este parámetro; un combustible muy viscoso puede causar una mala atomización, que lleva a mala combustión y formación de depósitos, la alta viscosidad también puede facilitar la contaminación del combustible con el aceite lubricante.

VI. CONCLUSIONES

1. El índice de acidez del aceite doméstico residual en promedio es 0,3976 mg de NaOH/g de aceite.
2. Evaluando independientemente, la temperatura óptima necesario para obtener un mayor rendimiento en la obtención de biodiesel a partir de aceite doméstico residual se encuentra en el rango de 45 - 65 °C, siendo estadísticamente iguales; y la cantidad óptima de metanol para obtener un mayor rendimiento (79,4 %) en la obtención de biodiesel es de 40 ml.
3. El porcentaje de rendimiento más alto en la producción de biodiesel fue del 86%, correspondiente al tratamiento 8, que fue evaluado a una temperatura de 55 °C y a una cantidad de metanol de 40 ml.
4. Al biodiesel obtenido se realizaron tres pruebas de calidad, encontrándose así dentro de los parámetros establecidos por la norma Europea EN14214, la norma Austrian Standard C1190 y la norma técnica peruana (NTP), ajustándose a este rango todos los tratamientos.

VII. RECOMENDACIONES

1. Se debe evitar el contacto de piel, ojos y mucosas, con los reactivos y productos presentes en la reacción tanto del hidróxido de sodio, metanol y glicerina, ya que son irritantes.
2. Tomar en cuenta que el hidróxido de sodio en intemperie absorbe humedad y el metanol se volatiliza, por ello el manejo de estos insumos básicos se debe realizar muy meticulosamente.
3. Se debe promover cada vez más el uso de energías renovables, en este caso el biodiesel a partir de aceites domésticos residuales, el cual es viable desde distinto punto de vista; así mismo, se le da un valor agregado y se minimiza el grado de contaminación tanto del agua y del aire, mejorando nuestra calidad de vida y estando en armonía con la naturaleza.
4. Evaluar las características de la glicerina, subproducto del proceso de transesterificación, la cual tras su purificación puede ser utilizada en múltiples procesos, en la industria farmacéutica en la elaboración de medicamentos en forma de jarabes o como excipiente y en cosmética en la elaboración de jabones de tocador.

VIII. ABSTRACT

The present research was conducted in the laboratory of photochemistry of Renewable Natural Resources Faculty of the National Agrarian University of the jungle, having as a objective at the production of biodiesel from waste cooking oil; the raw material was collected from various sources such as: restaurants, dining hall, poultry, etc., thus performing respective pretreatment, subsequently determined the acid index resulting in 0.3976 mg of NaOH/g of oil, it was applied the equation established by TIKELL (2002), to determine the amount of catalyst needed for the reaction, this being 0.3861 g of NaOH per 100 mL of domestic residual oil. Then we assessed it being used amounts of methanol (20 mL, 30 mL, 40 mL, 50 mL or 60 mL) at different temperatures (45 °C, 55 °C and 65 °C) for each sample of 100 ml of cooking oil remaining. Later, there was a process called transesterification reaction for each treatment, where methanol reacted in a catalyzed environment (NaOH) with the oil at a constant temperature and for a time of two hours thereby obtaining biodiesel, then move a washing process and drying. The data from each sample was applied completely randomized factorial design (3A X 5B) for methanol and temperature factors, making a total of 15 treatments, the results of the analysis of variance were corroborated by the Tukey test. From the results it can be deduced that the optimum temperature for performance of

biodiesel is within a range of 45 °C to 65 °C, because there is a not statistically significant difference between them, the optimum amount of methanol required is 40 mL, which yielded of 79.4%. Likewise, the treatment from which was obtained most efficient combination between temperature and methanol factors to obtain a higher yield-treatment is marked with number 8, the same was evaluated at a temperature of 55 °C and 40 mL of methanol, getting a yield of 86%. Finally, it should be noted that all treatments were quality, tested such as pH, density and viscosity, besides of comparing the gotten results with the technical specifications laid down in national and international standards for biofuels; thus allowing us to obtain a biofuel with physicochemical properties within the standards and parameters required by the law in force.

IX. BIBLIOGRAFIA

- AVELAR C. 2008. Estudio de evaluación y diseño para la implementación de un laboratorio de calidad especializado en biodiesel. Tesis Ing. Químico. Antiguo Cuscatlan, El Salvador. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".178 p.
- ARIAS C. 2012. Obtención de biodiesel a partir de aceites comestibles vegetales usados (ACVUs), como una alternativa para el reciclaje de material de desecho altamente contaminante para el medioambiente. Tesis Ing. Bioquímico. Ambato, Ecuador. Universidad Técnica de Ambato. 109 p.
- BARRIGA, A. 2011. Diseño del módulo de transesterificación de una planta piloto para producción de biodiesel a partir de aceites usados de cocina. Tesis Ing. Mecánico. Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú.112 p.
- BUSTILLO, M. D., BARRIGA, F. y PEREDA, J. 2003. Producción de biodiesel a partir de residuos de industrias agroalimentarias. Revista Alimentación Equipos y Tecnología. Lima, Perú. 22(175): 83-90.

- CALERO, W., CHICAIZA, E., CHICAIZA, W., VIZUETE, D. 2007. Síntesis y refinación de biodiesel y glicerina obtenidos a partir de grasa vegetal. [En línea] Universidad Central de Ecuador Facultad de Ciencias Químicas. (<http://www.monografias.com/trabajos-pdf/sintesis-refinacion-biodiesel/sintesis-refinacion-biodiesel.pdf>, 28 de julio de 2012).
- CALLE, J., COELLO, J., CASTRO, P., 2005. Opciones para la producción de biodiesel en el Perú. Lima, Perú. 8 p.
- CANAKCI, M., VAN GERPEN, J. 2001. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. American Society of Agricultural Engineers. Vol. 44(6). U.S.A. 44(6): 1429-36.
- CASTRO, P., COELLO, J., CASTILLO, L. 2007. Opciones para la producción y uso del biodiesel en Perú. Soluciones Prácticas-ITDG. Lima, Perú. 173 p
- CASTRO, P., SEVILLA, S., COELLO, J. 2008. Estudio sobre la situación de los biocombustibles en el Perú. Lima, Perú. 68 p.
- CLARIMÓN, L., FERNÁNDEZ, C. SÁNCHEZ, B., 2005. Informe sobre el empleo de combustibles renovables biodiesel. Aragón, España. 28 p.
- CESARE, M., CASTILLO, L., BETETA, V., CALLE J. LEON, J. 2009. Evaluación de la purificación de biodiésel en la etapa final de producción. Lima, Perú. 9 p.
- CIRIA, J. IGNACIO. 2004. Propiedades y características de diésel y biodiésel. [En línea](<http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>, 25 de julio del 2012)

- HERRERA R. 2008. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiesel). Tesis tecnólogo Químico. Universidad Tecnológica de Pereira. 91 P.
- LAFONT J. 2011. Análisis químico de mezclas biodiesel de aceite de cocina usado y diésel por espectroscopia infrarroja. Tesis Ing. Químico. Argentina. Universidad de Córdoba. 8 p.
- MITTELBAACH M. 1996. Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: Specifications and quality control of biodiesel. Bioresource Technology. vol 56: 7-11.
- MOTA, D. 2007. Evaluación del método base – base con etanol para la obtención de biodiésel a partir de aceite oxidado de piñón (*Jatropha curcas* L.) A nivel laboratorio. Tesis Ing. Químico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. 113 p.
- OCROSPOMA D. 2008. Situación y perspectivas de los biocombustibles en el Perú. 1 ed. Lima Perú. 79 p.
- PCM. 2007. Reglamento para la comercialización de biocombustibles. D.S. N° 021-2007-EM. Lima, Perú. 10 p.
- RAFAEL, ANA C. Tecnia. Product Technical data. [En línea] (http://www.tecnia.net/products_solutions/biofuels/biodiesel/docs/TECNIA_Process4DIESEL_BiodieselSpecificationsStandards.pdf, 13 de agosto del 2012).
- RECINOS, G., RODRIGUEZ, A., HERNANDEZ, C., YEOMANS, J. 2005. Meto-

dología para la fabricación de biodiesel a partir del aceite de palma africana (*Elais guineensis*) y aceite de soya usado. Las Mercedes de Guacimo, Limo, Costa Rica. Universidad EARTH. 9 p.

ROBALINO C. 2009. Elaboración de un Manual de Operación de un Reactor Experimental de Transesterificación para la obtención de biodiesel proveniente de Aceite Vegetal". Tesis Ing. Mecánico. Guayaquil, Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

TICKELL, J. 2000. From the fryer to the fuel tank: the complete guide to using vegetable oil as an alternative fuel. 3rd ed. Covington (USA): Tickell Energy Consultants. Covington, U.S.A.

VELASCO M. et al. 2011. OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE QUEMADO DE COCINA POR EL MÉTODO ÁCIDO-BASE. Tesis Ing. Ambiental. México. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 12 p.

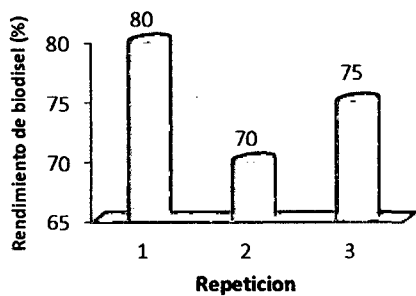
ZAPATA, C., MARTINES, I., ARENAS, E., ENERO, C. 2007. Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: segunda evaluación económica [En línea]: Medellín, Colombia http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0012-73532007000100009&script=sci_arttext,journals, 14 de junio del 2012).

ZHANG, Y.; DUBÉ, M.A.; MCLEAN, D.D.; KATES, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. En: Bioresource Technology. Vol. 89: 1-16

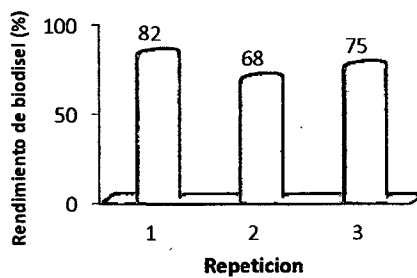
X. ANEXO

Anexo A. Volumen de biodiesel obtenido por cada tratamiento y repetición

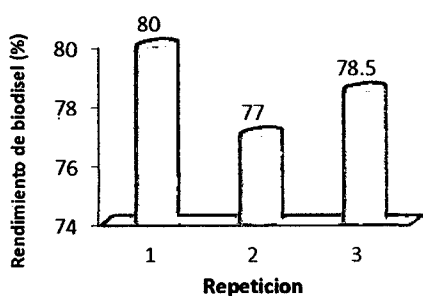
TRATAMIENTO N° 1



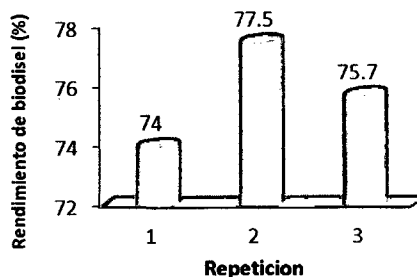
TRATAMIENTO N° 5



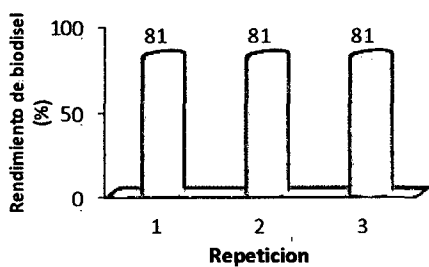
TRATAMIENTO N° 2



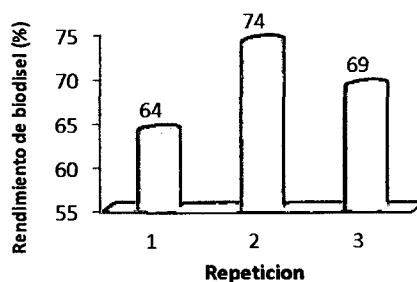
TRATAMIENTO N° 6



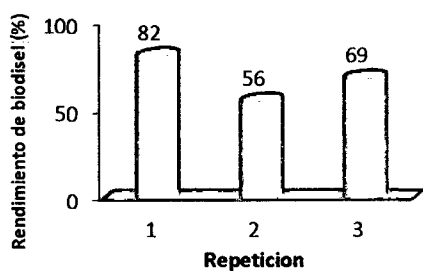
TRATAMIENTO N° 3



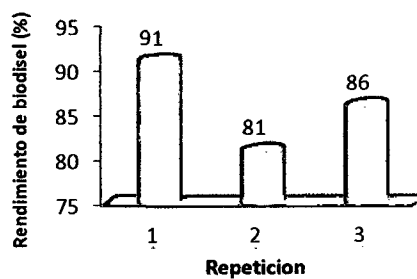
TRATAMIENTO N° 7



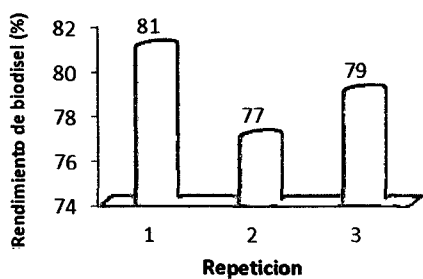
TRATAMIENTO N° 4



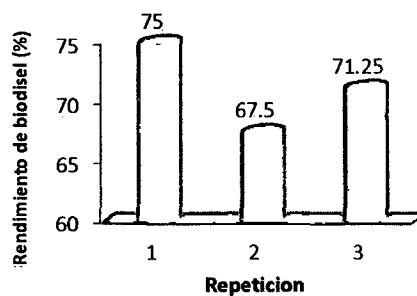
TRATAMIENTO N° 8



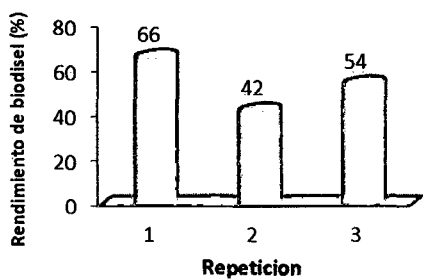
TRATAMIENTO N° 9



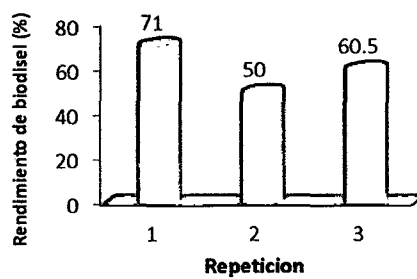
TRATAMIENTO N° 13



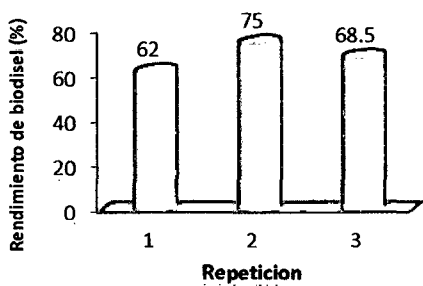
TRATAMIENTO N° 10



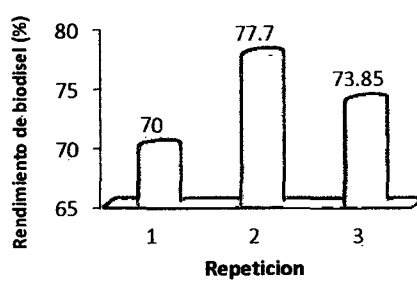
TRATAMIENTO N° 14



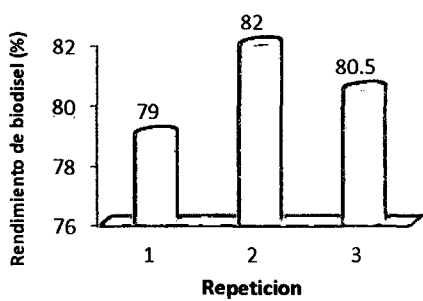
TRATAMIENTO N° 11



TRATAMIENTO N° 15



TRATAMIENTO N° 12



Anexo B . Proceso de elaboración y obtención de biodiesel



Figura 1. Filtrado del aceite doméstico residual

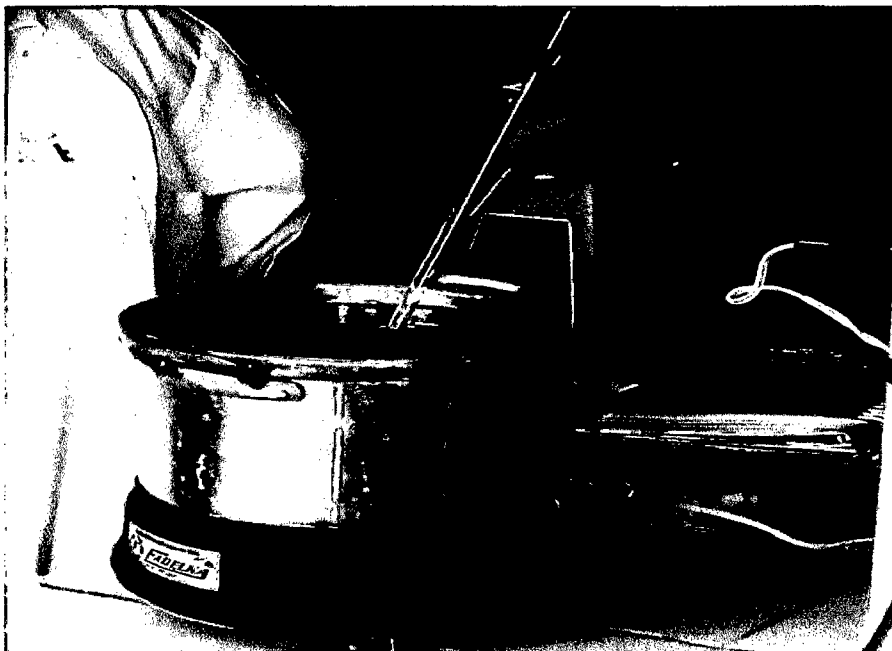


Figura 2. Secado el aceite

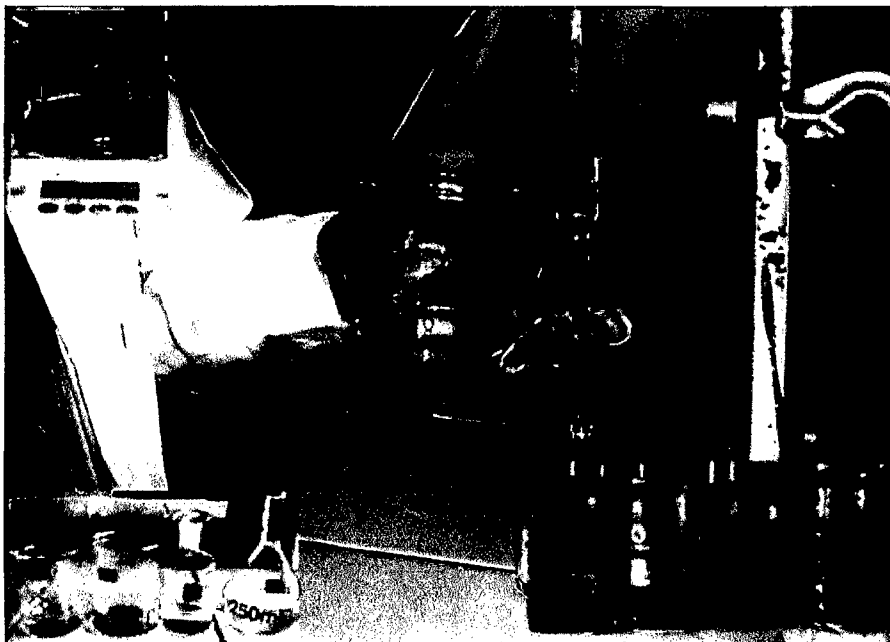


Figura 3. Determinación del índice de acidez



Figura 4. Preparación del metóxido de sodio con relación a cada tratamiento

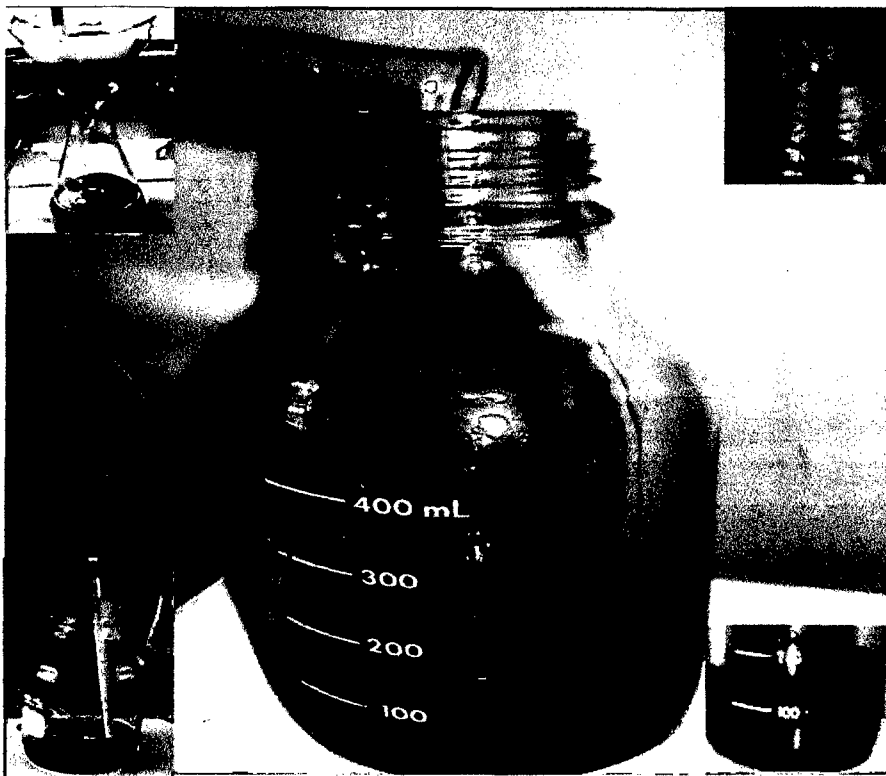


Figura 5. Incremento del metóxido de sodio al aceite que está a 55°C

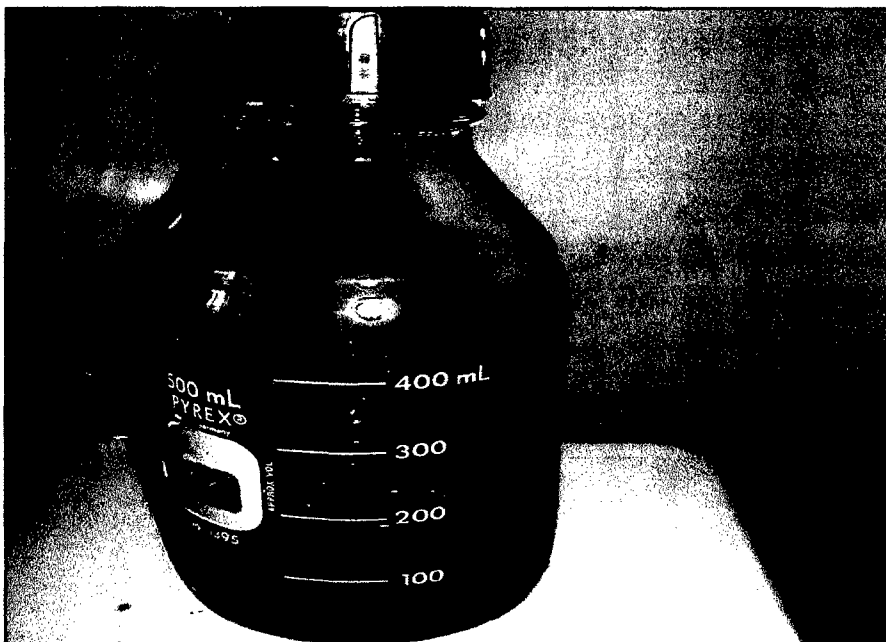


Figura 6. Proceso de transesterificación de ácidos grasos del aceite doméstico residual con una temperatura y cantidad de metóxido de sodio de acuerdo a cada tratamiento.

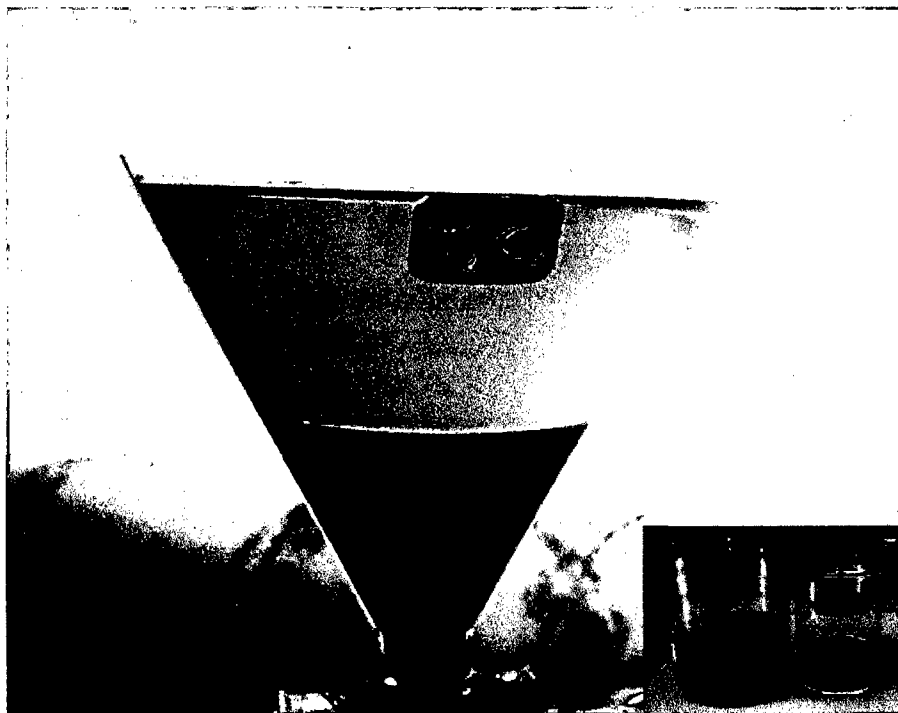


Figura 7. Separación de las dos fases (biodiesel y glicerina).

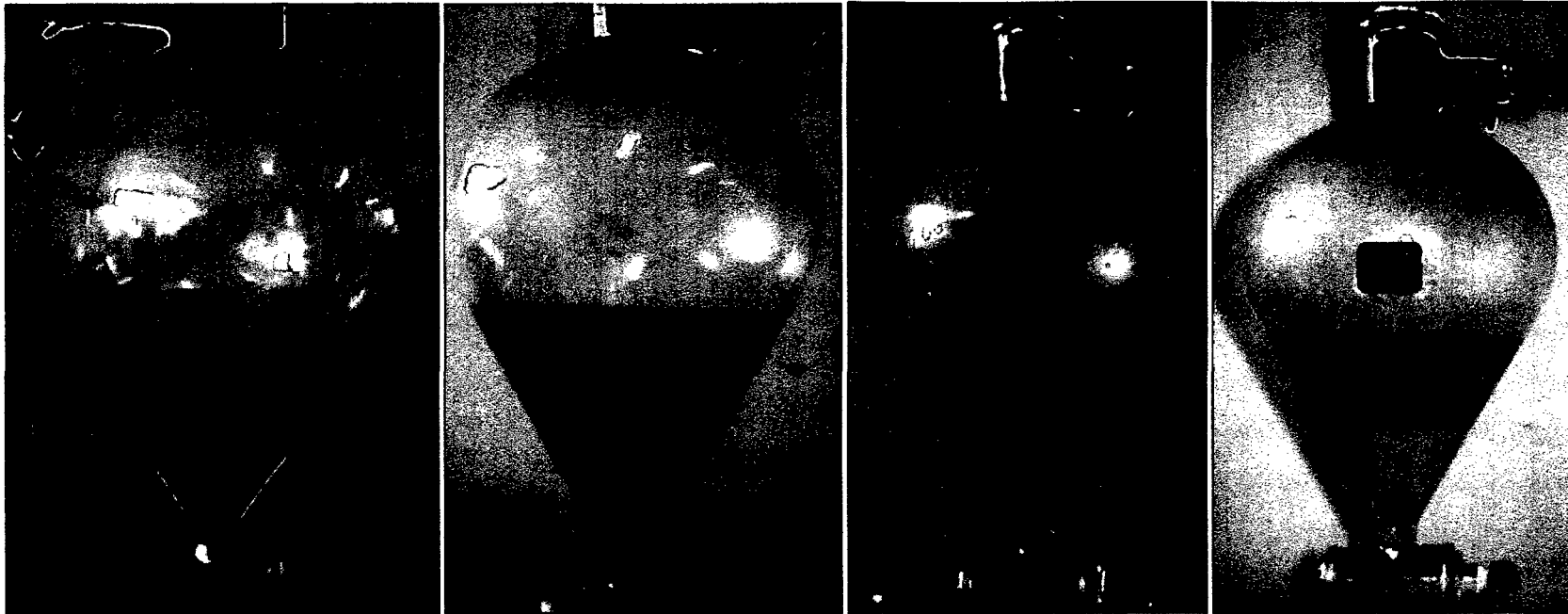


Figura 8. Obtención de biodiesel con sus respectivos lavados, correspondiente al tratamiento 8 ($T=55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C=40\text{ml}$), que presento mayor rendimiento.



Figura 9. Proceso de secado del biodiesel obtenido a una temperatura aproximada de 48 °C, hasta la evaporación total del agua restante.

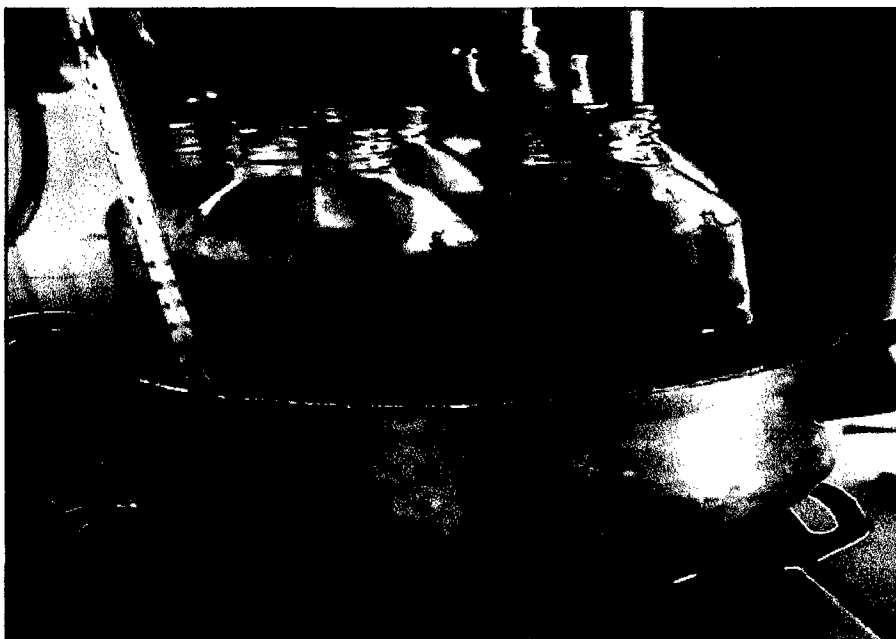


Figura 10. Proceso de secado del biodiesel obtenido a una temperatura aproximada de 48 °C, hasta la evaporación total del agua restante.



Figura 11. Muestras de biodiesel puro y seco, por cada tratamiento y repetición

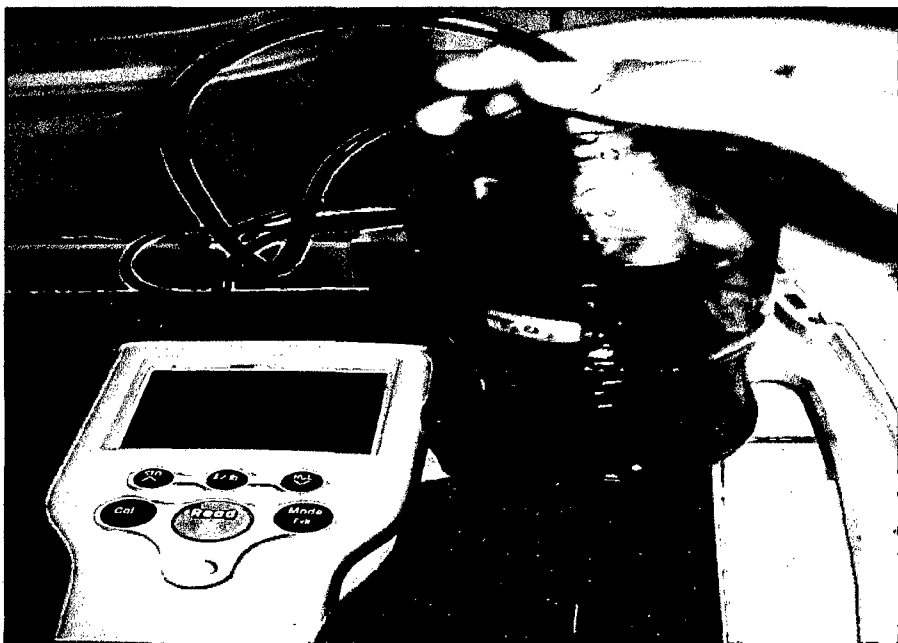


Figura 12. Determinación del pH al biodiesel puro.

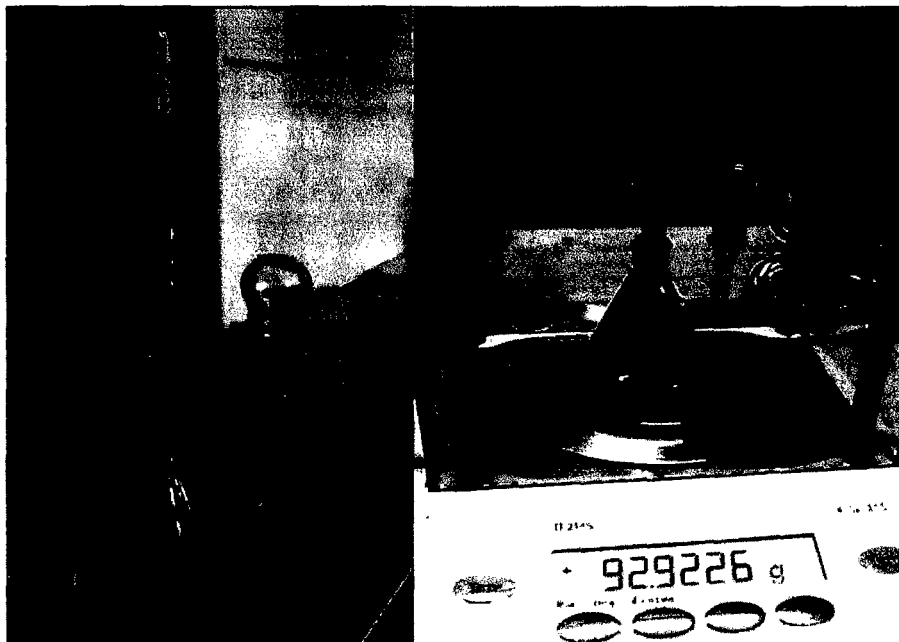


Figura 13. Determinación de la densidad del-biodiesel puro

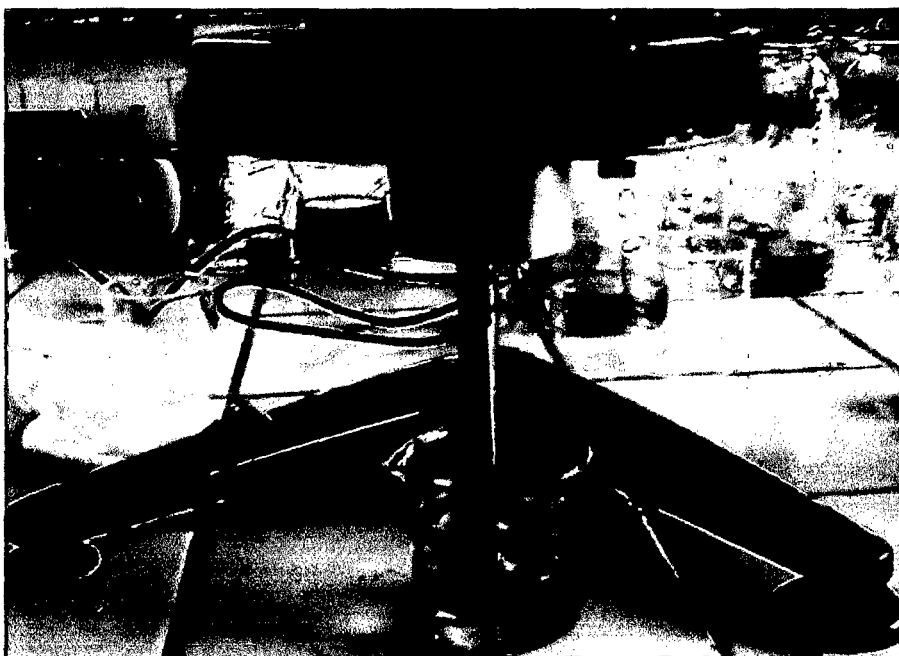


Figura 11. Determinación de la viscosidad del biodiesel puro.