



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Producción de biodiésel y análisis de costos usando aceite de cocina

Biodiesel production and cost analysis using cooking oil

Riojas-González, H.H.^{a*}, Guerra-Bautista, R.^a, Ruiz H.A.^b, Rodríguez-Jasso, R.M.^b

^a Maestría en Energías Renovables, Universidad Politécnica de Victoria, Cd Victoria, Tamaulipas, México.

^b Grupo de Biorrefinería, Departamento de Investigación en Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, 25280, Saltillo, Coahuila, México.

hriojasg@upv.edu.mx*; 1819004@upv.edu.mx; rrodriguezjasso@uadec.edu.mx; hector_ruiz_leza@uadec.edu.mx

Innovación tecnológica: Producción de biocombustible líquido (biodiésel) a partir de materiales económicos y simples, con la proyección de utilizado como una fuente de negocio rural o familiar en el mercado y contexto mexicano.

Área de aplicación industrial: Proyección a nivel laboratorio para un escalamiento piloto o industrial considerando factores del biocombustible como las emisiones y el costo de producción.

Recibido: 28 julio 2021

Aceptado: 17 agosto 2022

Abstract

Biofuels are taking center stage in the energy scenario because they are renewable, being one of them biodiesel, can be obtained in several ways, among them is the process of transesterification of fatty acids which is a very representative technique due to its ease and practicality, the method used was generated with a constant agitation in a certain time, which turns out to be ideal for obtaining biodiesel from used cooking oil, the results in obtaining biodiesel were applied in an oil lamp, achieving a greater flash point (148 °C) than diesel (71 °C) greater practicality and lower soot concentration (216, 215 and 220 RGB), compared to conventional diesel (65, 64, 59 RGB), a cost analysis was carried out and it was concluded that a low-cost biofuel can be obtained due to the reduction of raw material costs, the latter being the greatest obstacle to the commercialization of biofuel, so it is claimed that a clean biofuel can be generated and that it is simple to produce and efficient in various applications.

Keywords: biofuels, used cooking oil, transesterification, soot.

Resumen

Los biocombustibles están tomando protagonismo en el escenario energético debido a que son renovables, siendo uno de ellos el biodiésel, se puede obtener de varias formas, entre ellas está el proceso de transesterificación de ácidos grasos el cual es una técnica muy representativa debido a su facilidad y practicidad, el método empleado fue generado con una agitación constante en un tiempo determinado, lo cual resulta ser idóneo para la obtención del biodiésel a partir del aceite usado de cocina, los resultados en la obtención del biodiésel fueron aplicados en una lámpara de aceite, logrando un mayor punto de inflamación (148 °C) que el diésel (71 °C), mayor practicidad y menor concentración de hollín (216, 215 y 220 de RGB) comparándolo con el diésel convencional (65, 64, 59 de RGB), se realizó un análisis de costos y se llegó a la conclusión que se puede obtener un biocombustible de bajo costo debido a la reducción del gasto de la materia prima, siendo esta última el mayor obstáculo para la comercialización del biocombustible, por lo que se afirma que se puede generar un biocombustible limpio, simple en su elaboración y eficiente en diversas aplicaciones.

Palabras clave: biocombustibles, aceite usado de cocina, transesterificación, hollín.

1. Introducción

Por muchos años los combustibles fósiles han sido las principales fuentes de energía en el mundo [1], los biocombustibles tienen la gran virtud de ser renovables y pueden llegar a ser los sustitutos de los combustibles fósiles [2]. De los biocombustibles, el biodiésel también llamado éster metílico de ácidos grasos [3], se puede obtener de cuatro materias primas; a) aceite vegetal comestible, b) aceite vegetal no comestible, c) aceite de reciclaje y desecho y d) grasas de animales [4]. Los Estados Unidos de América (EE. UU.), China, Japón, India y miembros de la Unión Europea consumen más de la mitad del aceite vegetal mundial, como consecuencia sus residuos son los más altos del mundo [5]. En el año 2016, la Unión Europea generó aproximadamente 1,660,000 ton/año del aceite de cocina usado total, con 854,000 ton/año en hogar y 806,000 ton/año en sector comercial. En Japón, la producción del aceite de cocina usado oscila entre 0.1 y 0.5 millones de toneladas/año [5]. Pero destaca China, la producción anual de aceite de cocina usado se estima en 5 millones de toneladas [6]. El gobierno de China ha ofrecido a los recicladores diversas subvenciones para fomentar la recogida y

gestión de residuos aceites y hacer retroceder el reciclaje ilegal del aceite de cocina usado [7]. Este producto de desecho puede servir como materia prima para la elaboración del biodiesel, logrando con esto, que el costo para su producción se reduzca y también se pueda disminuir el problema de su disposición [8]. La elección de la materia prima es muy importante para producir el biodiésel ya que está asociado a 2/3 del costo total de producción [9], para la producción del biodiesel, el costo de la materia prima representa el 75% del costo total de producción, el resto de la producción lo representa la purificación y el proceso de producción [10-13] de acuerdo con Xing y col. (2010) [14] determinaron que el costo de producción de materia prima y el costo de compra alcanza aproximadamente el 76-82% y 14-21% respectivamente del costo total. Comparándolo con el diésel puro, el costo del combustible biodiésel es superior al 35%. En otro estudio presentado por Zaman (2016) [15], explicó que más de 1.4 millones de toneladas de residuos se generan por año y que estos residuos siguen aumentando, de los cuales solo el 15% se reciclan y la mayoría del desperdicio global se sigue dejando en los

vertederos, por lo que la selección adecuada de la materia prima se convierte en algo muy importante para reducir el costo de producción, por ejemplo, está el caso del precio del aceite de cocina usado que es 2 a 3 veces más bajo que el de los aceites vegetales puros [16]. El costo de la producción del biodiésel podría reducirse mediante el desarrollo de una nueva tecnología o bien en encontrar formas alternativas para utilizar subproductos [4]. La producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado puede reducir significativamente el costo de la producción del biodiésel [17]. El objetivo de este estudio es analizar el proceso de transesterificación del biodiésel obtenido del aceite usado a partir del costo y de las emisiones que estos generan al aplicarlo en una lámpara de aceite. La obtención del biodiésel genera muchas ventajas sobre el petro-diésel incluyendo: alta lubricidad, disponibilidad, bajo contenido de azufre, bajo contenido de compuestos aromáticos y es ecológico [11,18]. El biodiésel tiene la facilidad de usarse como combustible puro o puede mezclarse con diésel en cualquier proporción [19] además de esto, el biodiésel se puede obtener de diversas maneras siendo la transesterificación una de las más representativas [20], en el estudio se aplicó el proceso de transesterificación, el cual tiene como hipótesis que la obtención del biodiésel a través del aceite de cocina usado es viable a escala de negocio rural o familiar. La parte innovadora de este estudio es la propuesta de

hacer biodiésel de la manera más fácil como para que pueda ser detonante en microempresas o en zonas marginales. Para lograr buenos resultados, se realizó en cuatro diferentes mezclas de biodiésel en las cuales se emplearon pruebas de ignición y análisis de generación de emisiones del hollín aplicado en una lámpara de aceite, esas pruebas se compararon con el diésel bajo las mismas condiciones, mediante el programa de reconocimiento de tonos en RGB (Red, Green & Blue).

2. Materiales y Equipos

Se adquirió un botellón de 20 L de aceite vegetal usado de un restaurante de comida rápida, se decidió este aceite por estar en muy altas temperaturas en tiempos prolongados para freír alimentos, además se adquirió metanol de la marca Meth al 99.8% (costo \$49.50 por L) (y por último hidróxido de sodio de la marca Fagalab (\$62.6 por 100 g), los costos son en moneda nacional (MXN). Por el volumen de las muestras requeridas para el proyecto, se optó por la elaboración de un decantador prototipo con capacidad de 2 L. El proceso que se utilizó en la obtención del biodiésel fue la transesterificación que es una reacción de equilibrio, normalmente iniciada por la mezcla de reactivos en presencia de un catalizador para generar ésteres y glicerol [21], los materiales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales para la elaboración de biodiesel.

Materiales	Características
Aceite vegetal	Reciclado de cocina
Metanol	Al 99.8%
Hidróxido de sodio	Sosa cáustica de alta pureza
Agua	De grifo (potable)
Vaso de precipitado	de 500 mL
Matraz	de 1000 mL
Embudo	De plástico
Balanza digital	Cap. 600g con precisión de 0.01 g
Tela de algodón	Para filtrado
Recipiente reciclado	De 2.5 L para mezcla
Decantador prototipo	Con capacidad de 2 L

Para la determinación del punto de inflamación (°C) se empleó la norma ASTM D 93, con un equipo normalizado que da una tolerancia de precisión del $\pm 0,1$. En el análisis de las propiedades del biodiesel se realizó una titulación potenciométrica (KEM, serie AT-710), un picnómetro 25 mL (marca jf LHABO, modelo PIC25) y un viscosímetro (capacidad 44 mm, marca BAOSHISHAN), las determinaciones se realizaron en una prueba, de acuerdo a las normas que se presentan en la Tabla 3.

Métodos Experimentales

El diseño experimental contempló algunas variables, las cuales se identifican a través de una clasificación de dependientes e independientes según corresponda: variable dependiente (separación de fases) y variables independientes (cantidad de hidróxido de sodio, cantidad de metanol, calidad de pureza). Las variables independientes tendrán las siguientes características; porcentaje del hidróxido de sodio (en dos concentraciones 3 y 6 g) y dosis del metanol (de 125 y 200 mL), con un grado de pureza del bioaceite (sin lavar o con lavar).

Debido a que se tiene un factor con niveles diferentes de variables de respuesta, se decidió realizar un diseño factorial mixto, por tanto, la factorial será de 2×1 , lo que significa que se aplica con dos niveles en todas las pruebas, dando así un total de 4 combinaciones totales para este procedimiento. Para la mayoría de los casos experimentales la confiabilidad manejada es del 95% [22], por tanto, para la determinación del número de réplicas necesarias para alcanzar este valor de confiabilidad se utiliza la ecuación 1:

$$n = \frac{2(t_{(\frac{\alpha}{2}, N-k)})^2}{d_T^2} \sigma^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

$t_{(\frac{\alpha}{2}, N-k)}$ es el punto crítico de la distribución

T-student, α es el valor de significancia.

$N = k \times n_0$, k es el número de procedimientos a realizar y n_0 un número de réplicas que se asume de acuerdo a los siguientes aspectos: implementos utilizados, calidad de materias primas, si se espera una pequeña brecha en los resultados de los tratamientos se deberá tener en consideración una mayor cantidad de réplicas y viceversa, si la variación es muy grande entre procedimientos debido a las fuentes no controladas, como sistemas de medición, calidad de materiales (porcentaje de pureza de compuestos químicos utilizados), entre otros, se deberá tener un mayor número de réplicas.

σ es la desviación estándar del error aleatorio, la cual se asume debido a factores no controlados como error en tiempos de medición, etc.

d_T la magnitud máxima de diferencia entre procedimientos.

$\alpha = 1 - \text{Confiabilidad}$

Por tanto, se asume $n_0 = 4$, además se establece que $d_T = 30$, y $\sigma = 20$ para una confiabilidad del 95% [22], también $k = 3$ y $\alpha = 0.05$. Por tanto, el número de réplicas que se debe usar es 2. Así, tenemos un número total de experimentos de 4 procedimientos con 2 réplicas.

Para la elaboración del de biodiesel (Figura 1), se realizaron los siguientes pasos:

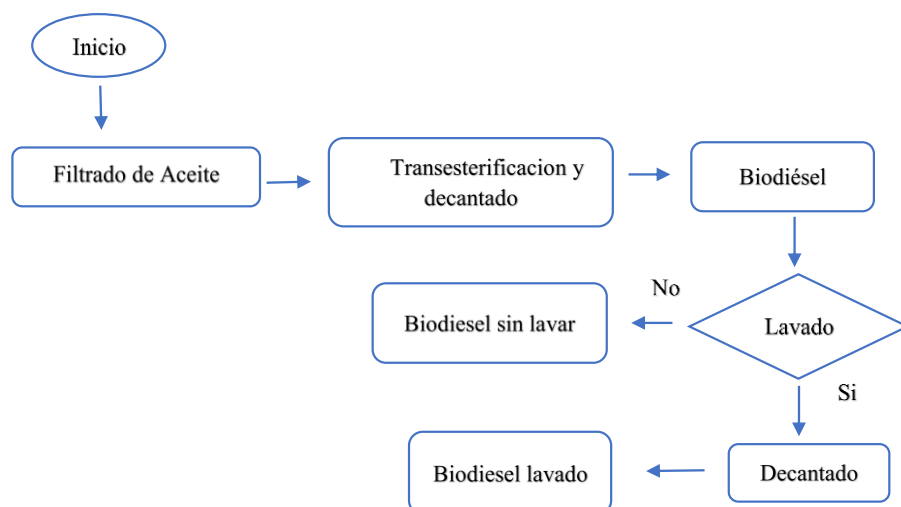


Figura 1. Proceso de elaboración de biodiesel.

Paso 1.- Filtrado de impurezas: Se realiza el filtrado de un litro de aceite vegetal reciclado con el fin de separar la mayor cantidad de impurezas. Este proceso se lleva a cabo utilizando un embudo y un filtro de tela de algodón con fibras muy unidas entre sí para lograr atrapar la mayor cantidad de contaminantes sólidos como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Filtrado del aceite reciclado.

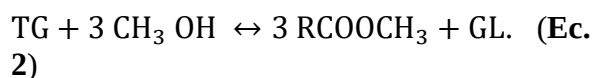
Paso 2.- Descripción del muestreo: El muestreo del experimento fue aleatorio simple y las pruebas realizadas se presentan en la Tabla 2, en el experimento se realizaron cuatro diferentes mezclas: aceite usado con 3 y 6 g de hidróxido de sodio, ya sea crudo o purificado.

Tabla 2. Pruebas del muestreo.

Aceite con o sin lavar	Hidróxido de sodio (g)	Metanol (mL)
Sin lavar (crudo)	6.0	200
Sin lavar (crudo)	3.0	125
Con lavar (purificado)	6.0	200
Con lavar (purificado)	3.0	125

Paso 3.- Dilución de la mezcla, se diluye el hidróxido de sodio con el metanol (Tabla 2) el producto resultante es el metóxido de sodio.

Paso 4.- Transesterificación: Después de ser filtrado el aceite usado de cocina, será transesterificado, por catálisis homogénea básica, empleando metóxido de sodio como catalizador. Para su reacción se realizó a 40 °C (temperatura ambiente del lugar donde se realizó el experimento), con una agitación mecánica, por 11 horas, la reacción que se genera se presenta en la ecuación 2:



Paso 5.- Separación de fases: se vierte la mezcla obtenida del paso anterior en un decantador de 2 L durante 8 h, con el fin que reaccione con la separación de fases, esta reacciona en dos partes: la fase acuosa (glicerina y otros compuestos) y fase orgánica (biodiésel) tal como se puede observar en la Figura 3.



Figura 3. En el decantador prototipo se observa el biodiésel en la parte superior y glicerina en la inferior.

Paso 6.- Decantación y lavado: Una vez que se separa la mezcla de biodiésel de la glicerina, se procede a un proceso de pureza (lavado) que consiste en verter agua potable directamente sobre el biodiésel y dejarlo reposar por una hora con la finalidad de que se genere un arrastre de jabones que existen en el biodiesel.

Paso 7.- Separación de los jabones: debido a que se forman jabones por la presencia de hidróxido de sodio, es momento de retirarlo (los jabones) del biodiésel para que este tenga una mayor pureza, así como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Separación del agua jabonosa del biodiésel lavado.

Paso 8.- Deposito del biodiesel: Finalmente se extrae el biodiésel del decantador para su correcto almacenaje en un depósito hermético a temperatura ambiente. Del biodiesel obtenido se le realizaron unas mediciones para determinar las propiedades físico-químicas, de acuerdo a la metodología propuesta por García-Muentes y col. (2018) [23] y se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Normas para la determinación de las propiedades del biodiesel.

N°	Propiedades	Unidades	Método estándar	Precisión	Técnica
1	Acidez total	mg/g	ASTM D 664 y EN 14111	±0,001	Valoración ácido-base
2	Densidad a 18 °C	g/mL	ASTM D127	±0,1	Picnometría
3	Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	ASTM 445	±0.01	Viscosimetría

Pruebas de emisiones

En el análisis de emisiones que fueron generadas con el uso del biodiésel elaborado y su comparación con el diésel fósil, este biodiésel fue aplicado en una lámpara de gas o quinqué con el fin de observar la diferencia entre la cantidad de emisiones de hollín de ambos combustibles. Para el análisis se requirió de papel de algodón blanco (nuevo) para la medición del experimento, la colocación de este algodón fue un punto importante para su medición, se tuvo que colocar en la parte superior de la lámpara en forma de arco, para de esta manera evitará sofocar la flama y poder tomar una muestra representativa de los gases de escape de la combustión, logrando con esto un espacio suficiente para la circulación del aire (importante para la combustión) obteniendo con esto una flama más fuerte y estable. En el experimento de la medición de las emisiones se empleó un 1L de cada combustible, cada prueba realizada tuvo su tiempo de duración de 5 minutos, se realizó por duplicado el número de muestras, la muestra de algodón obtenida del experimento obtuvo una representación de partículas de hollín generadas durante el proceso de combustión, los cuales fueron sometidas al análisis por código RGB.

Comparación de emisiones mediante tonos en código RGB

El código RGB tiene la función de poder detectar los diferentes tonos por pixel y representarlos, este código identifica cada tono mediante la combinación de tres colores, el rojo, el verde y el azul, colores primarios que al combinarse en diferentes proporciones medibles hacen un tono que se le representa

mediante un código. Para el método de análisis de muestras de hollín se realizó el procedimiento experimental midiendo la cantidad de hollín mediante tonos de colores RGB, se puede considerar que es un procedimiento factible, pues las partículas de hollín tienen un color oscuro en contraste con las muestras de algodón que se utilizaron para captarlo, el papel de algodón blanco que se utilizó durante el proceso de combustión (con biodiésel y diésel) se digitalizó en imagen (con escáner y cámara digital) en una misma condición de luz y distancia con el fin de capturar lo mejor posible sus tonos. Una vez concluida la prueba de combustión de todas las muestras, se compararon mediante el uso de la aplicación Colorzilla versión 2022 (se puede descargar de la Web Store de Google Chrome), al revisar las muestras digitalizadas se observó una variable de tonos en pixeles nativos de los colores de la muestra de algodón, es por eso que se tomó en cuenta una escala de grises que va desde el blanco hasta el negro, los tonos de la muestras de algodón sin contaminar varían entre el código RGB: R 216, G 217, B 222, que es un tono claro contra R 204, G 205, B 210, que es un tono más oscuro, estos parámetros se tomaron en cuenta puesto que la muestra de algodón no es completamente blanca en su totalidad debido a su porosidad.

3. Discusión de Resultados

En el experimento durante el proceso de combustión se observó que las mezclas no lavadas (con menor grado de pureza) presentaban una flama más intensa en comparación con las mezclas lavadas (con más pureza), se llegó a esta conclusión puesto que solo se separó del agua mediante

decantación sin calentar, caso contrario a lo que menciona España (2019) [24], donde menciona que después de realizar el lavado, la evaporó junto con los restos del agua mediante el calentamiento del biodiésel a 110 °C durante 20 minutos con agitación a velocidad mínima. Así mismo Campos y col. (2018) [25], mencionan que, aunque implica un costo adicional es importante el lavado y

secado del biodiésel ya que este proceso tiene como objetivo eliminar todos los posibles compuestos que hayan quedado en el biocombustible, ya sea alcohol, glicerina, soda cáustica o jabones. Dentro de este experimento se demostró que se puede producir biodiésel con buenas características (Tabla 4) a temperatura ambiente (40°C).

Tabla 4. Propiedades físico-químicas del biodiésel a partir del aceite usado de cocina.

Propiedad	Unidad	Resultado
Acidez total	mg/g	0.951
Densidad a 18 °C	g/mL	0.926
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	3.55

El método de obtención del biodiésel coincide con Piker y col. (2016) [26], en donde emplearon para la obtención del biodiésel de aceite de cocina usado a temperatura ambiente, le agregaron además aceite de soja comercial y cascara de huevo como catalizador, y con una agitación de 11 horas. La utilización de materiales de desecho (aceite de cocina usado) y la realización de la reacción en condiciones ambientales hacen del método una técnica económica y respetuosa con el medio ambiente para la producción del biodiésel. En cuanto a la combustión de las diferentes muestras del experimento, se observó que las mezclas no lavadas (menos puras) de 3 y 6 g de hidróxido de sodio tuvieron una flama más intensa, en comparación con sus similares que pasaron por el procedimiento de mayor purificación. De acuerdo a la norma ASTM 6751 el valor mínimo del punto de inflamación del biodiésel debe ser de 120 °C, en el experimento (durante las mediciones para determinar las propiedades del biodiesel) rebaso el valor mínimo (148 °C) que por cierto es mucho más alto que el punto de inflamación del diésel (71 °C) esto último es probable porque el biodiésel tiene menos impurezas volátiles, lo cual se confirma con el análisis del hollín.

Al momento de realizar las pruebas de ignición de las diferentes muestras de biodiésel se concluyó, que las mezclas funcionaban ya que se logró la combustión de aproximadamente 40 mL de biodiésel, el cual se mantuvo encendido poco más de 1 h y su flama dentro de las condiciones abundantes de oxígeno fue similar a la de combustibles fósiles, la diferencia más importante que se percibió fue en los olores durante la combustión y la ausencia de humo negro como sucede con cualquier combustible fósil, durante la combustión de biodiésel no se observó ninguna partícula de hollín negro, lo cual se esperaba al ser un biocombustible limpio. En su totalidad la experimentación cumplió con las expectativas en cada uno de los pasos de acuerdo a las necesidades y limitaciones. Las fotografías generadas en el experimento se examinaron mediante la aplicación colorzilla, de la cual se obtuvieron los resultados que se muestra en la Figura 5; donde se observa claramente la diferencia de emisiones de hollín entre las mezclas de biodiésel (Tabla 2) contra el diésel fósil, dentro de cada cuadro se observa el código RGB de cada muestra.

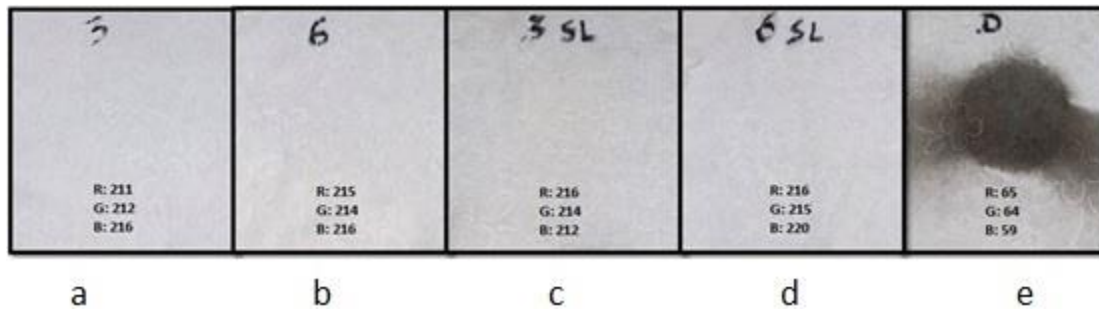


Figura 5. Muestras de emisiones de: a) biodiésel de 3 g lavado, b) biodiésel de 6 g lavado, c) biodiésel de 3 g sin lavar, d) biodiésel de 6 g sin lavado y e) diésel PEMEX.

Dentro de cada una de las imágenes muestra su código RGB que puede compararse con la

imagen escala de grises que se muestra en la Figura 6.

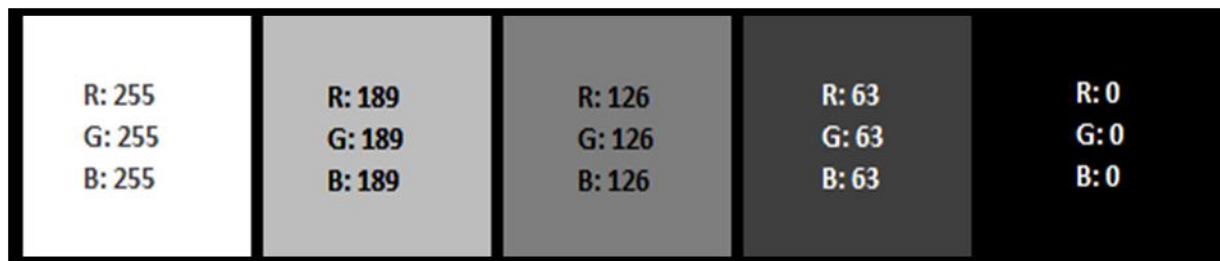


Figura 6. Figura de escala de grises con código RGB.

Se puede observar en la Figura 7 al compararla con la Figura 8, que fue nulo he imperceptible la presencia de alguna partícula de hollín. Por lo que no se detectó algún tono oscuro que pudiera evidenciar la presencia de

emisiones de hollín, caso muy diferente a lo que sucedió con el combustible diésel, ya que este último fue evidente en sus emisiones de hollín.

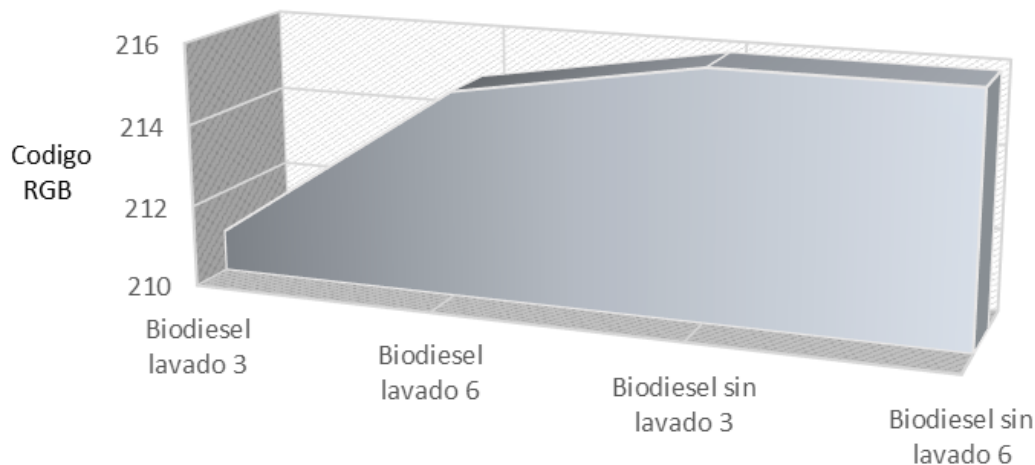


Figura 7. Código de muestras de emisiones de hollín.

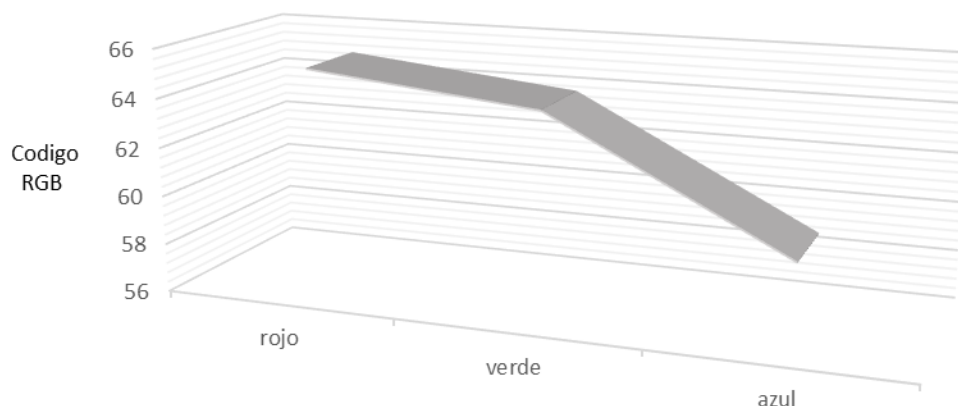


Figura 8. Código de muestras de tonos blanco, gris y negro.

El método que se utilizó en el experimento para medir las emisiones de hollín, tiene similitudes con el estudio de García (2009) [27], que tomó una muestra de gases de escape con un filtro de papel blanco, en donde determinó el índice de reflexión de la luz para posteriormente, medirlo en una célula fotoeléctrica, y con esto detectó el grado de ennegrecimiento en hacerlo pasar al gas de escape. Por lo tanto, se puede decir que la medida se fundamenta en la comparación del índice de reflexión de la luz. El fondo de escala del equipo está comprendido entre un valor mínimo 0 FSN, papel completamente blanco y un valor máximo de 10 FSN, papel completamente ennegrecido.

Si se genera más hollín a su vez se producirá más monóxido de carbono (CO) el cual es letal, el hollín está formado por carbono, y en pequeñas cantidades de hidrogeno y oxígeno, el paso inicial en la producción de hollín es la formación de hidrocarburos alifáticos para que posteriormente se generan los PAH (hidrocarburos aromáticos policíclicos) su crecimiento dará la presencia de los particulares del hollín [28]. Entre las características deseables que debe tener un biodiésel como es el caso del experimento es su mayor número de cetano, mejor lubricidad, mayor información, lo cual lo convierte adecuado para una lámpara de aceite y también para los motores de combustión [29,

30]. Dentro de una combustión el óxido de nitrógeno (NOx) es el único oxido que puede formarse en la combustión, en el experimento no se midió, pero seguro se encontraría presente, este contaminante se puede convertir en NO₂ en el escape, posteriormente el NO₂ comenzará a desintegrarse a NO y O₂ en consecuencia NOx [31]. En el estudio de Shivakumar y col. (2011) [32], señalan que las emisiones de NOx con el biodiésel de aceite de cocina de desecho son más altas que las del diésel convencional. Sin embargo, las emisiones del humo y de hollín en el biodiésel de aceite de cocina de desecho son menores que los del biodiésel convencional, esto último coincide con el biodiésel que se desarrollo es el experimento en donde se demostró una reducción del hollín. Lo que se ha podido desarrollar y descubrir con este experimento es que debido a algunas limitaciones que tiene el biodiésel tales como el menor contenido energético, mayor consumo de combustible (se consume en mayores cantidades de combustible para tener una determinada potencia) y mayores emisiones de NOx, todo esto puede ser solucionado agregándole al biodiésel distintos complementos tales como aditivos a base de metales, aditivos oxigenados, antioxidantes, mejoradores de cetano, lubricantes y optimizadores de propiedad de flujo en frio y por supuesto no podría faltar la adicción del alcohol otro de los

biocombustibles más representativos. En los próximos experimentos agregaremos bioalcohol ya que logra reducir la alta viscosidad del biodiésel [33], y también cuando el biodiésel aumente el NOx debido al mayor contenido de oxígeno su mezcla con el alcohol generaría el efecto opuesto que es la reducción del NOx (alcoholes como metanol, etanol, n-butanol y n-pentanol) [34], esto último se puede deber al enfriamiento del alcohol durante la combustión consideramos en base a este experimento que la producción de biodiésel de forma sencilla y casera es factible pero que es necesario el desarrollo tecnológico más adecuado en donde se podría apoyar de varias técnicas de mejora como lo es el tratamiento hidráulico, agrietamiento catalítico, fluido sub/supercrítico, adición de solventes, reformado con vapor y emulsificación [35].

En este trabajo se realizó un análisis de costos con la finalidad de conocer el costo por litro de biocombustible y determinar la posibilidad de que esto pueda ser implementado por una familia rural. De acuerdo con Wright y col. (2010) [36], señaló que el combustible de grado de transporte como la mezcla de hidrocarburo líquido inflamable y el biodiesel, podría producirse a través de la pirólisis rápida de los residuos de maíz y su posterior mejoramiento a un costo competitivo de US\$ 0.56 a 0.82 por litro de biocombustible, sin embargo, el costo de producción final llegó a ser mayor a US\$ 1.73 por litro considerando que la construcción de la planta era pionera (es decir, la primera en su tipo). En el caso de México, se debe considerar que para calcular el costo del biocombustible, algunos precios pueden variar dependiendo del origen del mismo, así como el costo de su recolección y transporte, por ejemplo, la venta del aceite usado “puesto en fábrica” puede llegar a pagar entre \$10.00 a \$11.00 pesos MXN el litro (Red Mexicana de bioenergía), también existen los recolectores independientes que se encargan

de la logística y llevarlo a la fábrica con un costo de \$13.72 pesos mexicanos por litro, si la producción del biodiésel se realizará con grasas animales el costo promediado por cada litro aumentaría entre \$14.22 y \$18.22 pesos MXN. Si se optara por solo pagar el aceite usado su costo sería de \$2.00 pesos MXN por litro, pero se deberá asumir los costos de recolección y transporte, para lo cual se debe tomar en consideración la ecuación 3.

$$C = F_c + L_c + M_c + G_e, \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

C = Costo de recolección

F_c = Costo de combustible

L_c = Salario del chofer

M_c = Costo de mantenimiento del vehículo

G_e = Gastos generales

Durante la producción del biodiésel se deben considerar algunos gastos de reactivos como el costo del metanol (marca Meth al 99.8% costo \$49.50 MXN por L), el costo del hidróxido de sodio (marca Fagalab \$62.60 MXN por 100 g), gasto de materiales y equipos (decantador, matraz, embudo, etc.).

En el análisis del costo de este estudio cabe aclarar, que no se contemplan las inversiones fijas (activos fijos) como los edificios, construcciones, terrenos, maquinaria y equipo, instrumentación y control, mobiliario y todo lo que tenga que ver con la ingeniería de detalle, esto último es debido a que se considera una elaboración del biodiésel de manera casera (con recursos propios), lo que si se va a considerar, es el capital de trabajo, que es básicamente los recursos económicos y financieros necesarios para que la producción de biodiésel pueda funcionar de manera adecuada y se puedan desempeñar las actividades sin problemas, partiendo de la ecuación 4.

$$\text{Capital de trabajo} = \text{activo corriente} - \text{pasivo corriente} \quad (\text{Ec. 4})$$

Se cuenta con un total de activos mensuales (\$80,000 MXN en efectivo en caja y bancos) menos el total de pasivos mensuales (\$50,000 MXN en deudas a corto plazo y con proveedores), nos queda del capital de trabajo \$30,000 MXN pesos para 5,830 L de biodiésel, estos cálculos fueron tomados al momento de realizar las experimentaciones.

Sin lugar a dudas el costo principal en la producción del biodiésel es la materia prima de acuerdo con Rodríguez y col. (2018) [37], señala que el costo de la materia prima para la elaboración del biodiésel se encuentra en una vulnerabilidad ante posibles aumentos del precio de la materia prima, en otras palabras, los industriales que se dedican a producción biodiésel no estarían en condiciones de soportar aumentos en el precio de la materia prima. Finalmente este estudio tiene un impacto social positivo ya que abre las puertas a personas de bajos recursos a producir su propio biocombustible en distintos usos como las lámparas de aceites, iniciadores de fuego, combustible de vehículo diésel o como combustible extra para calderas y calentadores, también ayuda a evitar el desecho indebido o incorrecto de aceites derramados en los drenajes, esto último causa graves problemas y además contamina el agua, por lo que este proyecto puede ayudar como una guía para convertir un desecho en una fuente de energía.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la elaboración del biodiésel muestran que el proceso de transesterificación no requiere de mucho presupuesto para su elaboración, como lo señala el estudio de costos, su buena respuesta de punto de inflamación y su bajo nivel del hollín lo hacen atractivo para diversas aplicaciones, el método empleado no requiere de un gasto para regular la temperatura, debido a que se aprovechó las altas

temperaturas durante el verano del norte del país (Nuevo Laredo, Tamaulipas), la técnica fue generada con una agitación constante en un tiempo determinado, lo cual resulta idóneo para generar un biocombustible a partir del aceite de cocina usado. Otra de las ventajas es que solo requiere como materia prima productos de desecho lo cual es muy benéfico para ayudar a la reducción de contaminantes, esto último es debido a que los aceites residuales vertidos en los cuerpos de agua (ríos, lagos, lagunas, etc.) generan graves daños al medio ambiente. La producción de estos biocombustibles puede fomentar a la generación de empleos para familias marginadas, por lo que esta técnica tiene beneficios multiplicadores.

5. Referencias

1. Fernández G.J., Gutiérrez Martin, Fernando, Del Rio González, Pablo, San Miguel Alfaro, Guillermo, Bahillo Ruiz, Alberto, Sánchez Hervas, José María, Ballesteros Perdices, Mercedes, Vázquez Minguela, Jesús Ángel, Aracil Mira, José, Rodríguez Anton, Luis Miguel. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. México: Ediciones Paraninfo. Ediciones Mundi-Prensa, <https://books.google.com.gt/books?id=k9ISCgAAQBAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
2. Hosmath, R.S., Banapurmath N.R., Khandal S.V., Gaitonde V.N., Basavarajappa Y.H., Yaliwal V.S. (2016). Effect of compression ratio, CNG flow rate and injection timing on the performance of dual fuel engine operated on honge oil methyl ester (HOME) and compressed natural gas (CNG). *Renewable Energy*, 93:579-590, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.010>.

3. Chen Y, Jinqiu Ma, Bin Han, Peng Zhang, Haining Hua, Hao Chen, Xin Su. (2018). Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(4): 318-334, ISSN 2095-7564, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.05.001>.
4. Noor M.C.W, Noor M.M., Mamat R. (2018). Biodiéselas alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94:127-142, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031>.
5. Teixeira MR, Nogueira R, Nunes LM. (2018). Quantitative assessment of the valorisation of used cooking oils in 23 countries. *Waste Manage*, 78:611–20. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.039>.
6. Chen G, Liu J, Yao J, Qi Y, Yan B. (2017). Biodiesel production from waste cooking oil in a magnetically fluidized bed reactor using whole-cell biocatalysts. *Energy Convers Manage*, 138:556–64. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.036>.
7. Zhang H, Li L, Zhou P, Hou J, Qiu Y. (2014). Subsidy modes, waste cooking oil and biofuel: policy effectiveness and sustainable supply chains in China. *Energy Policy*, 65:270–4. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.009>.
8. Goh B.H.H, Cheng Tung Chong, Yuqi Ge, Hwai Chyuan Ong, Jo-Han Ng, Bo Tian, Veeramuthu Ashokkumar, Steven Lim, Tine Seljak, Viktor Józsa. (2020). Progress in utilisation of waste cooking oil for sustainable biodiéseland biojet fuel production, *Energy Conversion and Management*, Volume 223, 113296, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113296>.
9. Othman M.F., Abdullah Adam, G. Najafi, Rizalman Mamat. (2017). Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80: 694-709, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.140>.
10. Ali OM, Mamat R, Abdullah NR, Adam A. (2016). Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel-diesel blended fuel. *Renewable Energy*, 86:59–67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.103>.
11. Kumar N., Varun, Chauhan SR. (2013). Performance and emission characteristics of biodiésel from different origins: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 21:633-658. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.006>.
12. Atabani A.E., Silitonga A.S., Badruddin I.A, Mahlia T.MI, Masjuki H.H, Mekhilef S.A. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renew Sustain Energy Rev*, 16:2070–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>.
13. Singh B, Guldhe A, Rawat I, Bux F. (2014). Towards a sustainable approach for development of biodiésel from plant and microalgae. *Renew Sustain Energy Rev*, 29:216–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.067>.
14. Xing AH, Ma J, Zhang YH, Wang Y, Yong Jin. (2010). Life cycle assessment of economy for biodiesel. *J Tsinghua Univ*, 50:923–927.
15. Zaman, A.U. (2016). A comprehensive study of the environmental and economic benefits of resource recovery from global waste management systems. *J. Clean.*

- Prod. 124: 41-50.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.086>
16. Nantha-Gopal K, Pal A, Sharma S, Samanchi C, Sathyanarayanan K, Elango T. (2014). Investigation of emissions and combustion characteristics of a CI engine fueled with waste cooking oil methyl ester and diesel blends. *Alex Eng J*, 53:281–7, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.02.003>
 17. Örs I., Sarıkoç S, Atabani A.E, Ünalán S, Akansu S.O. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DIC engine fuelled with TiO₂ nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends, *Fuel*, (234) 177-188, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.024>
 18. Reddy V.M, Biswas P, Garg P, Kumar S. (2014). Combustion characteristics of biodiesel fuel in high recirculation conditions, *Fuel Process. Technol.* 118: 310-317.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.10.004>
 19. Hajjari M, Tabatabaei M, Aghbashlo M, Ghanavati H. (2017). A review on the prospects of sustainable biodiesel production: a global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization. *Renew Sustain Energy Rev.* 72:445e64.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.034>.
 20. Khan Y.T.M., Irfan Anjum Badruddin, Ahmad Badarudin, N.R. Banapurmath, N.J. Salman Ahmed, G.A. Quadir, Abdullah A.A.A. Al-Rashed, H.M.T. Khaleed, Sarfaraz Kamangar. (2015). Effects of engine variables and heat transfer on the performance of biodiesel fueled IC engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 44: 682-691, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.025>.
 21. CEUPE (2021). ¿Qué es la transesterificación? [Artículo]. CEUPE. Recuperado de: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-transesterificacion.html>
 22. Gutiérrez Pulido Humberto, De la Vara Salazar Román. (2012). Análisis y diseño de experimentos, 1-489. México: McGraw-Hill. ISBN 6071507251, 9786071507259
 23. García-Muentes, Segundo Alcides, Lafargue-Pérez, Francisco, Labrada-Vázquez, Benigno, Díaz-Velázquez, Manuel, & Sánchez del Campo-Lafita, Ana Estela. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 142-158.
 24. España G.A. (2019). Producción de biodiesel a partir de aceites vegetales y grasas animales recicladas (Maestría). Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”, pagina web: <https://1library.co/document/zx9vg9nz-produccion-biodiesel-partir-aceites-vegetales-grasas-animales-recicladas.html>
 25. Campos U.C.M., Delgado Saavedra, H. A. G., Esquivel Chávez, J. D., Samamé Salazar, J. L. J., & Sirlupú Zapata, J. D. (2018). Diseño de la línea de producción para la elaboración de biodiesel a partir de aceite residual recolectado de la industria chiflera piurana. Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería, Área Departamental de Ingeniería Industrial y de Sistemas.
 26. Piker A, Betina Tabah, Nina Perkas, Aharon Gedanken, (2016). A green and low-cost room temperature biodiesel production method from waste

- oil using egg shells as catalyst, *Fuel*, Volume 182, Pages 34-41, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.078>.
27. García, M.A. (2009). Estudio de los efectos de la post inyección sobre el proceso de combustión y la formación de hollín en motores diésel (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València), <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=83892>
 28. Kennedy I.M. (1997). Models of soot formation and oxidation. *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 23, Issue 2, pp. 95-132.
 29. Labeckas G, Slavinskas S. (2013). Performance and emission characteristics of a direct injection diesel engine operating on KDV synthetic diesel fuel. *Energy Convers Manag*, 66(0):173–188. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.004>
 30. Ushakov S, Valland H, Vilmar A. (2013). Combustion and emissions characteristics of fish oil fuel in a heavy-duty diesel engine. *Energy Convers Manag*, 65(0):228–238. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.009>
 31. Lapuerta M., Armas Octavio Reyes Garcia-Contreras. (2007). Stability of dieselbioethanol blends for use in diesel engines. *Fuel*, 86:1351-7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.042>
 32. Shivakumar, Srinivasa Pai P, Shrinivasa Rao BR. (2011). Artificial Neural Network based prediction of performance and emission characteristics of a variable compression ratio CI engine using WCO as a biodiésel at different injection timings. *Appl Energy*, 88(7):2344–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.12.030
 33. Rashedul H.K, Masjuki M.A, Kalam A.M, Ashraful S.M, Ashrafur Rahman, Shahir S.A. (2014). The effect of additives on properties, performance and emission of biodiésel fuelled compression ignition engine. *Energy Convers Manage*, 88:348–64. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.034>
 34. Subramanian T, Varuvel EG, Martin LJ, Beddhannan N. (2017). Effect of lower and higher alcohol fuel synergies in biofuel blends and exhaust treatment system on emissions from CI engine. *Environ Sci Pollut Control Ser*, 24(32): 25103e13. DOI:10.1007/s11356-017-0214-9
 35. Yuan X, Leng L, Xiao Z, Lai C, Jiang L, Wang H, et al. (2016). Pyrolysis and combustion kinetics of glycerol-in-diesel hybrid fuel using thermogravimetric analysis, *Fuel*, 182:502e8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.008>.
 36. Wright MM, Daugaard DE, Satrio JA, Brown RC. (2010). Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels. *Fuel*, 89:2–10. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.029>
 37. Rodríguez Hernández R., Góngora González S., Reyes Reyes A. L., Sánchez-Vásquez V. (2018). Análisis de competitividad y rentabilidad de producción de biodiésel de granos de moringa en Chiapas y Yucatán, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* vol. 9 núm. 5 <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.716>