

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE
CRUDO DE PALMA AFRICANA A ESCALA DE
LABORATORIO

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Andrés Jáuregui Mourra
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2017

PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE
CRUDO DE PALMA AFRICANA A ESCALA DE
LABORATORIO

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE
CRUDO DE PALMA AFRICANA A ESCALA DE
LABORATORIO

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Andrés Jáuregui Mourra
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2017

Vo. Bo.

(f) _____
Ing. Gamaliel Zambrano

Terna examinodara

(f) _____
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) _____
Ing. Cristián Rossi

(f) _____
Ing. Juan José Lira

Fecha de aprobación: Guatemala, 04 de diciembre de 2017

PREFACIO

Realizo este apartado para agradecer a las personas que con su ayuda colaboraron en la realización del presente trabajo. Agradezco al Ing. Gamaliel Zambrano, por su asesoría, disponibilidad y orientación a lo largo de la ejecución de este trabajo y de toda la carrera. De igual forma agradezco al Ing. Cristián Rossi por su asesoría, ayuda y consejos siempre que los necesité en materia de este trabajo de graduación, de la carrera de Ingeniería Química y de la vida. Finalmente quiero mostrar mis agradecimientos a Moisés Vásquez, Cristian García, Melisa Paredes y Verónica Jiménez por la ayuda, disponibilidad y paciencia que tuvieron cuando necesitaba ayuda en el laboratorio.

A todos ellos, muchas gracias.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| PREFACIO | v |
| LISTA DE CUADROS..... | viii |
| LISTA DE FIGURAS..... | xi |
| RESUMEN | xii |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS..... | 3 |
| A. OBJETIVO GENERAL..... | 3 |
| B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| III. JUSTIFICACIÓN | 4 |
| IV. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| A. PALMA AFRICANA..... | 7 |
| B. ACEITE CRUDO DE PALMA AFRICANA..... | 10 |
| C. ECONOMÍA..... | 11 |
| D. BIODIÉSEL | 13 |
| E. REACCIONES INVOLUCRADAS..... | 17 |
| 1. ESTERIFICACIÓN DE FISCHER..... | 17 |
| 2. TRANSESTERIFICACIÓN | 17 |
| F. PROPIEDADES FÍSICAS | 18 |
| V. ANTECEDENTES | 20 |
| VI. METODOLOGÍA..... | 22 |
| A. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE Y BIODIÉSEL | 22 |
| B. PRETRATAMIENTO..... | 25 |
| C. ESTERIFICACIÓN ÁCIDA..... | 26 |
| D. TRANSESTERIFICACIÓN | 27 |
| E. PURIFICACIÓN DEL BIODIÉSEL..... | 28 |
| VII. RESULTADOS..... | 29 |

| | |
|--|----|
| VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 35 |
| IX. CONCLUSIONES..... | 46 |
| X. RECOMENDACIONES | 48 |
| XI. BIBLIOGRAFÍA..... | 49 |
| XI. ANEXOS | 54 |
| A. CUADROS DE MEDICIONES Y RESULTADOS ADICIONALES..... | 54 |
| B. CÁLCULOS | 74 |
| C. FIGURAS..... | 77 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Rendimiento de producción por cultivo, tierra cultivada y cantidad de producción de los principales cultivos en Guatemala durante el 2014. | 8 |
| Cuadro 2. Comparación de precios de distintos aceites. | 12 |
| Cuadro 3. Comparación de los métodos más empleados en la actualidad para la producción de biodiésel. | 15 |
| Cuadro 4. Propiedades físicas del aceite crudo de palma y biodiésel | 18 |
| Cuadro 5. Rendimientos de producción de biodiésel obtenidos en la Universidad del Valle de Guatemala para aceite usado de fritura en la planta de producción de biodiésel del Departamento de Ingeniería Química. | 21 |
| Cuadro 6. Resumen de los métodos empleados para la caracterización del aceite crudo de palma y el biodiésel. | 24 |
| Cuadro 7. Identificación de las variantes aplicadas en los 8 lotes de producción de biodiésel empleadas en este trabajo. | 27 |
| Cuadro 8. Retención de masa porcentual para cada una de las operaciones unitarias y procesos empleados en los tres lotes de tratamiento del aceite crudo de palma africana. | 33 |
| Cuadro 9. Rendimientos promedio obtenidos para los distintos procesos de producción de biodiésel que se llevaron a cabo. | 33 |
| Cuadro 10. Valores promedio de las propiedades físicas del aceite tratado de palma según las caracterizaciones realizadas. | 34 |
| Cuadro 11. Valores obtenidos de pH promedio para el aceite crudo, el aceite tratado (limpio) y el aceite esterificado de palma. | 34 |
| Cuadro 12. Valores promedio de las propiedades físicas del biodiésel producido según las caracterizaciones realizadas. | 34 |
| Cuadro 13. Retención de masa porcentual para cada una de las operaciones unitarias y procesos empleados en el tratamiento del aceite crudo de palma africana con pocos sólidos suspendidos (proceso con sedimentación inicial). | 54 |
| Cuadro 14. Retención de masa porcentual para cada una de las operaciones unitarias y procesos empleados en el tratamiento del aceite crudo de palma africana con pocos sólidos suspendidos (proceso sin sedimentación inicial). | 55 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 15. Retención de masa porcentual para cada una de las operaciones unitarias y procesos empleados en el tratamiento del aceite crudo de palma africana con muchos sólidos suspendidos (proceso sin sedimentación inicial)..... | 55 |
| Cuadro 16. Cantidades requeridas y utilizadas de reactivos para la reacción de esterificación ácida en cada uno de los lotes de producción que aplican a esta reacción..... | 56 |
| Cuadro 17. Valores máxicos obtenidos para los productos de las reacciones de esterificación ácida empleadas en los primeros 4 lotes de producción de biodiésel, y valores obtenidos para el proceso de secado del aceite esterificado en los procesos que aplican. | 56 |
| Cuadro 18. Cantidades requeridas y utilizados de reactivos para la reacción de transesterificación en cada uno de los lotes de producción de biodiésel. | 57 |
| Cuadro 19. Masas obtenidas para los productos de las reacciones de transesterificación de los lotes de producción trabajados. | 58 |
| Cuadro 20. Masas del biodiésel obtenidas durante los procesos de limpieza (lavado y secado), con su respectiva cantidad de masa removida en cada proceso. | 59 |
| Cuadro 21. Rendimiento de producción de biodiésel para los lotes trabajados..... | 60 |
| Cuadro 22. Comparación de la masa obtenida de biodiésel con la masa teórica y la masa inicial de aceite crudo..... | 60 |
| Cuadro 23. Valores de pH obtenidos para el aceite crudo, el aceite crudo tratado y el aceite esterificado..... | 61 |
| Cuadro 24. Valores de pH obtenidos para los lavados de biodiésel. | 61 |
| Cuadro 25. Porcentaje de agua requerido (con relación a la masa de biodiésel obtenido) para los lavados de Biodiésel..... | 62 |
| Cuadro 26. Porcentaje de humedad y materia volátil del aceite crudo que se utilizó en cada lote de producción..... | 63 |
| Cuadro 27. Porcentaje de humedad y materia volátil del biodiésel producido en cada lote de producción. Comprobación de la ausencia de humedad..... | 64 |
| Cuadro 28. Mediciones realizadas para la determinación del número ácido del aceite crudo después de tratarlo. | 65 |
| Cuadro 29. Mediciones realizadas para la determinación del número ácido del aceite esterificado..... | 66 |
| Cuadro 30. Mediciones realizadas para la determinación de la densidad del biodiésel producido en cada lote de producción. | 67 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 31. Mediciones realizadas para la determinación del aceite de palma africana después de tratarlo. | 68 |
| Cuadro 32. Mediciones realizadas para la determinación de la viscosidad cinemática del aceite crudo después de tratarlo..... | 69 |
| Cuadro 33. Mediciones realizadas para la determinación de la viscosidad del biodiésel producido en cada lote de producción. | 70 |
| Cuadro 34. Índices de refracción obtenidos para el biodiésel producido en cada lote. | 71 |
| Cuadro 35. Resultados obtenidos de las pruebas cualitativas: prueba 3/27 y prueba de agua y sedimentos..... | 72 |
| Cuadro 36. Punto de fusión para los sólidos suspendidos en el aceite crudo. | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Producción de cultivos en Guatemala para el año 2014. | 9 |
| Figura 2. Superficie cultivada por tipo de cultivo en Guatemala durante el año 2014. | 10 |
| Figura 3. Comparación de las cantidades obtenidas de biodiésel con la cantidad estequiométrica teórica y con la cantidad inicial de aceite crudo, para los 8 lotes de producción trabajados. | 29 |
| Figura 4. Balance de masa de las operaciones realizadas para la producción de biodiésel con una transesterificación alcalina (sin esterificación ácida), con una base de 100 kg de aceite crudo de palma (ACP)..... | 30 |
| Figura 5. Balance de masa de las operaciones realizadas para la producción de biodiésel con una transesterificación alcalina y una esterificación ácida previa a la transesterificación, con una base de 100 kg de aceite crudo de palma (ACP). | 31 |
| Figura 6. Balance de masa de las operaciones realizadas para la producción de biodiésel con una transesterificación ácida (sin esterificación ácida), con una base de 100 kg de aceite crudo de palma (ACP)..... | 32 |
| Figura 7. Aceite crudo de palma con pocos sólidos suspendidos. | 77 |
| Figura 8. Aceite crudo de palma con muchos sólidos suspendidos..... | 78 |
| Figura 9. Árbol de desiciones según las variaciones del número ácido del aceite crudo de palma africana para la producción de biodiésel. | 79 |

RESUMEN

En este trabajo se analizó la producción de biodiésel a escala de laboratorio a partir de aceite crudo de palma africana (ACP). Para ello también fue necesario caracterizar dicho aceite. Se determinó que el principal componente sólido contenido en ACP es estearina, con un punto de fusión de $49\pm 2^{\circ}\text{C}$. Además, se determinó las siguientes propiedades promedio del ACP: pH de 4.928 ± 0.050 , $0.210 \pm 0.001\%$ m/m de humedad y materia volátil, $1.04 \pm 0.04\%$ m/m de número ácido y una densidad de $0.866 \pm 3 \text{ kg/m}^3$. Se determinó un método de purificación efectivo que conlleva operaciones de sedimentación, filtración, centrifugación y secado. En promedio, se logró recuperar un 49.39% m/m de aceite utilizable para producir biodiésel, del total del aceite crudo disponible antes de tratarlo. El proceso general fue tratar el ACP para disponer de un aceite limpio, luego realizar una esterificación ácida, luego un secado y finalmente una transesterificación. Se estudió el efecto sobre el rendimiento de producción de realizar o no algunas operaciones del procedimiento. El rendimiento obtenido cuando sí se realizó una esterificación ácida (84.04% m/m) resultó ser 3.54% mayor que cuando no se realizó (80.50% m/m). Además, el rendimiento obtenido (85.68% m/m) para una transesterificación catalizada por medio ácido fue 5.18% m/m superior al rendimiento obtenido (80.50% m/m) para una transesterificación catalizada por medio básico. Finalmente se determinaron las siguientes propiedades promedio del biodiésel producido: pH de 6.843 ± 0.050 , densidad de $874 \pm 3 \text{ kg/m}^3$ e índice de refracción de 1.46547 ± 0.00010 .

I. INTRODUCCIÓN

El propósito de este trabajo fue caracterizar una serie de muestras de aceite crudo de palma africana e implementar una metodología, a escala laboratorio, de producción de biodiésel a partir de dicha materia prima. Con los resultados obtenidos, se propusieron ideas para la adecuación del proceso para ser utilizado en una planta piloto.

La producción de biodiésel se realizó de la siguiente manera: primero se trató el aceite crudo, luego se realizó una esterificación ácida para reducir el contenido de ácidos grasos, luego se secó para remover el agua formada por la esterificación y luego se realizó una transesterificación catalizada por medio ácido o básico. Según el procedimiento descrito, se estudió la variación de tres parámetros y su influencia sobre el rendimiento de producción de biodiésel. Estos parámetros fueron: la influencia del secado intermedio entre la esterificación y la transesterificación, la influencia de la realización de la esterificación ácida, y la variación al realizar la transesterificación por catálisis ácida con NaOH al 99% m/m o por catálisis ácida con H₂SO₄ al 99% m/m.

Según lo anterior, se concluyó que el rendimiento de producción (71.63% m/m) obtenido para los lotes en donde no se realizó la operación de secado entre la esterificación y la transesterificación resultó ser 12.41% m/m menor que el rendimiento de producción obtenido (84.04% m/m) cuando dicho secado sí se realizó. Para el caso del análisis de la influencia de la esterificación ácida, se obtuvo un rendimiento de 84.04% m/m para el procedimiento en donde sí se realizó una esterificación ácida (previa a la transesterificación alcalina), el cual fue 3.54% m/m mayor al rendimiento de producción (80.50% m/m) obtenido cuando dicha esterificación no se realizó. Y para el caso del análisis del catalizador, el rendimiento obtenido (85.68% m/m) para la transesterificación catalizada por medio ácido fue 5.18% m/m superior al rendimiento (80.50% m/m) obtenido para la transesterificación catalizada por medio básico.

Entre otros resultados, se determinó las siguientes propiedades promedio en la caracterización del aceite crudo de palma: pH de 4.928 ± 0.050 , $0.219 \pm 0.001\%$ m/m de humedad y materia volátil, $1.04 \pm 0.04\%$ m/m de número ácido y una densidad de 866 ± 3 kg/m³. Además, se logró comprobar que el producto obtenido en las transesterificaciones de los 8 lotes de producción trabajados fue en efecto biodiésel. Esto se comprobó con la medición y corroboración con la literatura y estándares, de las propiedades del biodiésel obtenido. Dichas propiedades fueron: pH promedio de 6.843 ± 0.050 , densidad de 874 ± 3 g/cm³ e índice de refracción de 1.46547 ± 0.00010 .

El alcance de este trabajo se limitó a trabajar únicamente con aceite crudo de palma africana y a escala laboratorio. Sin embargo, sí se propuso una primera aproximación para la adecuación de la planta piloto de la Universidad del Valle de Guatemala según los resultados obtenidos.

En este trabajo primero se presentan los objetivos y luego la justificación que proporciona los argumentos por los cuales se considera útil este trabajo. Además, también se habla de por qué este trabajo no afecta la seguridad alimentaria del país; y se habla de la razón por la que un posible aumento en la producción de aceite de palma no representaría riesgos de un monocultivo para el país. Se incluyó el marco teórico que proporciona la información suficiente para sustentar teóricamente el contenido de este trabajo. Le siguen los antecedentes y la metodología empleada, con los respectivos métodos oficiales estándares empleados en las distintas determinaciones o mediciones ejecutadas. Luego se presentan los resultados obtenidos experimentalmente y la discusión de los mismos. Finalmente se muestran las conclusiones y recomendaciones.

II. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema a escala de laboratorio que permita tratar el aceite crudo de palma africana, removiendo los componentes que puedan interferir en la reacción de transesterificación, para la producción de biodiésel; y proponer adecuaciones generales a la planta piloto de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala, según los resultados que se obtengan.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el aceite crudo de palma disponible usando métodos analíticos como la determinación del número ácido y porcentaje de humedad, para establecer los pretratamientos y limpieza necesarios.
- Determinar el rendimiento de producción con experimentación múltiple para la producción de biodiésel, a partir de aceite crudo de palma africana.
- Estudiar el efecto sobre el rendimiento de producción de biodiésel de la realización de una esterificación ácida y de la utilización de un catalizador ácido o básico en la transesterificación.
- Realizar un balance de masa para los procesos involucrados en el tratamiento y producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana, para estudiar la distribución de la masa en el proceso.
- Comparar la eficiencia obtenida de la producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana a escala de laboratorio, con la eficiencia de producción de biodiésel a partir de aceite de fritura, trabajada en la planta de biodiésel del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala por los ingenieros encargados de dicha planta.
- Realizar propuestas generales de las adecuaciones necesarias que requeriría la planta piloto de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala, para que pueda producir en un futuro biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana.

III. JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas se ha venido hablado de un consumo acelerado de combustibles fósiles para una gran variedad de actividades humanas. Esto genera un gran problema para el ambiente debido a dos razones: primero, los combustibles fósiles son un recurso no renovable que se está agotando, y segundo, la extracción y refinamiento de dichos combustibles presenta grandes problemas para el ambiente, como deforestaciones, contaminación de los océanos por derrames, riesgo de explosiones o incendios, deterioramiento de la calidad del aire y daño a la fauna terrestre por consumo de componentes tóxicos solubles en agua. Debido a ello, en los últimos años se ha buscado combustibles alternativos cuya extracción y producción tengan un impacto menor al ambiente. Uno de ellos es el biodiésel, un combustible producido usando materias primas renovables como los aceites vegetales.

El problema con el biodiésel B100 es que su costo de producción a escala industrial es superior al de otros combustibles fósiles como el diésel. De forma general, el costo del biodiésel radica de un 60-75% en su materia prima (Nduwayezu, 2015), es decir el aceite. El objetivo de realizar este trabajo a escala laboratorio es poder identificar los principales inconvenientes del proceso de purificación del aceite crudo. De esta manera se podrán realizar propuestas a escala planta piloto según las observaciones realizadas a escala laboratorio.

Actualmente el precio del biodiésel B100 (GT Q6.21 por litro) es superior al del diésel (GT Q5.28 por litro). Esto provoca que para el consumidor el diésel sea un combustible más atractivo desde el punto de vista económico. Una solución ante este inconveniente son las mezclas de diésel-biodiésel, las cuales permiten amortiguar el precio del biodiésel. Esto consiste en agregar cierto porcentaje de biodiésel al diésel. Esto es posible dado que las propiedades de ambos combustibles son muy similares. La ventaja de realizar esta mezcla es que permite que el precio se vuelva más competitivo con el diésel en el mercado. Además, se logra disminuir la cantidad de combustible fósil utilizado (diésel), logrando así tener un menor impacto ambiental en cuanto a las explotaciones mineras y demás problemas de los combustibles fósiles. Algunas de las mezclas más comunes utilizadas en la actualidad son B20 y B25, las cuales utilizan un 20% y un 25% de biodiésel respectivamente.

Con este trabajo se busca implementar una metodología a escala laboratorio para la producción de biodiésel a partir de un aceite crudo, en este caso aceite de palma africana. Adicionalmente, se pretende proponer adecuaciones a la planta de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala, para que pueda realizar su producción a partir de aceite crudo de palma africana. Esto permitirá que, en un futuro, dicha planta pueda producir biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana, si conviene.

El propósito de este trabajo es que en un futuro la industria del biodiésel se desarrolle en Guatemala. Es importante mencionar que Guatemala posee un gran potencial para la producción de biocombustibles sin poner en peligro la seguridad alimentaria. Según datos estadísticos de la base de datos Index Mundi de la USDA (United States Department of Agriculture), Guatemala produjo 740,000 toneladas métricas de aceite crudo de palma africana durante el año 2016 (USDA, 2017). Adicionalmente según GREPALMA, el 80% el aceite crudo de palma se exporta, y el otro 20% se utiliza para consumo local cubriendo la demanda del país. Por lo tanto, durante el año 2016 Guatemala exportó 592,000 toneladas métricas de aceite crudo y solo 142,000 se quedaron en territorio nacional. Ello implica que la mayor cantidad de aceite de palma producido en Guatemala no es aprovechada en el país (GREPALMA, 2017). Ello implica que existe una gran cantidad de aceite de palma africana que no está siendo utilizado para el sector alimenticio del país, sino que está siendo vendido al extranjero. Si una fracción de esas 592,000 toneladas métricas de aceite crudo de palma que está siendo exportado se quedara en territorio nacional, se podría aprovechar para producir biocombustibles como el biodiésel, sin poner en riesgo las necesidades alimentarias del país. Esto generaría una gran cantidad de empleos, aumentando la fuerza laboral del país en un sector que actualmente no está siendo aprovechado.

Ahora, si las 592,000 toneladas métricas (80% de la producción nacional) de aceite crudo de palma africana que se exportan en Guatemala fueran aprovechadas en su totalidad para la producción de biodiésel, se obtendrían 284,125.64 m³ de biodiésel como producción nacional. Esto representa un 14.91% (v/v) del consumo de diésel (1,905,050.54 m³) que se tuvo en Guatemala en el año 2016. (MEM, 2017) En otras palabras, con la producción de biodiésel a partir del aceite crudo de palma que actualmente se exporta, se lograría abarcar 14.91% v/v del consumo de diésel en el país. Esto disminuiría el impacto en el ambiente y permitiría el aumento en la fuerza laboral de Guatemala.

Otro aspecto que resaltar es que actualmente la palma africana no representa un riesgo de monocultivo en Guatemala. Esto se debe en primer lugar a que la palma africana tiene un

rendimiento por hectárea considerablemente mayor que muchos otros cultivos como el café, maíz y frijol. Como ejemplo, la producción de palma africana durante el 2014 en Guatemala fue considerablemente mayor a la del resto de cultivos, con excepción de la caña de azúcar. A pesar de ello, debido a su alto rendimiento por metro cuadrado (6.0671 kg/m²), la tierra utilizada por la palma africana (1,527 millones de m²) fue significativamente menor a la tierra utilizada por cultivos de menor producción como el café (3,656 millones de m²) y el maíz (8,192 millones de m²).

Adicionalmente, la cantidad de tierra en Guatemala utilizada para el cultivo de Palma Africana es muy pequeño en relación con la cantidad total de tierra en el país. Según datos de la INE (Instituto Nacional de Estadística) en el año 2014 se utilizaron 1.061×10^{10} m² para cultivos permanentes, dentro de los cuales se encuentra la palma africana. Dicha cantidad de hectáreas solo representa el 14% de la tierra cultivable (7.35441×10^{10} m²). Durante el año 2014, la cantidad cultivada de palma africana fue de 153 mil hectáreas en Guatemala, lo cual representa un 14% de la tierra utilizada para cultivos permanentes y un 2% del total de tierra cultivable del país. Paralelamente, GREPALMA tiene registrado en su sitio web que el porcentaje de tierra ocupado por la Palma Africana es de 0.8%, un valor por debajo de cultivos como el café (2.8%) y el maíz (2.6%).

IV. MARCO TEÓRICO

El tema de los combustibles ha generado un debate controversial en los últimos años. Los problemas ambientales generados por los combustibles fósiles han abierto la preocupación e investigación hacia combustibles alternativos más amigables con el ambiente. Uno de los combustibles que ha llamado la atención en los últimos años es el biodiésel, siendo una mezcla de mono-alquil ésteres de cadena larga, derivado de fuentes grasosas renovables. Entre las materias primas más utilizadas para la producción de biodiésel se encuentran los aceites vegetales, animales y los provenientes de algas. Actualmente, los aceites vegetales son la fuente más empleada debido a su gran producción y uso en la industria alimenticia. Por este motivo, la tecnología e infraestructura para la producción de aceites vegetales está ampliamente desarrollada. (Anguebes, 2016)

Existe una gran variedad de aceites vegetales ya que son muchas las fuentes de donde estos pueden extraerse. Dependiendo de los recursos naturales y de la materia prima disponible en cada país, el aceite vegetal utilizado para producir biodiésel varía en las distintas regiones del mundo. Por ejemplo, en Estados Unidos y Argentina el aceite más utilizado es el aceite de soya, así como en Europa el aceite más empleado es el de colza. En el caso específico de Guatemala, el aceite vegetal que se encuentra con mayor disponibilidad en el mercado es el aceite de palma africana (INE, 2015). A nivel mundial el aceite vegetal más utilizado para la producción de biodiésel es el aceite de palma africana. (Alkabbashi, 2007)

A. PALMA AFRICANA

El cultivo de palma africana inició en Guatemala en los años 70. El propósito en esa época fue sustituir al cultivo de café dado que en ese entonces se daba una crisis con el cultivo de dicho producto. Durante los primeros años se realizaron investigaciones en la zona sur del país. En los años 80, la plantación de la palma empezó sutilmente en Guatemala con las empresas Tecún Umán y La Gomera, ubicadas en Petén y Escuintla respectivamente. Desde esa época se implementaron cultivos y la palma se instaló en las regiones del sur, norte y nororiente del país, las mismas regiones que actualmente ocupa. (REPSA, 2017)

A pesar de que el cultivo de palma africana empezó desde los años 80, no fue hasta los años 90 que empezó con mayor intensidad. En el año 1988 se registró formalmente la siembra de palma africana para la producción de aceite crudo. Las áreas destinadas para dicha siembra fueron campos usados para cultivo de algodón (tuvo gran auge en la década de los 70 en Guatemala,

pero decayó durante los 80 por la crisis de la caída de los precios mundiales). No obstante, fue hasta el año 1991 que se registraron las primeras cosechas de aceite de palma africana. A partir de entonces, la industria de la palma fue creciendo en Guatemala. Tanto es así que para el año 2008, se formó el Gremial de Palmicultores de Guatemala (GREPALMA), como una asociación civil no lucrativa. El objetivo de este grupo es contribuir al desarrollo del país con el cultivo de la palma africana. (REPSA, 2017)

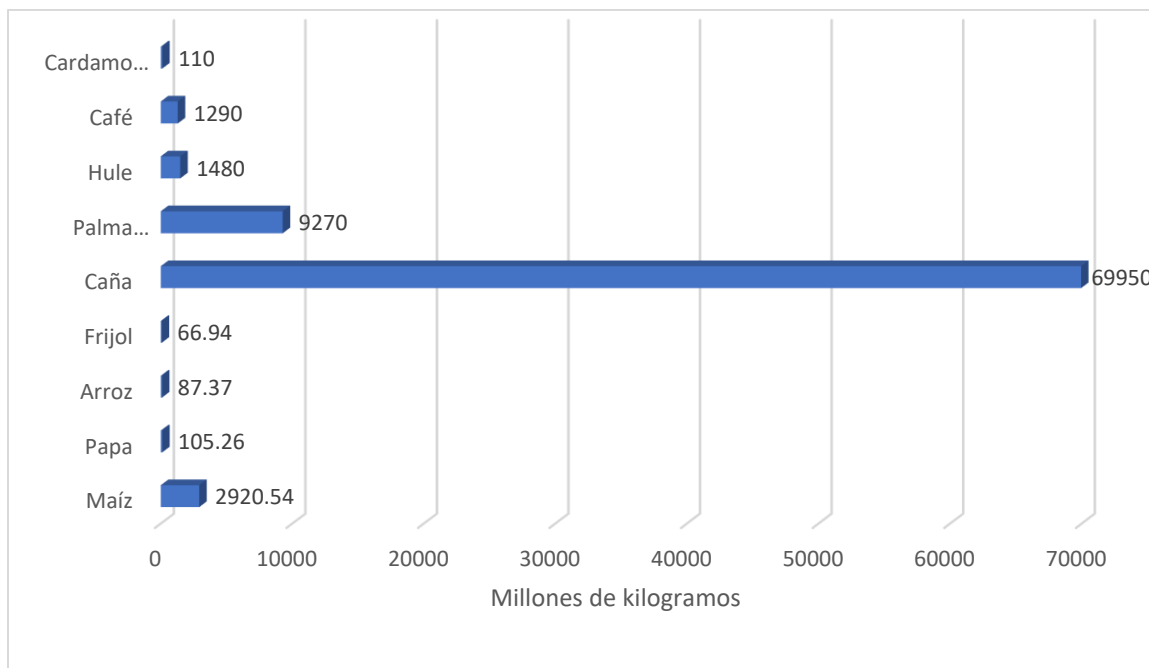
Cuadro 1. Rendimiento de producción por cultivo, tierra cultivada y cantidad de producción de los principales cultivos en Guatemala durante el 2014.

| Cultivo | Producción (millones de kilogramos) | Rendimiento (kg/m ²) | Tierra Cultivada (millones de m ²) |
|----------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|
| Arroz | 87.37 | 0.9083 | 96 |
| Frijol | 66.94 | 0.1203 | 556 |
| Maíz | 2,920.54 | 0.3565 | 8,192 |
| Papa | 105.26 | 1.8696 | 56 |
| Café | 1,290.00 | 0.3555 | 3,656 |
| Caña | 69,950.00 | 25.0818 | 2,789 |
| Cardamomo | 110.00 | 0.194 | 559 |
| Hule | 1,480.00 | 1.4643 | 1,008 |
| Palma Africana | 9,270.00 | 6.0671 | 1,527 |

Notas: (1) Esta información se obtuvo de la Encuesta Nacional Agropecuaria realizada por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el 2014.

Actualmente, la palma africana es uno de los principales cultivos a nivel nacional. Según la encuesta nacional del sector agropecuario, publicada por la INE en año 2015, la palma africana es el segundo cultivo permanente de mayor producción en Guatemala, con una producción en el 2014 de 92,700 millones de kilogramos (véase el Cuadro 1). El primero correspondía a la caña de azúcar, con una producción de 69,950 millones de kilogramos. Otros cultivos de gran producción en Guatemala corresponden a cultivos anuales tales como el maíz, papa, arroz. (INE, 2015)

Figura 1. Producción de cultivos en Guatemala para el año 2014.



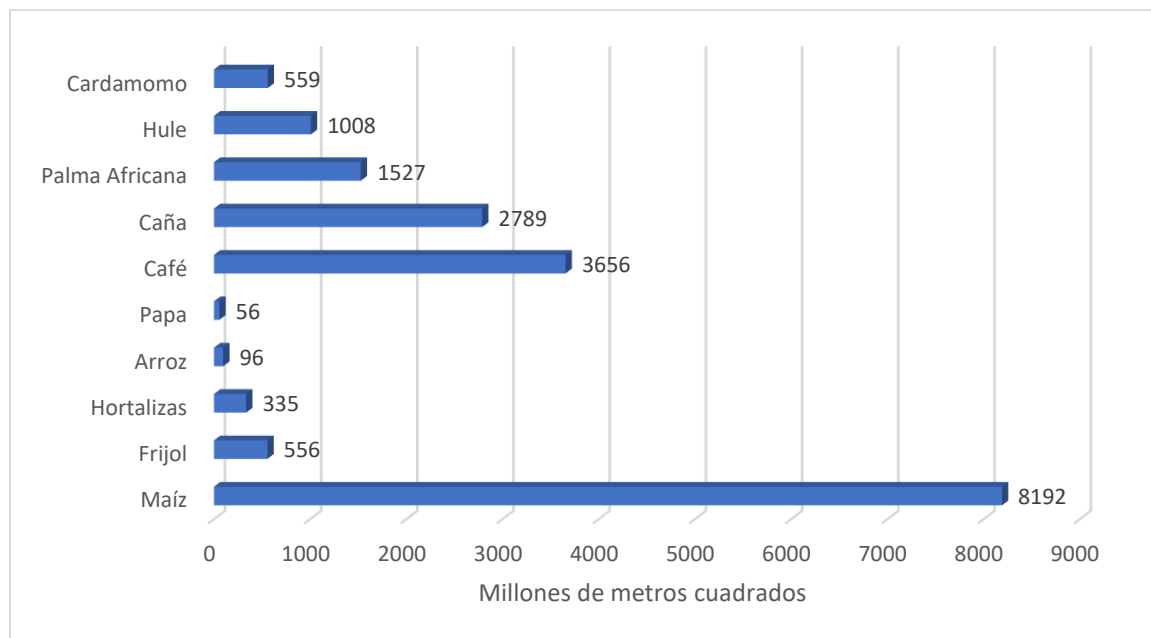
Notas: (1) Esta información se obtuvo de la Encuesta Nacional Agropecuaria realizada por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el 2014.

Un aspecto interesante de analizar es la relación de rendimiento, producción y tierra cultivada de la palma africana con relación a otros cultivos. Como se muestra en el Cuadro 1, la producción de palma africana durante el 2014 en Guatemala fue considerablemente mayor a la del resto de cultivos, con excepción de la caña de azúcar. A pesar de ello, debido a su alto rendimiento por hectárea (6.0671 kg/m^2), la tierra utilizada por la caña de azúcar fue significativamente menor a la tierra utilizada por cultivos de menor producción como el café y el maíz.

El alto rendimiento de la palma africana contribuye a que su riesgo como monocultivo disminuya. Además, la cantidad de tierra utilizada por el cultivo de palma africana en Guatemala es muy pequeña en relación con el total de tierra cultivable del país. Según datos de la INE (Instituto Nacional de Estadística) en el año 2014 se utilizaron 1.061×10^{10} metros cuadrados (1061 mil hectáreas) para cultivos permanentes, dentro de los cuales se encuentra la palma africana. Dicha cantidad de hectáreas solo representa el 14% de la tierra cultivable (7.35441×10^{10} metros cuadrados). Durante el año 2014, la cantidad cultivada de palma africana fue de 1,527 millones de metros cuadrados en Guatemala, lo cual representa un 14% de la tierra utilizada para

cultivos permanentes y un 2% del total de tierra cultivable para cultivos permanentes. Paralelamente, GREPALMA tiene registrado en su sitio web que el porcentaje de tierra ocupado por la palma africana es de 0.8%, un valor por debajo de cultivos como el café (2.8%) y el maíz (2.6%). (GREPALMA, 2017) Esto demuestra que en Guatemala el cultivo de palma africana está lejos de representar un riesgo de monocultivo para el país. (INE, 2015)

Figura 2. Superficie cultivada por tipo de cultivo en Guatemala durante el año 2014.



Notas: (1) Esta información se obtuvo de la Encuesta Nacional Agropecuaria realizada por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el 2014.

B. ACEITE CRUDO DE PALMA AFRICANA

El aceite crudo de palma africana se obtiene del mesocarpio de la palma. El mesocarpio es la parte interna del pericarpio o parte externa de una semilla. El aceite crudo de palma africana se extrae por procesos mecánicos o utilizando solventes. Una de sus principales características, en cuanto a composición química, es que posee una relación 1:1 de ácido oleico y ácido palmítico. Esta relación le proporciona una alta estabilidad al aceite crudo de palma, por lo que es bastante resistente a la oxidación. Además, el aceite de palma es rico en vitamina A, que corresponde a los carotenos, y vitamina E, correspondiente a los tocotrienoles y tocoferoles. Dichos carotenos, en

conjunto con taninos contenidos en el aceite, son los responsables de la coloración anaranjada del aceite crudo de palma africana. (Agro-Caribe, 2014)

En la industria, el uso del aceite crudo es muy amplio. Ejemplo de ello es su utilización para la producción de aceites y grasas comestibles, como los aceites de mesa o las margarinas. También son ampliamente utilizados en la industria de concentrado para animales, en la industria de jabones y la industria de cosméticos. (Agro-Caribe, 2014)

El aceite de palma se caracteriza por estar compuesto por dos componentes principales: estearina y oleína. La estearina o ácido esteárico es la parte sólida de aceite de palma. Las características de este componente permiten que la estearina sea una grasa muy estable. Además, se caracteriza por tener un punto de fusión de 51°C. Esta propiedad le permite tener aplicación en formulaciones alimenticias como la fabricación de mantecas y margarinas naturales sin necesidad de hidrogenación. La estearina de palma es el componente más estable de los componentes que se utilizan para la producción mantecas alimenticias. Estas mantecas son muy utilizadas en dicha industria, pues son necesarias en productos como panes, galletas, quesos y bases de helado cremoso. (Ortuño, 2006)

Otro componente principal del aceite de palma africana es la oleína. Este es su componente más ligero. Al igual que la estearina, la oleína es muy estable estructuralmente. Se caracteriza por retrasar la oxidación de forma natural, por lo que permite aumentar la vida de anaquel de los productos que la contienen. (Fife, 2007)

La oleína y estearina se separan en la industria con fraccionamiento. La fuerza motriz que se utiliza en dicha separación es la diferencia de puntos de fusión de ambos componentes. Dado que la estearina se funde a los 51°C y la oleína es líquida a temperatura ambiente, se separan por la formación de cristales de estearina al reducir la temperatura. La oleína se compone de un 55% aproximadamente de grasa insaturada. Esto se debe a que el ácido oleico contiene una sola insaturación en su cadena. (Fife, 2007)

C. ECONOMÍA

Un factor que siempre será primordial de analizar es el económico. Saber el precio del mercado del aceite crudo es importante para poder compararlo económicamente con otros aceites. Por ejemplo, para poder determinar qué proceso es más económico, un factor importante es el costo de la materia prima, pues corresponde a un gasto continuo de la empresa que estará directamente relacionado con la demanda de producción de la planta.

Actualmente se produce biodiésel de varias fuentes vegetales. Las más populares son aceite virgen vegetal y al aceite vegetal usado. Por ello, es importante conocer sus precios actuales de

venta en el mercado, para analizar la competitividad frente al aceite crudo de palma africana. El precio actual del aceite virgen refinado es de EU3.664/kg, lo cual corresponde a US\$4.38/kg. (ASAJA, 2017) Por otro lado, el precio promedio del aceite usado para el año pasado era de EU70/kg, lo cual equivale a US\$0.084/kg. (ANIAGA, 2016)

Según el FEDAPAL (Fundación de Fomento de Exportaciones de Aceite de Palma y sus derivados de Ecuador) el precio actual del aceite crudo de palma africana en el mercado mundial es de US\$740/t. Esto equivale a US\$0.740/kg de aceite crudo de palma. Como se observa, el precio del aceite crudo de palma se encuentra muy por debajo del precio del aceite virgen refinado. Esto se debe a que el proceso del aceite virgen refinado conlleva un proceso costoso de presión en frío. A continuación, se muestra un cuadro que compara los precios en el mercado del aceite crudo de palma africana, el aceite virgen convencional y el aceite usado promedio.

Cuadro 2. Comparación de precios de distintos aceites.

| Aceite | Precio en el mercado |
|-------------------------|----------------------|
| Crudo de Palma Africana | \$0.740 / kg |
| Aceite Refinado | \$4.38 / kg |
| Usado | \$0.084 /kg |

Notas: (1) La información fue obtenida de (ASAJA, 2017), (ANIAGA, 2016) y (FEDAPAL, 2017)

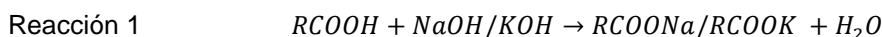
Así como se analizó el costo de la materia prima del biodiésel (aceite crudo de palma en este caso), también es importante analizar el costo del biodiésel a partir de otros combustibles. Actualmente el precio del biodiésel B100 en el mercado se encuentra entre GT Q5.81 y GT Q6.61 por litro (GT Q22 y GT Q25 por galón). El precio de la gasolina superior y regular actualmente es de GT Q23.51 y GT Q22.23 por galón. Como se distingue, el precio el biodiésel B100 es similar a los precios ofrecidos por la gasolina en el mercado. Sin embargo, dado que los motores en los que se puede utilizar el biodiésel (motores diésel) no son los mismos que los motores en los que se utiliza la gasolina, es mejor comparar el biodiésel con un combustible similar como es el caso del diésel. Hoy en día el diésel tiene un precio en Guatemala de GT Q5.28 por litro (GT Q19.99 por galón). Este precio es inferior al precio ofrecido por el biodiésel B100, lo cual complica su comercialización. La diferencia de precio del diésel y el biodiésel B100 es de pocos quetzales por galón, no obstante, cuando se compra el combustible en múltiples galones (lo cual es lo usual), la diferencia se hace más significativa en cuanto a costos. Este problema se puede solucionar al realizar mezclas del diésel con el biodiésel. Esto es posible dado que ambos tienen propiedades físicas y de combustión muy similares. Debido a ello, al mezclar ambos combustibles, no se produce una diferencia significativa en el rendimiento de combustión de un motor. Retomando el tema, al realizar mezclas de diésel con biodiésel, la comercialización del biodiésel se hace más atractiva pues el diésel absorbe parte del costo. Una mezcla común de estos combustibles es el biodiésel B25, el cual corresponde a 25% de biodiésel y 75% de diésel en volumen. (MEM, 2017)

Una de las principales oportunidades que presenta el biodiésel al intentar sustituir a los combustibles fósiles es su costo de producción. El costo del biodiésel radica principalmente en su materia prima, específicamente en el aceite vegetal. De hecho, como aproximación, del 60 al 75% del costo del biodiésel se debe a sus materias primas, ya que una gran parte de la tecnología actual para la producción del biodiésel está enfocada en el uso de aceite refinado, requiriendo procesos costosos para lograr alcanzar su grado de pureza. Una gran oportunidad para el biodiésel es la producción a partir de aceites vegetales crudos, evitando todo costo ligado a la refinación del aceite vegetal. (Anguebes, 2016)

Actualmente la producción de biodiésel a escala industrial se realiza principalmente a partir de aceites usados. El aceite usado es una materia prima técnicamente atractiva para la producción del biodiésel pues el aceite viene bastante libre de componentes que interfieren con la reacción de producción de biodiésel (transesterificación). El inconveniente con el aceite usado es su recolección. El aceite usado es proporcionado generalmente por negocios alimenticios, como cocinas o restaurantes. Estos no tienen un nivel de ventas o producción lo suficientemente grande como para poder abastecer a una planta industrial de biodiésel de una o pocas fuentes. Debido a ello, el aceite usado debe ser recolectado de una gran cantidad de negocios, lo cual hace que se complique su obtención, por los costos en dinero y tiempo de logística y transporte.

D. BIODIÉSEL

El inconveniente con la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales crudos es que los procesos para alcanzar un grado de pureza suficiente para poder producir biodiésel no están tan desarrollados como los procesos para producir aceite refinado. El aceite crudo tiene el inconveniente frente al aceite refinado que posee un alto grado de impureza, tiene altas concentraciones de ácidos grasos, agua e impurezas insolubles como jabones y ceras. Esto genera grandes problemas para los métodos convencionales de producción de biodiésel dado que los catalizadores básicos usualmente empleados para la transesterificación del biodiésel, reaccionan con los ácidos grasos del aceite crudo para formar jabones y agua. Dado que parte del catalizador es consumido en una reacción de competencia, la transesterificación del biodiésel termina siendo incompleta produciendo una mezcla de subproductos indeseados como monoacilglicerol, diacilglicerol, metil ésteres, glicerol, metanol y agua. Esta mezcla es difícil y costosa de separar, provocando que la rentabilidad del proceso baje. (Nduwayezu, 2015)



Otro gran problema del grado de impureza del aceite crudo es el agua contenida. El problema del agua es que participa de la reacción parásita mostrada en la Reacción 2, en la cual el agua reacciona en una hidrólisis con el biodiésel (mezcla de alquil ésteres) para formar nuevamente ácidos grasos. Esto es un problema debido a que la conversión del producto final baja considerablemente. (Nduwayezu, 2015)



Las anteriores dos reacciones de competencia muestran que los ácidos grasos son un problema para la producción de biodiésel a partir de aceite crudo. Entre otros problemas de dichos ácidos grasos destaca las propiedades de flujo en frío del biodiésel, las cuáles son función de la concentración de ácidos grasos en él. (Nduwayezu, 2015)

Este problema de los ácidos grasos debe ser abordado, sin lugar a duda, si se trabaja con un aceite crudo, dado que el mayor contenido del mismo corresponde a la generación de jabones durante la producción de biodiésel. Los ácidos grasos son producidos de forma natural en los aceites vegetales. Además, en el caso específico del aceite de palma, el contenido de ácidos grasos puede aumentar aún más debido a la acción de enzimas de la fruta de palma y a la acción de lipasas microbianas. (Nduwayezu, 2015)

Otro problema del aceite crudo, además de los ácidos grasos, son los mono-glicéridos y los glucósidos esteroides, los cuales son motivo de precipitaciones en el biodiésel, ya que precipitan principalmente cuando el biodiésel está frío. Por esta razón en muchas ocasiones el biodiésel producido pareciera tener buena calidad y nivel de pureza cuando está recién producido, pero cuando es almacenado y enfriado, dichas precipitaciones empiezan a ocurrir. Dichas precipitaciones son el origen de obstrucciones de filtro incluso por debajo del punto de turbidez del biodiésel (cloud point). Adicional a esto, el aceite crudo generalmente suele tener otras impurezas sólidas tales como fibras, lodos, semillas y hojas, que deben removerse previo a cualquier tratamiento. (Nduwayezu, 2015)

La presencia de los ácidos grasos en el aceite crudo de palma es un problema por las razones descritas anteriormente, sin embargo, puede ser visto también como una oportunidad. Uno de los métodos empleados para producir biodiésel a partir de aceite crudo utiliza una esterificación ácida de Fischer previa a la transesterificación, para convertir los ácidos grasos en alquil-ésteres. En otras palabras, este método aprovecha los ácidos grasos para su conversión en biodiésel. Debe tomarse en cuenta que es necesario realizar un análisis de costos ante esta oportunidad. Debe estudiarse si la producción de biodiésel a partir de ácidos grasos con el método

descrito justifica la inversión de implementar la esterificación ácida que convierte los ácidos grasos en metil ésteres (biodiésel). Esto depende principalmente del número ácido. De forma general, se recomienda realizar dicha esterificación ácida previa a la transesterificación (reacción de producción del biodiésel), cuando el número ácido del aceite disponible supera el 3%. (Tapia, 2016)

Actualmente existen varios procesos y tecnologías desarrolladas para la producción del biodiésel. A continuación, se muestra un cuadro comparativo de los aspectos más generales los métodos más empleados.

Cuadro 3. Comparación de los métodos más empleados en la actualidad para la producción de biodiésel.

| Método | Ventajas | Desventajas |
|---|---|---|
| [1] Transesterificación con catálisis básica (TCB) | La tecnología más utilizada. El proceso más económico Rendimiento de hasta 98% Bajas temperaturas y presiones de operación. Utilización de equipos comunes. | Necesidad de un aceite crudo de muy alta pureza o de un aceite refinado. Necesidad de un aceite bajo en contenido de agua y ácidos grasos. |
| [2] Transesterificación con un proceso previo de esterificación por catálisis ácida | No necesita un aceite refinado o un aceite crudo de alta pureza. El aceite puede contener ácidos grasos. | Más corrosiva que TCB Equipo alto costo. La esterificación produce agua. Es necesario realizar dos reacciones distintas. |
| [3] Transesterificación catalizada por ácido | No necesita un aceite refinado o un aceite de alta pureza. El aceite puede contener ácidos grasos | Reacción muy lenta (hasta 24 horas) Mayor consumo energético. |
| [4] Transesterificación enzimática | Produce menos agua. Consume menos Energía Altas eficiencias. Alta Selectividad | Las enzimas son costosas de producir. Se requiere un gran control en las condiciones de reacción. |

Continuación Cuadro 3

| Método | Ventajas | Desventajas |
|--|--|--|
| [5] Producción de biodiésel usando catalizadores sólidos | <p>Recuperación de los catalizadores.</p> <p>Producción más pura de biodiésel.</p> <p>Altos rendimientos.</p> <p>Menor selectividad con agua y ácidos grasos.</p> | <p>Requiere de duras condiciones de operación.</p> <p>Los catalizadores sólidos se desactivan después de un número de corridas.</p> |
| [6] Método de metanol supercrítico | <p>No hay necesidad de catalizador.</p> <p>Eficiencias de hasta el 100%</p> <p>Amigable con el medio ambiente.</p> <p>No necesita neutralizar, lavar o secar.</p> <p>El agua y los ácidos grasos no perjudican la reacción.</p> <p>Tanto los ácidos grasos como los triglicéridos son convertidos simultáneamente a biodiésel.</p> | <p>Necesidad de un tanque muy grande re reacción debido a la gran cantidad de alcohol requerido en relación con el aceite (hasta de 42:1)</p> <p>Altas presiones de operación (hasta de 80 atm)</p> <p>Altas temperaturas de operación (350-400°C)</p> <p>Condiciones supercríticas.</p> <p>Proceso complicado para el metanol.</p> <p>Altos costos.</p> |
| [7] Método ultrasónico y de microondas | <p>Alta eficiencia</p> <p>Muy pocos residuos.</p> <p>No hay subproductos.</p> | <p>Necesidad de una profunda investigación para poder aplicarlo a escalas mayores a las de laboratorio.</p> |

(Nduwayezu, 2015)

De los métodos mostrados en el Cuadro anterior, los primeros tres son los más implementados actualmente. Debido a ello, su tecnología se encuentra más desarrollada que el resto de métodos. De los tres métodos mencionados, el más utilizado es el primero, pues es el que representa un menor tiempo de reacción. El problema con el primer método es que no puede trabajar con aceites que tengan ácidos grasos, lo cual es bastante común. Por ello, en este trabajo se estudian las ventajas y desventajas de producir biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana a escala laboratorio de los primeros tres métodos del Cuadro 3.

E. REACCIONES INVOLUCRADAS

Según a lo anterior, los métodos de producción de biodiésel más empleados actualmente conllevan reacciones de esterificación y transesterificación. A continuación se describirán dichas reacciones para su mayor comprensión.

1. ESTERIFICACIÓN DE FISCHER. El propósito de la esterificación de Fischer es convertir los ácidos grasos contenidos en el aceite crudo en alquil-ésteres (componentes del biodiésel). Esta reacción requiere un ácido carboxílico (en este caso, ácidos grasos) y un alcohol (que generalmente es metanol o etanol) como reactivos. Por lo tanto, lo que hace la reacción de Fischer, de forma general, es reemplazar el grupo hidroxilo de un ácido carboxílico por un grupo alcoxi (OR), a manera de producir un éster. (Wade, 2012)

La reacción es catalizada por medio ácido, generalmente ácido sulfúrico o ácido clorhídrico, para producir una mezcla de alquil ésteres y agua. La razón por la que no se utilizan catalizadores alcalinos en esta reacción se debe a que dichos catalizadores reaccionan con los ácidos grasos para formar jabones y agua (véase la Reacción 1). Sería necesario un aceite con un bajo contenido en ácidos grasos, cosa que no ocurre en el aceite crudo, para realizar una esterificación por catálisis básica. (Proaño, 2015)

El objetivo de hacer reaccionar los ácidos grasos del aceite crudo, previo a la transesterificación, es evitar que los ácidos grasos formen jabones y agua al reaccionar con el catalizador básico utilizado en la transesterificación. Esto se muestra en la reacción de competencia mostrada en la Reacción 1. Además, otro propósito de llevar a cabo la esterificación es aumentar el rendimiento del proceso de producción, debido a que se estaría produciendo biodiésel también a partir de dichos ácidos grasos. (Nduwayezu, 2015)

2. TRANSESTERIFICACIÓN. La segunda reacción, que sigue a la esterificación, es la transesterificación. Esta reacción es la más utilizada a nivel global para la producción de biodiésel y puede ser catalizada por medio ácido o básico. Consiste principalmente de la reacción de un éster con un alcohol para producir un éster y un alcohol distintos. Según lo anterior, la transesterificación sustituye un grupo alcoxi por otro para producir un éster a partir de otro distinto. En este caso, se pretende la conversión del producto, por lo que se recomienda utilizar un exceso de alcohol como reactivo, para desplazar el equilibrio hacia los productos, según el principio de Le Chatelier. (Wade, 2012)

En el caso específico del biodiésel los ésteres utilizados como reactivo son triglicéridos contenidos en el aceite vegetal, y el alcohol empleado es generalmente metanol. Esta reacción al ser catalizada por medio ácido o básico produce glicerol y una mezcla de alquil ésteres (biodiésel). El catalizador utilizado depende de la acidez del aceite vegetal empleado en la reacción. Si la acidez se encuentra entre 0 a 2% el catalizador utilizado es básico, generalmente hidróxido de sodio o hidróxido de potasio. En el caso que la acidez se encuentre entre 2 y 3%, se añade una mayor cantidad de catalizador básico: entre 0.15-0.18% en masa de catalizador. Cuando la acidez es superior al 3% en el aceite, es necesario realizar un tratamiento ácido previo, como la esterificación ácida de Fischer descrita en la sección anterior. (Nduwayezu, 2015)

Es muy importante verificar que el aceite que se utilice como reactivo en la transesterificación, no contenga agua, ni ácidos grasos libres, debido a que se llevaría a cabo una serie de reacciones de competencia, como saponificaciones y esterificaciones. Esto disminuye considerablemente el rendimiento de reacción.

F. PROPIEDADES FÍSICAS

Con el objetivo de poder comparar posteriormente las propiedades del aceite crudo de palma y el biodiésel obtenidos, a continuación, se muestran algunas propiedades de relevancia para este trabajo.

Cuadro 4. Propiedades físicas del aceite crudo de palma y biodiésel

| Propiedad | Aceite crudo de palma | Biodiésel |
|------------------------------------|-----------------------|---------------|
| Densidad (kg/m ³) | 800-899 | 860-900 |
| pH | 5 | 6-8 |
| Viscosidad Cinemática a 40°C (cSt) | 40.24 | 3.5-5 |
| Índice de Refracción | 1.4440-1.4560 | 1.4450-1.4548 |
| Peso Molecular Promedio | 850 | 296 |

Nota: (1) El índice de refracción del biodiésel se obtuvo de (Nita, 2013). La viscosidad cinemática, la densidad y el peso molecular aproximado del biodiésel se obtuvieron de la norma inglesa de estándares de calidad del biodiésel BS 14214 2010. El pH del biodiésel se obtuvo de (Nduwayezu, 2015). La viscosidad cinemática y densidad del aceite se obtuvo de (CHEMPRO, 2017). El índice de refracción del aceite y su peso molecular promedio se obtuvieron de (Ortega, 1993).

Otro aspecto por discutir son las toxicidades del hidróxido de sodio y el ácido sulfúrico, y sus propiedades. Esto es importante para tomar en cuenta el riesgo del manejo de estos

resactivos, y su disposición y almacenamiento en una planta de producción. En las reacciones de transesterificación se manejan ambos reactivos a muy altas purzas (99% m/m), por lo que se debe tener cuidado con el manejo de los mismos. Ambas sustancias son solubles en agua y presentan riesgos de corrosión e irritación para el ser humano. No obstante, el ácido sulfúrico es considerablemente más corrosivo que el hidróxido de sodio, debido a su gran capacidad oxidativa. Por esta razón los materiales que se pueden utilizar para el manejo de un ácido sulfúrico de tan alta pureza son escasos y costos. Ejemplo de ello es el acero inoxidable en sus diferentes tipos y presentaciones. Estos de igual forma se oxidan por acción del medio altamente ácido, por lo que requiere una reinversión constante en los equipos de manejo y almacenamiento del ácido sulfúrico. El hidróxido de sodio por otro lado, es menos corrosivo y oxidativo, por lo que los materiales que se pueden utilizar para su manejo son más numerosos. Ejemplo de ello es el acero al carbón, un material más económico que el acero inoxidable. (Kirck-Othmer, 2014)

V. ANTECEDENTES

Es importante aclarar que la producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma no es algo nuevo. Se han realizado investigaciones en distintos lugares del mundo acerca de este tema. La mayor cantidad de dichas investigaciones han sido realizadas a escala laboratorio o planta piloto, ya que todavía es necesario realizar investigación para optimizar su proceso de producción, minimizando los costos y maximizando las ganancias. Esto con el objetivo que la producción de biodiésel B100 a partir de aceite crudo de palma logre ser más competitivo económicamente en relación con la producción de otros combustibles como el diésel o la gasolina.

Un estudio realizado por el Instituto Científico de Tecnología e Innovación de Ruanda (*Institute Scientific and Technological Research*) en el año 2015 trabajó con la producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana a escala planta piloto. El aceite crudo de palma que se trabajó en dicho estudio tenía un número ácido de 16.9%. En su metodología, se explica que se realizaron tratamientos previos al aceite crudo (filtración y evaporación de humedad) para remover componentes que afectaran la reacción de transesterificación. Además, se realizó una esterificación ácida previa para reducir los ácidos grasos. La transesterificación fue llevada a cabo con catálisis alcalina con hidróxido de potasio y metanol, obteniendo un rendimiento de proceso de 90.4%. (Nduwayezu, 2015)

Otro estudio realizado en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de México en el año 2016 también realizó una investigación sobre la producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana a escala laboratorio. En dicho trabajo se estudió la variación de las condiciones de operación de la reacción de transesterificación de biodiésel, y su relación con el rendimiento de producción de dicho combustible. Para ello se utilizó un análisis factorial de la cantidad de catalizador alcalino (hidróxido de sodio) utilizado en la transesterificación, la temperatura de reacción y la relación de metanol-aceite. En el artículo se llegó a la conclusión que, según su metodología y análisis de resultados, el mejor rendimiento de producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana (98.45%) se obtuvo para una relación molar metanol-aceite de 6.7:1, una concentración másica de 0.75% de hidróxido de sodio en la transesterificación y una temperatura de reacción de 58°C. (Tapia, 2016)

Una investigación similar a la anteriormente descrita fue realizada la Universidad Autónoma del Carmen de México en el año 2016. En esta investigación se analizó la variación del tiempo de reacción, temperatura de reacción y cantidad de catalizador alcalino (hidróxido de sodio al 99%) según el rendimiento de producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana.

En dicho trabajo se llegó a la conclusión que el mejor rendimiento de producción (90%) se obtuvo para un tiempo de reacción de 150 minutos, una temperatura de reacción de 64.5°C y una concentración de hidróxido de sodio al 99% m/m de 2.5% m/m, en relación con la masa del aceite empleado. (Anguebes, 2016)

El biodiésel se puede producir a partir de una gran variedad de aceites vegetales, no solamente de aceite crudo de palma africana. En el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala, se produce biodiésel a escala planta piloto a partir de aceites usados de fritura. A continuación, se muestra un cuadro de los resultados que los ingenieros encargados de dicha planta obtuvieron en cuanto a rendimiento de producción de biodiésel durante un estudio realizado en el año 2014.

Cuadro 5. Rendimientos de producción de biodiésel obtenidos en la Universidad del Valle de Guatemala para aceite usado de fritura en la planta de producción de biodiésel del Departamento de Ingeniería Química.

| Lote | Rendimiento (p/p) |
|----------|-------------------|
| 1 | 87.73% |
| 2 | 87.94% |
| 3 | 91.79% |
| 4 | 74.42% |
| 5 | 82.16% |
| 6 | 80.06% |
| 7 | 79.09% |
| 8 | 78.57% |
| 9 | 88.97% |
| 10 | 88.68% |
| 11 | 74.07% |
| 12 | 85.97% |
| 13 | 95.60% |
| Promedio | 84.79% |

(Zambrano, Rossi y Hernández, 2014)

VI. METODOLOGÍA

Esta metodología constó de cinco secciones principales: caracterización del aceite crudo de palma africana, tratamiento del aceite crudo, tratamiento ácido del aceite (esterificación ácida), producción de biodiésel a partir de una reacción de transesterificación y purificación del biodiésel obtenido. A continuación, se describen cada una de estas secciones.

A. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE Y BIODIÉSEL

La caracterización del aceite consistió en realizar una serie de pruebas analíticas fisicoquímicas al aceite crudo. El objetivo de esto fue determinar las propiedades del aceite, para saber cómo tratarlo. Cada prueba realizada se realizó en triplicado como mínimo. Las técnicas y métodos para la caracterización del aceite y biodiésel fueron:

1. **ÁCIDOS GRASOS LIBRES (NÚMERO ÁCIDO).** Esta prueba se realizó en el aceite después de ser tatado. Para esta determinación se utilizó el método oficial de la AOAC 940.28. La preparación de la muestra consistió en calentar 7.05 gramos de aceite a 10°C por encima del punto de fusión del aceite de palma. Dado que el punto de fusión de dicho aceite se encuentra entre 30.8-37.6°C, se recomienda calentar dicho aceite a 50°C. Si el aceite es claro y no contiene sedimentos, se continuó con el procedimiento. De lo contrario, si el aceite es turbio o contiene sedimentos, se filtró hasta lograr tener un aceite claro libre de sedimentos. (AOAC, 2006)

Para la determinación se pesó aproximadamente 7.05 g de aceite crudo en un contenedor de 250 mL. Las balanzas utilizadas fueron una *OHAUS Valor 3000xtreme* con capacidad máxima de 2000 gramos y otra balanza *BOECO Germany* con una capacidad máxima de 220 gramos. Se neutralizó en otro recipiente 50 mL de alcohol con 2 mL de indicador de fenolftaleína y suficiente solución NaOH 0.1 N para producir una solución rosa débil permanente. Luego se agregó dicho alcohol al contenedor de 250 mL y se tituló con solución NaOH 0.25 N hasta que la solución se coloreó de rosa débil durante un tiempo superior a un minuto. La cantidad de mL que se empleó en esta última titulación corresponde al porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite crudo analizado. (AOAC, 2006).

2. **HUMEDAD Y MATERIA VOLATIL.** Esta prueba se realizó al aceite crudo después de ser tratado (ver sección de Pretratamiento en Metodología) y al biodiésel producido. El procedimiento utilizado corresponde al método oficial de la AOAC 926.12. Se pesó 5 gramos de muestra y se colocó en un recipiente de erlenmeyer. La balanza utilizada fue una *BOECO Germany*. Luego se calentó la muestra a 90°C por una hora. Finalmente se enfrió la muestra para determinar su reducción de masa final. Alternativamente se puede utilizar una balanza de humedad. La materia perdida se reporta como porcentaje humedad y materia volátil. (AOAC, 2006)

3. **DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA.** La determinación se realizó para las muestras de aceite crudo tratado y para el biodiésel producido. Se utilizó el método D445-06 de la ASTM. Básicamente consistió en medir el tiempo que el líquido pasa a través de un capilar bajo el efecto de la fuerza de la gravedad. El capilar corresponde al de un viscosímetro calibrado. La viscosidad se obtuvo del producto entre la constante del viscosímetro a la temperatura de medición y el tiempo que necesitó el líquido para llegar de una marca del capilar a la otra. El viscosímetro utilizado fue un *Cannon Frenske Routine Viscosimeter 200*. (ASTM, 2000)

4. **DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD.** La determinación se realizó para las muestras de aceite y biodiésel. Se utilizó el método 985.19 de la AOAC. Consistió en la utilización de un picnómetro graduado. Se colocó la muestra dentro del picnómetro y se obtuvo su masa. La diferencia entre la lectura y la tara del picnómetro corresponde a la masa de la muestra. El cociente de este valor con el volumen graduado del picnómetro corresponde a la densidad de la muestra. El picnómetro empleado fue un picnómetro *Brand Duran* de 25.210 cm³ de volumen. (AOAC, 2006)

5. **ÍNDICE DE REFRACCIÓN.** Este análisis se realizó a las muestras de aceite y biodiésel. El método empleado fue el 921.08 de la AOAC. Consiste en realizar la medición en un refractómetro con un baño térmico a 20°C. El refractómetro utilizado fue un *ATAGO RX-5000* con un baño térmico de marca *ATAGO 60-C3*. (AOAC, 2006)

6. **POTENCIAL DE HIDRÓGENO.** Se realizó este análisis para las muestras de aceite crudo, aceite esterificado, lavados de biodiésel y biodiésel producido. Consistió en medir el pH de la muestra utilizando potenciómetro digital. El potenciómetro empleado fue un *AB 15/15+ Fischer Scientific*.

7. **PRESENCIA DE ACEITE EN BIODIÉSEL (PRUEBA 3/27).** Esta prueba cualitativa se realizó en el biodiésel producido para determinar si se encuentra libre de aceite. Se empleó el método de Jan Warneqvist de solubilidad del metanol. Consistió en agregar a un tubo de ensayo 27 mL de metanol y 3 mL de biodiésel y agitar la mezcla vigorosamente. Luego se observó a contra luz el recipiente. Si no se observa una separación de fases o pequeñas emulsiones, implica que el biodiésel analizada se encuentra libre de aceite. (Purcella, 2008)

8. **PRESENCIA DE AGUA Y SEDIMENTOS.** Esta prueba se realizó para determinar la cantidad de agua y sedimentos en muestras de aceite y biodiésel. Se utiliza el método de D2709-06 de la ASTM. Consistió en colocar la muestra en tubos de centrifuga de 100 mL en posiciones opuestas del disco de rotación para que el giro fuera balanceado. La temperatura debe estar entre 21 y 32°C. El proceso se realizó por 10 minutos a una velocidad radial suficiente para producir una fuerza centrífuga relativa (rcf) de 800 ± 60 en la punta de los tubos de muestreo. Dado que la centrifuga utilizada tiene un diámetro de disco de 50 cm, la velocidad radial requerida fue de 100 rpm. La centrifuga utilizada fue una *Cole-Parmer*. (ASTM, 2000)

9. **PUNTO DE FUSIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN ACEITE CRUDO.** Esta prueba se realizó a los sólidos suspendidos en el aceite crudo. La prueba se realizó con el objetivo de poder tener una mayor certeza de la identidad de dichos sólidos según su punto de fusión. Para ello se filtró el aceite crudo de palma con un colador metálico y se recolectó una muestra de 50 gramos en Beakers de 100 mililitros. Luego se calentó la muestra en una estufa y, con ayuda de un termómetro de bulbo, se fue aumentando la temperatura progresivamente hasta observar en qué punto se fundía el sólido analizado.

Cuadro 6. Resumen de los métodos empleados para la caracterización del aceite crudo de palma y el biodiésel.

| Prueba | Método Empleado |
|---|---------------------|
| Ácidos grasos gibles (número ácido) | AOAC 940.28 |
| Humedad y materia volátil | AOAC 926.12 |
| Viscosidad cinemática | ASTM D445-06 |
| Densidad | AOAC 985.19 |
| Índice de refracción | AOAC 921.08 |
| Potencial de hidrógeno | - |
| Presencia de aceite en biodiésel (3/27) | Jan Warneqvist Test |
| Presencia de agua y sedimentos | ASTM D2709-06 |

*Nota: Las condiciones de operación y la metodología se especifican en cada método.

B. PRETRATAMIENTO

De acuerdo con las propiedades determinadas del aceite crudo y su apariencia, se procedió con su tratamiento. Se realizó 3 lotes de aceite. Los primeros dos lotes fueron de aproximadamente de 500 g de aceite crudo y el tercero fue de 2000 g. Además, los primeros dos se caracterizaron por tener pocos sólidos suspendidos en relación con el tercero.

Es importante hacer la aclaración de lo que se refiere en este trabajo con un aceite con pocos sólidos suspendidos y un aceite con muchos sólidos suspendidos. El aceite crudo de palma que se utilizó en este trabajo se extrajo de un tonel en donde dicho aceite se almacenaba. El aceite extraído de la parte superior del tonel tenía pocos sólidos suspendidos, mientras que el extraído del fondo del tonel tuvo una mayor cantidad de dichos sólidos suspendidos. El criterio utilizado para indicar si la cantidad de sólidos suspendidos en el aceite fueron pocos o muchos, fue puramente visual. El aceite con pocos sólidos suspendidos era una mezcla en donde se lograban distinguir visualmente dos fases: la fase sólida blanca que correspondía a los sólidos suspendidos, y la fase líquida anaranjada que correspondía al aceite de palma. Por otro lado, el aceite con muchos sólidos suspendidos era una mezcla en donde no se lograba distinguir visualmente las dos fases. La apariencia de esta mezcla era del de una pasta amarillenta viscosa. Refiérase a las figuras 7 y 8 de la sección de Figuras en Anexos, para observar la diferencia entre un aceite crudo con pocos sólidos suspendidos y con muchos sólidos suspendidos.

Para un aceite crudo con pocos sólidos suspendidos se procedió primero con una sedimentación en un recipiente apropiado (beaker de 1000 mL) durante 24 horas. Luego se decantó el aceite sobrenadante para separarlo de los sólidos sedimentados. Para aceites con muchos sólidos suspendidos, la sedimentación no se empleó pues después de 36 horas no se presentó ningún cambio visual en la composición de la suspensión.

Después de la sedimentación y decantación, el aceite crudo se filtró utilizando un tamiz de 0.5-1 mm. Este procedimiento también aplicó para los aceites muy turbios que no pudieron ser sedimentados en un periodo corto de tiempo. En esta filtración se utilizó un colador metálico con una abertura de aproximadamente 0.5-1 mm para retener sólidos grandes que se encuentren suspendidos en el aceite. El aceite filtrado se colectó en un beaker de 1000 mL.

A continuación, se realizó una filtración al vacío del aceite obtenido anteriormente. El objetivo de esto fue retener los sólidos suspendidos de menor tamaño de partícula. Fue necesario un Kitasato, un embudo Bücher, una manguera de plástico, papel filtro y sistema de vacío para llevar

a cabo este proceso. La siguiente etapa consistió en centrifugar las muestras para terminar de recuperar los sólidos suspendidos de menor tamaño en el aceite. La centrifuga utilizada fue una *Damon/IEC Division Centrifuge*. El proceso se llevó a cabo a 2000 rpm por 10 minutos en frascos de 50 mL. La etapa final consistió en realizar una evaporación atmosférica durante 4 horas para remover el agua contenida del aceite crudo. Se utilizó una estufa magnética marca *Thermo Scientific* a 400 rpm y se mantuvo la temperatura entre 90 y 100°C durante la evaporación para asegurar que el agua se evapore. No se sobrepasó los 110°C para no dañar la estructura química del aceite. (Alkabbashi, 2007)

C. ESTERIFICACIÓN ÁCIDA

Con el aceite tratado, se realizaron 8 producciones de biodiésel. De dichos 8 lotes de producción, solo 4 llevaron a cabo una esterificación ácida. El objetivo de esto fue comparar la influencia de este tratamiento ácido sobre el rendimiento de producción. La esterificación ácida se hace necesaria si el número ácido del aceite supera el 3% en acidez. Independientemente de ello, se realizó dicha esterificación para los primeros 4 lotes. La reacción se dió a 70°C y a presión atmosférica en un recipiente con sistema de reflujo y agitación por un tiempo máximo de 3 horas. (Pisarello, 2010) Las cantidades de metanol y ácido sulfúrico que se agregaron fueron las siguientes: 11% de metanol al 99.9% (anhidro) y 0.8% de ácido sulfúrico al 96%, con respecto a la masa del aceite. La cantidad promedio de aceite crudo utilizada por lote fue de 120 gramos. Se utilizó un agitador magnético con sistema de calentamiento (estufa magnética) durante el tiempo de reacción, para que esta se mantuviera a 440 rpm y 70°C. (Nduwayezu, 2015)

Cuando concluyó el tiempo de esterificación, se trasladó el aceite a un embudo de decantación. Se dejó reposar la mezcla durante 1 hora para lograr separar del aceite la mayor cantidad de agua y demás componentes formados. Finalmente se realizó una evaporación atmosférica como la descrita en la sección de Pretratamiento para eliminar la mayor cantidad de agua antes de la transesterificación. (Nduwayezu, 2015)

A manera de comparar, se realizaron dos variantes para la esterificación ácida en este trabajo. Como se mencionó, solamente se realizó el tratamiento ácido de esterificación para los primeros 4 lotes de producción de biodiésel. Los últimos 4 lotes no llevaron dicho tratamiento ácido, para analizar su influencia sobre el rendimiento del proceso de producción de biodiésel (eficiencia). De forma similar, de los 4 lotes que conllevaron esterificación ácida, solo los lotes 3 y 4 llevaron un proceso de secado entre dicho tratamiento ácido y su posterior transesterificación. Nuevamente, esto se realizó para estudiar la influencia del mencionado proceso de secado entre la esterificación y la transesterificación sobre el rendimiento de producción. Dicho proceso de secado se llevó a

cabo en una estufa magnética marca *Thermo Scientific* a 440 rpm, 90°C, durante 4 horas. A continuación, se muestra un cuadro con las variantes realizadas en este trabajo para la producción de biodiésel.

Cuadro 7. Identificación de las variantes aplicadas en los 8 lotes de producción de biodiésel empleadas en este trabajo.

| Lote | Tipo de catalizador | Esterificación Ácida | Secado entre esterificación y transesterificación |
|------|---------------------|----------------------|---|
| 1 | Básico | SÍ | NO |
| 2 | Básico | SÍ | NO |
| 3 | Básico | SÍ | SÍ |
| 4 | Básico | SÍ | SÍ |
| 5 | Básico | NO | - |
| 6 | Básico | NO | - |
| 7 | Ácido | NO | - |
| 8 | Ácido | NO | - |

Notas: (1) El catalizador básico fue NaOH al 99% m/m y el catalizador ácido fue H₂SO₄ al 99% m/m.

D. TRANSESTERIFICACIÓN

Para los lotes en donde se realizó una esterificación ácida (1-4), se realizó este procedimiento después de haber llevado a cabo el procedimiento descrito en el apartado anterior (Esterificación). Para los lotes que no se realizó una esterificación ácida (5-8), se realizó este procedimiento después de haber sido tratado el aceite crudo. La reacción se llevó a cabo en un sistema de reflujo a presión atmosférica. Para ello el aceite se colocó en un balón de 3 bocas y se agregaron las siguientes cantidades de hidróxido de sodio y metanol: se agregó metanol al 99.9% en una relación 6.7:1 molar con respecto al aceite (aproximadamente el 18.40% m/m de la masa utilizada de aceite) , y se agregó suficiente catalizador de NaOH a manera de alcanzar una concentración de 0.75% en masa en el medio. La cantidad de aceite promedio utilizada en cada corrida fue de 120 gramos. Con ello, se llevó a cabo la reacción durante 3 horas a una temperatura de 60°C utilizando un sistema de calentamiento (estufa magnética) a 440 rpm. (Tapia, 2016)

Para los últimos dos lotes de producción (7 y 8) se realizó la reacción con un catalizador ácido: ácido sulfúrico al 99% m/m. Para ello se utilizó una relación molar de metanol de entre 6 y 8:1 con respecto a la masa del aceite. Se utilizó además un 0.40% de solución de ácido sulfúrico al 99% en masa, en relación a la masa del aceite utilizado. El sistema de balón de tres bocas y sistema

de calentamiento y agitación fue el mismo que el empleado en la transesterificación alcalina de los lotes 1-6. (Monsalve, 2017)

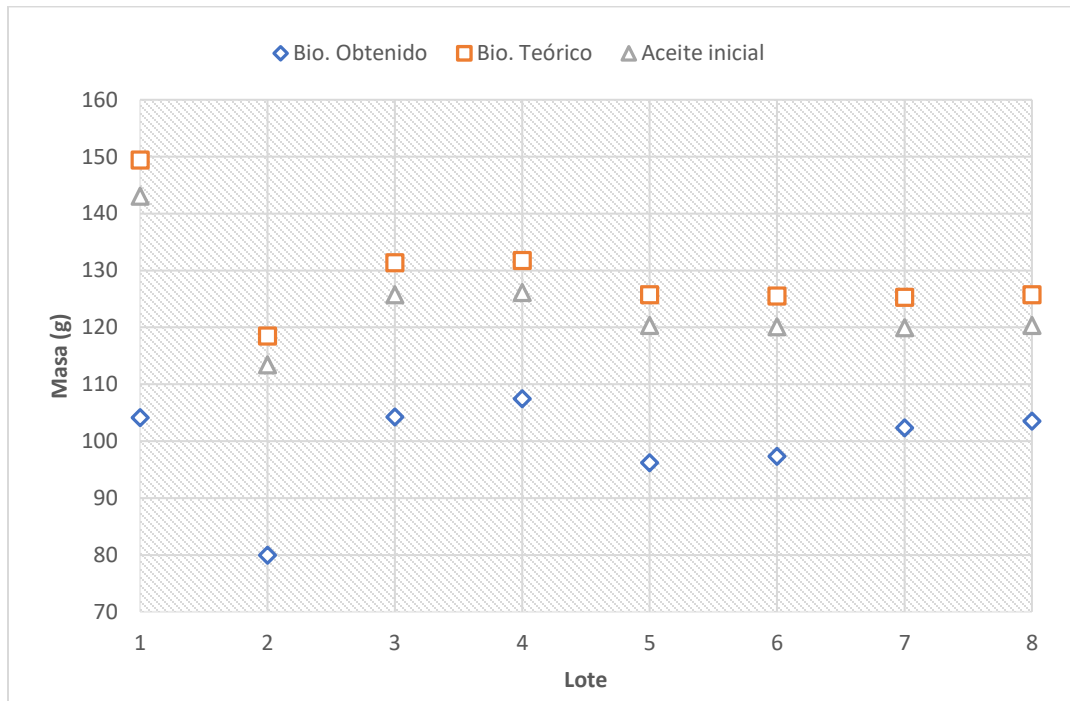
E. PURIFICACIÓN DEL BIODIÉSEL

Este procedimiento se realizó para los 8 lotes de producción de biodiésel. Posterior a la transesterificación, se separó el biodiésel producido del glicerol y demás componentes en la mezcla. Para ello, primero se trasladó la mezcla a un embudo de decantación. Después de dejar asentar por un periodo de 24 horas, se separó el biodiésel por diferencia de densidades. Dentro del embudo de decantación se realizó el proceso de lavado del biodiésel. En la parte superior del embudo, se agregó agua con un aspersor y se permitió que esta atravesara el biodiésel hasta llegar al fondo del recipiente. Luego se separó el agua de lavado por decantación. Dado que la cantidad de agua de lavado no debe exceder el 5% m/m de la masa del biodiésel a lavar, se midieron numerosas veces la masa que cada disparo del aspersor de agua proporcionaba. Con ello se obtuvo un valor promedio de la cantidad en masa de agua que se obtenía con cada disparo del aspersor.

Se midió el pH del biodiésel con un potenciómetro *AB 15/15+ Fischer Scientific* para determinar si alcanzó el pH neutro. Se repitió este proceso hasta que se alcanzó el pH deseado. Posteriormente, se sometió el biodiésel lavado a un secado atmosférico para remover el agua retenida por el proceso de lavado. Se mantuvo la temperatura entre 110 y 120°C para asegurar la evaporación del agua. No se sobrepasaron los 130°C para no dañar la estructura química del biodiésel. (Nduwayezu, 2015)

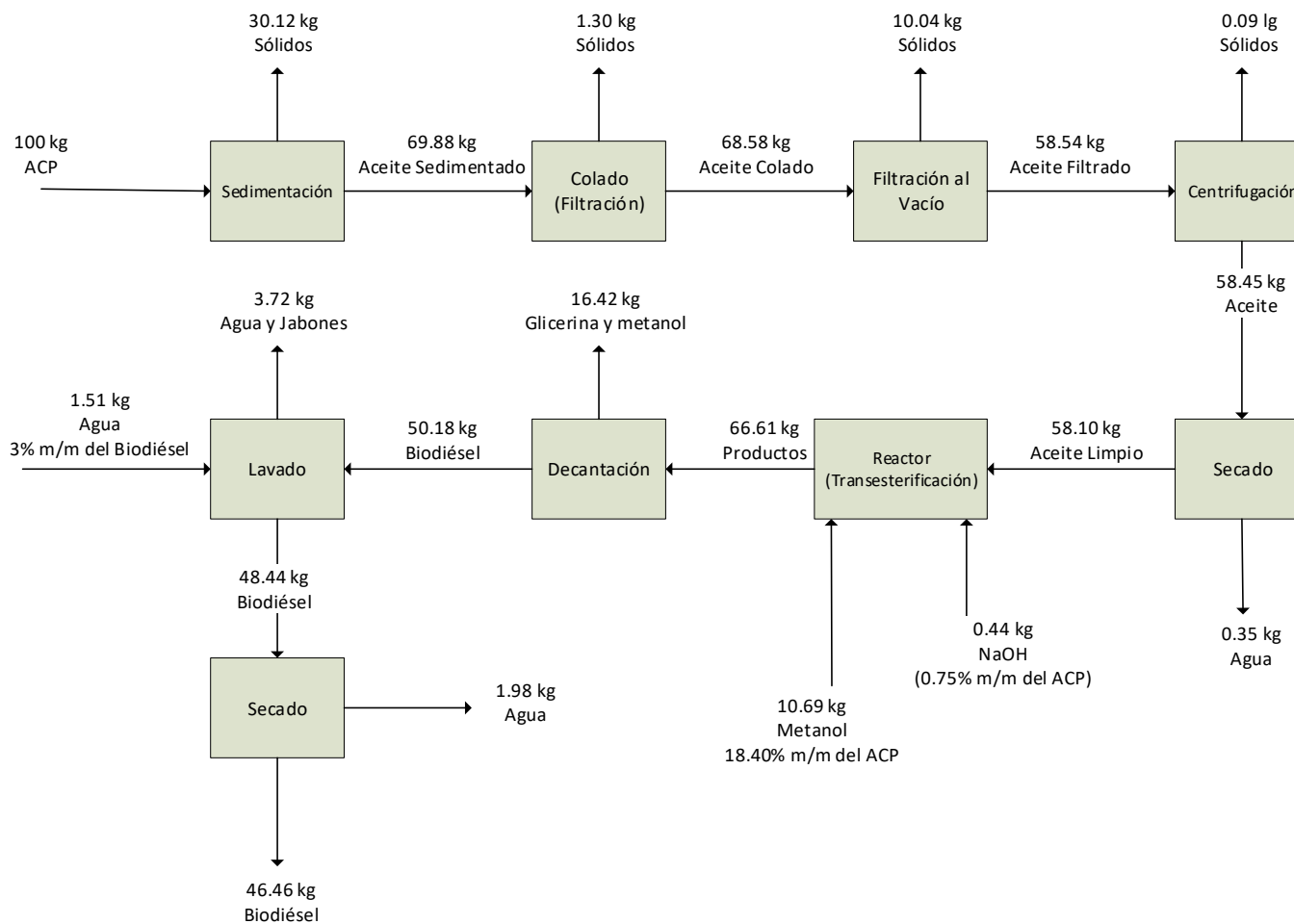
VII. RESULTADOS

Figura 3. Comparación de las cantidades obtenidas de biodiésel con la cantidad estequiométrica teórica y con la cantidad inicial de aceite crudo, para los 8 lotes de producción trabajados.



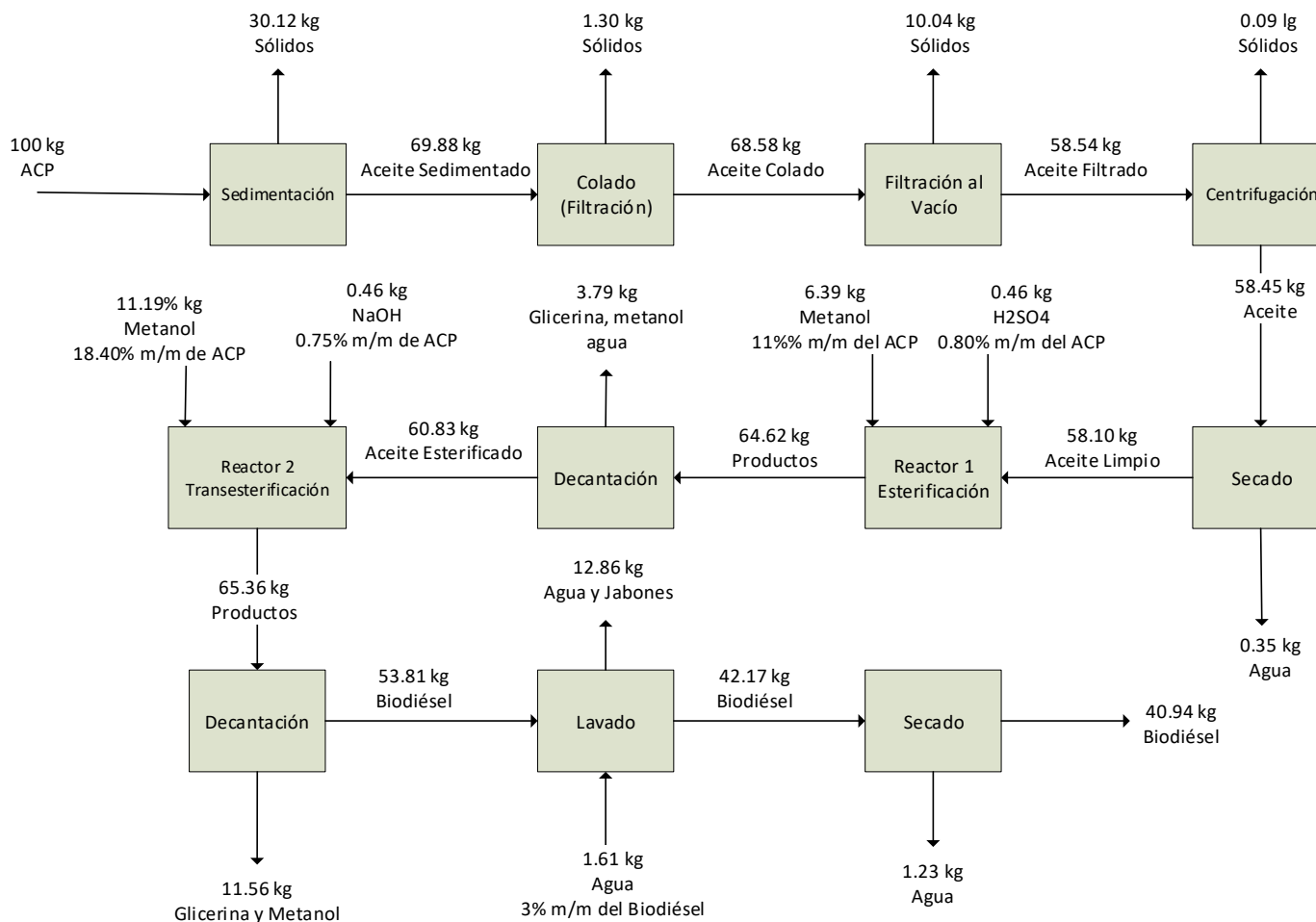
Notas: (1) La cantidad teórica corresponde a la cantidad estequiométrica esperada de biodiésel según la reacción de transesterificación. (2) Los primeros seis lotes se trabajaron con una transesterificación alcalina (NaOH 99% m/m) y los últimos dos con un transesterificación ácida (H₂SO₄ 99% m/m). (3) Las reacciones se llevaron a cabo a 60°C, 99.0 kPa, con una agitación de 440 rpm durante 3 horas.

Figura 4. Balance de masa de las operaciones realizadas para la producción de biodiésel con una transesterificación alcalina (sin esterificación ácida), con una base de 100 kg de aceite crudo de palma (ACP).



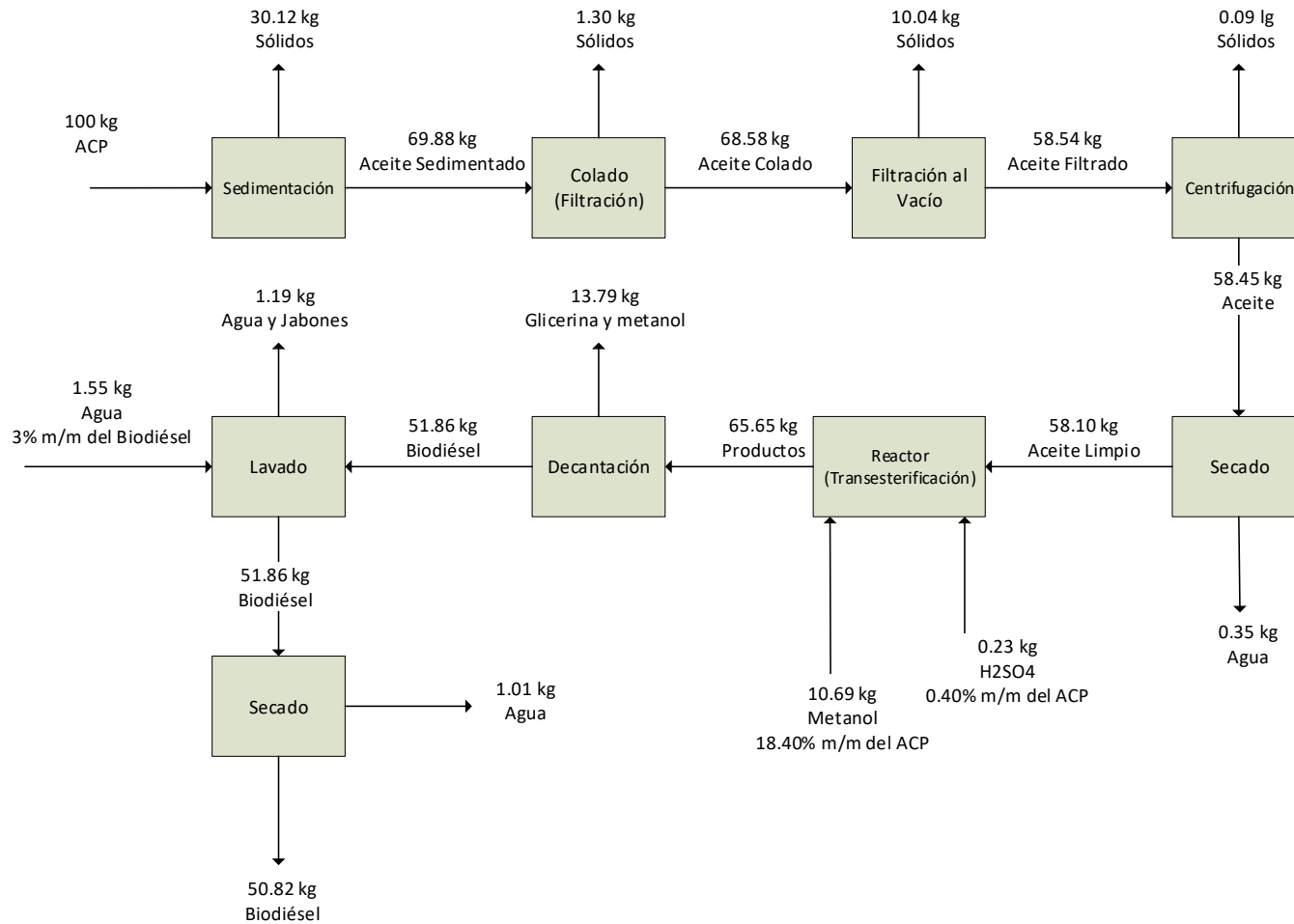
Notas: (1) El catalizador empleado en la transesterificación fue NaOH al 99% m/m. (2) La distribución de masa, a lo largo de las operaciones mostradas en los bloques, es la misma en porcentaje másico que la obtenida en la experimentación de este trabajo, a escala laboratorio. (3) El balance de masa representa la experimentación realizada a escala laboratorio.

Figura 5. Balance de masa de las operaciones realizadas para la producción de biodiésel con una transesterificación alcalina y una esterificación ácida previa a la transesterificación, con una base de 100 kg de aceite crudo de palma (ACP).



Notas: (1) El catalizador empleado en la transesterificación fue NaOH al 99% m/m y el catalizador empleado en la esterificación fue H₂SO₄ al 99% m/m. (2) La distribución de masa a lo largo de las operaciones mostradas en los bloques, es la misma en porcentaje másico que la obtenida en la experimentación de este trabajo a escala laboratorio. (3) El balance de masa representa la experimentación realizada a escala laboratorio.

Figura 6. Balance de masa de las operaciones realizadas para la producción de biodiésel con una transesterificación ácida (sin esterificación ácida), con una base de 100 kg de aceite crudo de palma (ACP).



Notas: (1) El catalizador empleado en la transesterificación fue H₂SO₄ al 99% m/m. (2) La distribución de masa a lo largo de las operaciones mostradas en los bloques, es la misma en porcentaje másico que la obtenida en la experimentación de este trabajo a escala laboratorio. (3) El balance de masa representa la experimentación realizada a escala laboratorio.

Cuadro 8. Retención de masa porcentual para cada una de las operaciones unitarias y procesos empleados en los tres lotes de tratamiento del aceite crudo de palma africana.

| | Proceso con pocos sólidos, con sedimentación | Proceso con pocos sólidos, sin sedimentación | Proceso con muchos sólidos, sin sedimentación |
|-------------------------|--|--|---|
| Inicial | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| Sedimentación | 30.12% | - | - |
| Filtración | 1.30% | 22.97% | 40.49% |
| Filtración al vacío | 10.04% | 15.54% | 19.41% |
| Centrifugación | 0.09% | 5.22% | 5.69% |
| Secado | 0.35% | 0.29% | 0.32% |
| Total sólidos retenidos | 41.90% | 44.02% | 65.91% |
| Total aceite recuperado | 58.10% | 58.98% | 34.09% |

Notas: (1) Referirse a la sección de Pretratamiento en Metodología para entender la descripción de un aceite con pocos y muchos sólidos suspendidos. (2) En el proceso de filtración se utilizó un filtro de 0.5-1 mm. (3) La centrifugación se llevó a cabo a 2000 rpm por 10 minutos y el secado se realizó en una estufa magnética a 440 rpm, 90°C, durante 4 horas.

Cuadro 9. Rendimientos promedio obtenidos para los distintos procesos de producción de biodiésel que se llevaron a cabo.

| Proceso | Rendimiento (m/m) |
|--|-------------------|
| Esterificación con secado y transesterificación alcalina | 71.63% |
| Esterificación sin secado y transesterificación alcalina | 84.03% |
| Transesterificación alcalina | 80.49% |
| Transesterificación ácida | 85.68% |

Notas: (1) Las esterificaciones se llevaron a cabo por 3 horas a 70°C con una agitación de 440 rpm. (2) Las transesterificaciones se llevaron a cabo por 3 horas a 60°C con una agitación de 440 rpm. (3) El catalizador utilizado en las esterificaciones ácidas y las transesterificaciones ácidas fue H₂SO₄ 99% m/m. (4) El catalizador utilizado en las transesterificaciones alcalinas fue NaOH 99% m/m.

Cuadro 10. Valores promedio de las propiedades físicas del aceite tratado de palma según las caracterizaciones realizadas.

| Propiedad | Valor promedio | Desviación estándar |
|---------------------------------|----------------|---------------------|
| Densidad (kg/m ³) | 866 ± 3 | 0.0001 |
| Humedad y materia volátil (m/m) | 0.210 ± 0.001% | 0.0003 |
| Número ácido (m/m) | 1.04 ± 0.04% | 0.51% |
| Viscosidad cinemática (cSt) | 38.510 ± 0.003 | 0.325 |

Notas: (1) El aceite tratado es el aceite crudo de palma después de haber pasado por las operaciones de pretratamiento. (2) La temperatura promedio de medición para la densidad fue de 25.0°C. (3) El volumen del picnómetro utilizado fue de 25.210 cm³. (4) Se utilizó el método de la AOAC 985.19 para la determinación de la densidad. (5) Se utilizó el método AOAC 926.12 para la determinación de la humedad y materia volátil. (6) Se utilizó el método estándar de la AOAC 940.28 para la determinación del número ácido. (7) La constante del viscosímetro utilizado a 40°C fue 0.09572 cSt/s. (8) Se utilizó el método ASTM D445-06 para la determinación de la viscosidad cinemática

Cuadro 11. Valores obtenidos de pH promedio para el aceite crudo, el aceite tratado (limpio) y el aceite esterificado de palma.

| Tipo de Aceite de Palma | pH promedio (±0.050) | Desviación estándar |
|-------------------------|----------------------|---------------------|
| Crudo | 4.928 | 0.07 |
| Tratado | 4.874 | 0.09 |
| Esterificado | 4.106 | 1.74 |

Notas: (1) Entiéndase aceite tratado como el aceite crudo de palma después de haber pasado por las operaciones de pretratamiento. (2) El aceite esterificado es el aceite obtenido después de la esterificación ácida.

Cuadro 12. Valores promedio de las propiedades físicas del biodiésel producido según las caracterizaciones realizadas.

| Propiedad | Valor Promedio | Desviación estándar |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|
| Densidad (kg/m ³) | 874 ± 3 | 0.004 |
| Índice de refracción | 1.46547 ± 0.00010 | 0.020 |
| Viscosidad cinemática (cSt) | 5.314 ± 0.003 | 0.263 |

Notas: (1) La temperatura promedio de medición para la densidad fue de 25.0°C. (2) El volumen del picnómetro utilizado fue de 25.210 cm³. (3) Se utilizó el método de la AOAC 985.19 para la determinación de la densidad. (4) Las lecturas para el índice de refracción se realizaron a 20°C. (5) Se utilizó el método de la AOAC 921.08 para el índice de refracción. (6) La constante del viscosímetro utilizado a 40°C fue 0.09572 cSt/s. (7) Se utilizó el método ASTM D445-06 para la determinación de la viscosidad cinemática.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Lo primero que se realizó experimentalmente en este trabajo fue estudiar el aceite crudo disponible cualitativa y cuantitativamente. El aceite crudo utilizado se encontraba almacenado en un tonel de 200 L. A medida que se iba requiriendo, se fue sacando las cantidades necesarias. Lo interesante fue que hubo grandes variaciones en el aceite crudo a medida que este se iba extrayendo del tonel. Las primeras muestras extraídas estaban mucho menos concentradas en sólidos suspendidos que las últimas muestras. Las primeras muestras tenían una cantidad considerable de sólidos suspendidos, no obstante, aún se podía ver claramente que estos se encontraban suspendidos en una gran masa de aceite semi transparente. Esto no ocurrió con las últimas muestras de aceite crudo, pues la apariencia de estas era la de una pasta amarillenta, en donde no se podía apreciar a simple vista la separación entre la fase sólida y líquida del aceite crudo de palma.

La razón de la variación en la apariencia del aceite crudo a medida que se iba extrayendo de su tonel de almacenamiento se debe principalmente a la sedimentación de los sólidos suspendidos. Según esto, la mayor cantidad de sólidos se encontraban sedimentados al fondo del tanque y el aceite líquido se encontraba en la parte superior del tonel. Los sólidos suspendidos en el aceite crudo trabajado tenían una apariencia de color blanco. Presuntamente se consideró que estos sólidos eran en su mayoría estearinas, ceras y jabones. Esto debido a que, como se explicó en el marco teórico de este trabajo, los aceites crudos vegetales se caracterizan por tener altos contenidos de ceras y jabones, pues estos son producidos como sistema de defensa de las plantas y como resultado de la esterificación entre los ácidos grasos de los aceites vegetales y los alcoholes grasos. En el caso específico del aceite de palma estas ceras se denominan estearinas. Para poder tener una mayor certeza de que en efecto los sólidos son ceras y jabones, se realizó una prueba de determinación de su punto de fusión. En el Cuadro 36 se observa que el punto de fusión de los sólidos analizados rondó entre 44 y $56 \pm 2^\circ\text{C}$. Y dado que las estearinas se caracterizan por tener un punto de fusión de 51°C (ver marco teórico), se tiene una mayor seguridad que los sólidos suspendidos en el aceite en efecto son grasas en forma de estearinas de palma.

Para la remoción de los sólidos suspendidos del aceite crudo se utilizó 4 operaciones unitarias: sedimentación, filtración, centrifugación y secado. Se realizaron dos variaciones principales en los procesos de remoción de sólidos suspendidos. Esto según la cantidad de sólidos suspendidos que tenía el aceite crudo a tratar. Como se mencionó anteriormente, el aceite

crudo varió en cantidad de sólidos suspendidos según la profundidad del tonel en la que fueron extraídos. Para los sólidos con pocos sólidos suspendidos (ver sección de Pretratamiento en Metodología para entender a qué se refiere con un aceite crudo con pocos o muchos sólidos suspendidos) sí fue posible realizar la operación de sedimentación, pues la mayor cantidad de sólidos lograron ser removidos con este proceso; esto se observa en el Cuadro 13 de resultados. Empero, para el aceite con muchos sólidos suspendidos, con una apariencia de una pasta amarillenta, no fue posible realizar la sedimentación debido a que no se apreció ningún cambio en un periodo de sedimentación de 24 horas. Por ello, para este tipo de aceite no se trabajó con sedimentación pues el tiempo requerido para ello era muy grande.

Para el aceite extraído de la parte superior del tonel (con pocos sólidos suspendidos), se estudió si la operación de la sedimentación era realmente necesaria en cuanto a la cantidad de sólidos suspendidos removidos por dicho proceso. Por ello, para un lote se trabajó con sedimentación y para otro sin dicha operación. Esto se observa el Cuadro 13 y el Cuadro 14 de resultados, en donde se observa la cantidad de masa retenida porcentualmente en cada una de las operaciones unitarias trabajadas para la remoción de sólidos suspendidos. Ya sea que se realice o no la sedimentación, la recuperación de los sólidos suspendidos para la purificación del aceite de palma fue casi la misma, siendo ligeramente menor el porcentaje de sólidos retenidos para el proceso en donde sí se realizó la sedimentación. Esto implica que, para el objetivo de remover los sólidos suspendidos del aceite crudo, la operación de sedimentación es innecesaria.

Ahora bien, lo interesante de analizar aquí es cuál de los dos procesos descritos es menos costoso para una adecuación a planta piloto. Es cierto que ya sea que se realice la sedimentación o no, el porcentaje de sólidos retenidos es relativamente el mismo. Sin embargo, cuando se realiza el proceso de sedimentación, el proceso de centrifugación se hace casi innecesario pues solo presenta una retención de sólidos del 0.09%. Un tanque sedimentador sería mucho más económico en términos de adquisición e instalación que una centrífuga. Además, el gasto de operación sería menor para un tanque sedimentador, pues la centrífuga tendría una mayor demanda energética.

Por otro lado, está el caso en donde no es posible realizar la sedimentación inicial pues, como se mencionó anteriormente, la cantidad de sólidos suspendidos es muy alta para que dicha operación pueda realizarse en 36 horas o un periodo cercano a este. Cabe recordar que el criterio utilizado para describir al aceite crudo con pocos o muchos sólidos suspendidos fue meramente visual, según la distinción de la fase líquida y sólida del aceite crudo (ver sección de Pretratamiento en Metodología). Los resultados para este caso se muestran en el Cuadro 15. En él se observa que el porcentaje de retención de sólidos, según la masa total de la mezcla inicial sólidos-aceite, fue de 65.91%. Esto implica que lo sobrante (34.09%) corresponde al porcentaje de masa de aceite limpio aprovechable que se logró extraer. Este valor es considerablemente mayor a los obtenidos

para muestras de aceite con pocos sólidos suspendidos: 41.90% y 44.02% de sólidos remobidos (58.10% y 55.98% de aceite recuperado). Esto se debe a que lógicamente hay una mayor cantidad de sólidos suspendidos en la muestra de aceite crudo con mayor concentración de sólidos suspendidos. Para este tipo de mezcla, la recuperación del aceite es muy baja (34.09% en masa) con relación a la masa total de la mezcla sólidos-aceite. Esto podría ser compensado con el bajo costo que el aceite crudo de palma tiene frente al aceite refinado de palma, pues, como se mencionó en el marco teórico, el aceite crudo de palma (\$0.74/kg) representa un 17% del precio en el mercado del aceite refinado (\$4.38/kg). No obstante, es necesario realizar un estudio económico para poder garantizar si la utilización del aceite crudo de palma es mejor que el aceite refinado, lo cual se propone en las recomendaciones. Esto se puede observar en el Cuadro 2.

Según lo anterior, la operación de centrifugación se puede obviar para los casos en donde se obtiene aceite crudo con pocos sólidos suspendidos, pero no para el caso cuando el aceite tiene altos niveles de dichos sólidos. Dado que en un tonel de aceite crudo de palma africana siempre existirá la variación en cuanto a concentración de sólidos, no es posible obviar la operación de centrifugación. Dicha variación siempre existirá según el lugar de donde provenga el aceite crudo y la profundidad del tanque o recipiente de donde se extraiga, dado a que mayor profundidad, mayor concentración de sólidos por la sedimentación natural. La ventaja es que la variación existirá siempre dentro de un rango específico, por lo que es posible utilizar una serie de equipos que soporten ese rango de variación. Entonces, según lo anterior, el método de purificación de aceite crudo de palma propuesto (filtración-centrifugación-secado) es adecuado para la obtención de aceite crudo limpio y aprovechable para un proceso de producción de biodiésel.

En los Cuadro 13 al 15, se observan las cantidades recuperadas de aceite en cada uno de los lotes trabajados. El promedio de aceite recuperado de los tres lotes corresponde a 49.39% en masa, con respecto a la masa inicial del aceite crudo de palma. Por lo tanto, solo se logra recuperar aproximadamente el 50% en masa de un tonel de aceite crudo de palma. La otra mitad corresponde a sólidos suspendidos como grasas, estearinas, ceras y aceite de palma que ya no pudo ser separado de dichos componentes por los métodos propuestos en este trabajo.

Dado que en promedio solo se logra obtener un 49.39% de aceite crudo de palma utilizable para producir biodiésel, podría ser discutible que el aceite crudo no es una buena opción para dicha producción, pues se pierde el 50% en masa de cada lote de producción solo en la etapa de tratamiento. Sin embargo, a pesar de ello, el aceite crudo de palma tiene la ventaja que es más económico en adquisición de compra que otros aceites como el aceite refinado. En el Cuadro 2 se muestran los precios promedio del aceite crudo de palma, aceite refinado y aceite usado. Al relacionar el precio del aceite (\$0.73/kg) con la cantidad en masa que se logra recuperar por lote (49.34% m/m) se obtiene que el costo real del aceite crudo de palma aprovechable para producir

biodiésel es de \$1.47/kg. Este valor sigue siendo más bajo que el precio promedio del aceite refinado (\$4.38/kg), por lo que el aceite crudo es una opción económicamente más atractiva desde el punto de vista del precio de compra de la materia prima para producir biodiésel.

Otro aceite utilizado para la producción de biodiésel es el aceite usado. En el Cuadro 2 se observa que este tiene un menor precio que el aceite crudo de palma. El problema con el aceite usado no es su costo, sino su obtención. Como se mencionó en el marco teórico, el aceite usado es complicado en su recolección pues se obtiene de una gran cantidad de proveedores (como cocinas y restaurantes). Por ello, los gastos en dinero, tiempo, logística y transporte hacen que el aceite usado no sea tan atractivo para producir biodiésel a gran escala.

Otro aspecto económico importante de analizar es el costo de operación que una planta piloto o industrial tendría que soportar si instala un complejo de equipos que conlleven las operaciones unitarias propuestas en este trabajo para purificar el aceite crudo de palma africana. Dado que este trabajo solo se realizó experimentalmente a escala laboratorio, no se estudió a profundidad el impacto económico que los costos de operación en una planta de producción podrían tener en la producción. Sin embargo, hay ciertos aspectos que sí se pueden estudiar: de las operaciones unitarias trabajadas (sedimentación, filtración, centrifugación y secado), la centrifugación y el secado son las que mayores costos operativos representarían, por su consumo de energía eléctrica y vapor. Ante una adecuación a planta piloto (como la de la Universidad del Valle de Guatemala) lo más atractivo económicamente sería lograr evitar incurrir en un gasto de operación energético recurrente por dichos procesos. Según a la experimentación a escala laboratorio realizada, no se recomienda obviar el secado, pues el agua causa una reacción parasita con los metil ésteres para formar ácidos grasos. No obstante, la operación de centrifugación sí se podría evitar, siempre y cuando se logre remover suficientes sólidos (mínimo de 30% m/m) en el proceso de sedimentación inicial.

Para una adecuación de la planta piloto de la Universidad del Valle de Guatemala es importante considerar algunos factores de los procesos llevados a cabo a laboratorio. El primer sería el sistema de transporte para remover los sólidos sedimentados en el tanque de sedimentación. Para ello sería necesario disponer de una bomba de desplazamiento positivo. Además, para facilitar el transporte de dichos sólidos, sería más fácil si se calentaran a su punto de fusión (51°C, pues en su mayoría se concluyó que son estearinas) para que estos se fundieran. A esta temperatura, los sólidos se comportarían como pastas o lodos, pues podrían fluidizarse a pesar de su viscosidad.

Para los procesos de filtrado (colado y filtración al vacío), se reemplazaría la fuerza motriz de filtración (vacío) por fuerza centrífuga proporcionada por una bomba centrífuga apropiada. El proceso de filtración (colado y filtración al vacío) se condensaría en una sola etapa como un filtro de cartuchos o filtro de prensa. Dado que la fuerza motriz sería significativamente superior en este

caso que la trabajada a nivel laboratorio, la remoción de sólidos sería más eficiente, pudiendo llegar incluso a no necesitar un proceso de centrifugación posterior. Finalmente, para remover la humedad del aceite crudo sería necesario, al igual que a escala laboratorio, un secador que funcionaría como un tanque atmosférico con chaqueta de calentamiento para calentar la mezcla y remover el agua contenida.

Como se mencionó en el marco teórico, una esterificación ácida se hace necesaria cuando el número ácido del aceite disponible supera el 3% m/m de acidez. Como se muestra en el Cuadro 28, en ningún caso la acidez del aceite limpio superó dicho valor. Sin embargo, de igual forma se estudió la influencia de una esterificación ácida sobre el rendimiento de producción de biodiésel para estudiar su influencia en aceites crudos con números ácidos menores al 3% m/m.

Al observar el Cuadro 29, se observa que las esterificaciones ácidas de los lotes en que se trabajaron dichas reacciones (primeros cuatro lotes) sí produjeron una disminución de ácidos grasos del aceite crudo. La esterificación disminuyó el contenido de ácidos grasos del aceite crudo de 0.80% de acidez a un 0.25% de acidez. Esto ocurrió debido a que en la esterificación los ácidos grasos reaccionaron con el metanol para formar metil ésteres. La importancia de la disminución de los ácidos grasos radica en que estos reaccionan con el hidróxido de sodio de la transesterificación para formar jabones en una reacción de saponificación.

En el Cuadro 17 se logra apreciar que la masa del aceite esterificado resultó ser en todos los casos ligeramente superior a la del aceite crudo. Esto se debe a que una molécula de aceite esterificado es más pesada molecularmente que un ácido graso por la sustitución de un grupo metil en donde antes iba un hidrógeno. Por lo tanto, la relación de masas entre el aceite esterificado y el aceite crudo inicial fue la esperada para la reacción de esterificación ácida.

Lo anterior no ocurrió para el caso de las reacciones de transesterificación llevadas a cabo. Se esperaba que la masa producida de biodiésel fuera mayor en masa al aceite inicial, pues el peso molecular de tres alquil ésteres ($290\text{g/gmol} \times 3 = 870\text{ g/gmol}$), que conforman al biodiésel, es ligeramente superior al de una molécula de triglicéridos, que conforman al aceite (850 g/gmol). La relación de 3:1 se debe a la relación estequiométrica de la transesterificación entre el aceite y los metil ésteres. Dicha relación de masas no se obtuvo debido a una sencilla razón: las eficiencias obtenidas de producción de biodiésel no fueron las ideales. Dado que se obtuvieron rendimientos menores al 100%, se obtuvo una masa inferior a la teórica del biodiésel. Esto se puede apreciar claramente en la Figura 3, en donde se grafican las masas obtenidas de biodiésel y las masas estequiométricas teóricas de biodiésel e iniciales de aceite.

Un factor importante en la reacción de esterificación realizada en los primeros 4 lotes es la adición de un exceso de metanol. Esto se realizó para evitar la reacción parásita de una esterificación inversa, en donde los metil ésteres (biodiésel) ya formados reaccionan con el agua

del medio para formar nuevamente los ácidos grasos. Para evitar esta reacción, se colocó un exceso de metanol, para favorecer la formación de productos según la ley de equilibrio químico (Le Chatelier). Dado que la reacción de esterificación tiene como uno de sus productos agua, siempre se dará en un cierto porcentaje la reacción de esterificación inversa descrita, no obstante, el objetivo es minimizarla lo más posible con la adición del exceso de metanol. Por esta misma razón es importante no dejar en contacto metil ésteres formados (biodiésel) con el agua, pues se da la esterificación que produce nuevamente ácidos grasos, los cuales producen a su vez jabón al interactuar con el hidróxido de sodio utilizado como catalizador en la transesterificación.

El siguiente paso después del tratamiento del aceite crudo y la obtención de un aceite limpio, es su conversión a biodiésel. En el Cuadro 7 de metodología, se muestran cuáles fueron las variaciones implementadas en este trabajo para la producción de biodiésel. Solamente los primeros 4 lotes de producción conllevaron un tratamiento ácido de esterificación. De dichos 4 lotes, solo el tercer y cuarto lote conllevaron un proceso de secado entre el mencionado tratamiento ácido y su posterior transesterificación catalizada por medio alcalino. El objetivo de esto fue estudiar la influencia del tratamiento ácido y el proceso de secado descrito en el rendimiento (eficiencia) de producción de biodiésel. Para los últimos 4 lotes el estudio de variación fue distinto. En este caso no se analizó la influencia de la esterificación ácida sobre el rendimiento de reacción, sino el tipo de catalizador empleado en la reacción de transesterificación. En los siguientes párrafos se discutirá sobre dichas variaciones realizadas en la experimentación.

En los primeros cuatro lotes se estudió la influencia del proceso de secado intermedio entre la esterificación ácida y la transesterificación. Como se mencionó en el marco teórico, uno de los productos de la esterificación es agua. El agua es un componente que reacciona con los metil ésteres para producir ácidos grasos, los cuáles forman jabones en presencia del hidróxido de sodio empleado en la transesterificación. En estos cuatro lotes se estudia qué tanto afecta el rendimiento de producción de biodiésel dicha agua producida por la esterificación. En el Cuadro 17 se observa que la esterificación produjo 1.8 g y 2.3 g de agua para los lotes 3 y 4 respectivamente (lotes en los que sí se realizó el proceso de secado intermedio). En relación con la masa del aceite crudo original, la masa de agua representa un 6.5%.

En los lotes 1 y 2, donde no se realizó el secado intermedio entre la esterificación y la transesterificación, el efecto del agua producida por la esterificación se observó en la formación de jabones durante la transesterificación. Esto se observa claramente de dos maneras: en la disminución del rendimiento de producción y en el aumento de la masa removida durante el lavado del biodiésel producido. Esto se observa en el Cuadro 20, en donde se aprecia claramente que las masas removidas durante los procesos de lavado fueron mayores para los lotes 1 y 2. El principal componente de la masa removida en estos casos fueron jabones. Los jabones logran ser

removidos por el agua de lavado debido a su propiedad de tener una parte hidrófila y otra parte lipófila.

En el Cuadro 20 se observa que las cantidades de masa removidas durante los lavados del biodiésel fueron de 29.0 y 22.7 para los lotes 1 y 2, respectivamente. La razón por la que estos valores fueron tan grandes con relación a un aproximado de 2 g de agua producida durante la esterificación, se debe a que el peso molecular del jabón, que es una sal carboxílica de sodio de cadena larga, es considerablemente mayor al del agua.

Según lo anterior, al no realizar un secado intermedio entre la esterificación y la transesterificación, se produjo una disminución en rendimiento de producción de 12.41% m/m. Para el caso en donde no se realizó dicho secado, el rendimiento fue de 71.63% m/m, mientras que para el caso donde sí se realizó, el rendimiento fue de 84.04% m/m. Esto evidencia que el hecho de no realizar el secado provoca una disminución en el rendimiento de producción por la formación de jabones entre el agua formada en la esterificación y el catalizador alcalino (NaOH) de la transesterificación. Otro de los factores que contribuyen a que el rendimiento de reacción disminuya cuando no se realiza el secado es que parte del catalizador alcalino de la transesterificación se consume al reaccionar con agua en una reacción de saponificación. Esto provoca que no haya suficiente catalizador en el medio, y que la reacción tarde más tiempo en llevarse a cabo.

Ya se discutió la influencia sobre el rendimiento de producción y la formación de jabones de un secado intermedio entre la esterificación y la transesterificación. Ahora se discutirá la influencia de realizar o no dicha esterificación ácida. En los lotes 5 y 6 no se realizó la esterificación ácida, a diferencia de los primeros 4 lotes ya discutidos. Lógicamente, si no se realizó una esterificación en los lotes 5 y 6, tampoco se realizó un secado intermedio entre la esterificación y la transesterificación. Como se observa en el Cuadro 21, los rendimientos obtenidos para los lotes 5 y 6 fueron de 79.97% y 81.02%, respectivamente. Estos presentan una diferencia promedio de 3.54%, con relación a los rendimientos obtenidos para los lotes 3 y 4, en donde sí se realizó una esterificación, y en donde se obtuvo rendimientos respectivos de 82.90% y 85.17%. Dado que la diferencia en rendimientos es poca, con relación al costo de instalación y operación que implicaría una esterificación ácida, no se justifica la realización de una esterificación ácida para el aceite crudo de palma trabajado. Esto se debe principalmente a que el número ácido del aceite crudo fue muy bajo, implicando desde un inicio que la esterificación ácida no provocaría cambios significativos en los rendimientos de producción. Sin embargo, el aceite crudo de palma puede variar en número ácido según el lugar de donde venga, por lo que siempre es una buena idea determinar su número ácido inicial para establecer si la esterificación ácida es necesaria o no.

Los últimos dos lotes producidos se realizaron para determinar la diferencia entre realizar una transesterificación catalizada por medio básico o con una en medio ácido. Se obtuvieron los

mayores rendimientos de producción para los lotes (7 y 8) que se llevaron a cabo con transesterificación catalizada por medio ácido. No obstante, la diferencia con respecto a los lotes 5 y 6, en donde se realizó la transesterificación por medio alcalino fue solo de 5.19%.

La transesterificación catalizada por medio ácido además presenta la ventaja frente a la alcalina que, al no utilizar una base como catalizador, se evita el problema de la formación de jabones. El inconveniente es que la transesterificación ácida requiere, como mínimo, el doble de tiempo de reacción que la básica. En este trabajo, la experimentación para la transesterificación ácida llevó 6 horas mientras que para la alcalina solamente se requirieron 3. A escala laboratorio este cambio no se percibe mucho en términos económicos, no obstante, esto llegaría a ser más apreciable si este procedimiento se llegara a adecuar a la planta de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala. En una planta piloto, el aumento de tiempo de reacción se vería reflejado en la cantidad de combustible extra que es necesario quemar en caldera para producir una mayor cantidad de vapor.

Para los diferentes lotes de producción de biodiésel descritos anteriormente fue necesario realizar un proceso de lavado y secado final para la purificación del combustible. En el Cuadro 24 se observan las variaciones de pH del biodiésel a medida que se fueron realizando los lavados. Como se observa, el pH al que tendió el producto de la transesterificación fue un pH neutro, el cual es característico del biodiésel, según lo investigado en el marco teórico (pH entre 6 y 8). Fueron necesarios un promedio de 4 lavados de 0.66 gramos de agua cada uno para lavar los lotes de biodiésel producidos. Ello implica que se requirió un promedio del 3.05% en masa de agua con respecto a la masa del biodiésel producido para lavar dicho combustible.

Según lo anterior discutido, una de las opciones cuando se dispone de un aceite crudo con un número ácido menor al 3% m/m, es un proceso en donde no se realice tratamiento de esterificación ácida y la reacción sea de transesterificación catalizada por medio alcalino. Con este proceso se obtendría a escala laboratorio un rendimiento de 80.49%, sin necesidad de incurrir en esterificaciones o secados. Ante una adecuación a planta piloto esto es bastante atractivo, pues no representa los costos de instalación y operación que conllevaría una esterificación ácida y un secado intermedio entre esta esterificación y la transesterificación. Una adecuación importante para una planta piloto que ya produce biodiésel a partir de aceites usados, y desee producir ahora a partir de aceites crudos de palma, es contemplar el equipo necesario para la producción. Un factor importante de analizar es que, si no se planea incorporar un módulo para la esterificación ácida, es asegurarse que el aceite crudo de palma proporcionado por el proveedor siempre se encuentre en un número ácido inferior al 3% m/m. De lo contrario, las disminuciones en rendimientos de producción sí llegarían a decrecer mucho más que los rendimientos presentados en este trabajo. Esto debido a la formación de jabones discutida anteriormente.

Para casos en los que no es posible asegurar que el aceite crudo de palma se encuentre siempre por debajo del 3% m/m de acidez, una alternativa es utilizar el mismo reactor para la esterificación ácida y la transesterificación alcalina, para evitar un gasto en adquisición e instalación de equipo. Pero siempre debe considerarse que ello conllevaría tener una neutralización entre el ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio, los cuales formarían la sal cristalina de sulfato de sodio y agua. Esto podría verse como un problema, debido a la formación de agua. No obstante, esta formación de agua es minimizada dado que el exceso de metanol contribuye a neutralizar el ácido sulfúrico. Y los pocos cristales de sulfato de sodio formados, podrían removerse sin necesidad de una operación adicional, pues estos se removerían con los lavados de agua del biodiésel producido.

Cabe mencionar que, para poder llevar a cabo ambas reacciones en el mismo reactor, este debe contar con un sistema de secado para poder eliminar el agua producida en la esterificación para los casos en donde la acidez supere el 3% m/m. En estos casos, la cantidad de agua producida por la esterificación llegaría a disminuir más del 10% m/m del rendimiento de producción de biodiésel. Dado que el reactor, ya debe contar algún serpentín, chaqueta térmica o algún sistema de caliente para llegar a las temperaturas que las reacciones requieren (60 y 70°C), la implementación de un sistema de secado interno no sería muy complicada, pues solo sería necesario tener una válvula de escape para el vapor de agua liberado y lograr subir la temperatura del sistema de calentamiento a una temperatura en donde se logre remover el agua (100°C a 1 atm).

Se discute una comparación entre los rendimientos de producción de biodiésel de la planta de producción del departamento de Ingeniería Química (Cuadro 5) de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) a partir de aceites usados de fritura, con los rendimientos obtenidos en este trabajo a escala laboratorio (Cuadro 21). Como se observa, el rendimiento promedio que la planta de la UVG obtuvo fue de 84.79%, mientras que el obtenido en este trabajo fue de 80.46%. Aquí hay varios puntos a discutir. Primero hay que considerar la diferencia de escalas. Dado que la producción realizada en este trabajo se realizó a escala laboratorio es más fácil tener control de las variables termodinámicas del sistema, pues se trabaja con volúmenes considerablemente menores. Los reactores utilizados en la planta de la UVG tienen una capacidad nominal de 250 y 60 L, mientras que el volumen usado en este trabajo, para cada producción, fue de aproximadamente 110 mL. El hecho que se haya trabajado con una menor escala permite un mayor control y por lo tanto obtener mejores rendimientos de proceso.

A pesar de lo anterior, se obtuvieron buenos rendimientos de proceso trabajando con aceite crudo de palma. Los rendimientos obtenidos en este trabajo resultaron ser similares a los que se obtuvieron en la planta piloto de producción de la Universidad del Valle de Guatemala. Ello proporciona una buena pauta para indicar que, si se continúan los estudios realizados en este

trabajo de graduación, y si se realiza una buena adecuación de la metodología planteada, podría ser posible producir biodiésel en la planta piloto de la Universidad, a partir de aceite crudo de palma africana.

Otro aspecto que discutir son las variaciones en la metodología propuesta que hubieran podido mejorar los resultados obtenidos en este trabajo. La primera de ellas es la utilización de una chaqueta térmica en lugar de una estufa para calentar el balín de tres bocas en donde se llevaron a cabo las reacciones de esterificación y transesterificación. Esto hubiera permitido un calentamiento más uniforme, una mayor área de transferencia de calor y un menor consumo energético. Esto no se realizó inicialmente dado que no se contempló, no obstante, se recomienda implementar en futuras experimentaciones para la obtención de mejores resultados.

Una segunda variación que se pudo haber implementado en la metodología es la remoción de agua del aceite crudo y del biodiésel por medio de una operación de adsorción. Esto evitaría utilizar las operaciones de secado que conllevan costos energéticos. La opción de remover el agua utilizando adsorbentes como la sílica podría ser una opción más atractiva, por lo que se recomienda investigar para trabajos futuros.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de pretratamiento del aceite crudo de palma africana logra recuperar un 49.39% m/m de aceite limpio utilizable. El resto en masa corresponde principalmente a ceras y jabones (estearinas de palma). Dado que por cada lote de producción se pierde aproximadamente el 50% en masa, se recomienda estudiar otros usos que se le puedan dar a los componentes removidos del aceite crudo de palma. Esto podría mejorar la rentabilidad del proceso de producción.

También se hace ver que el proceso de producción propuesto en este trabajo involucra un lavado con agua de biodiésel. El agua de lavado remanente de este proceso queda contaminada con materia orgánica. Esta podría ser tratada de alguna forma y reutilizada dentro del proceso del lavado del biodiésel. De acuerdo con ello, se recomienda realizar un estudio de las opciones de tratamiento y disposición del agua de lavado en el proceso de purificación de biodiésel.

Finalmente, un aspecto a discutir es la caracterización empleada en el aceite crudo de palma y las propiedades medidas del biodiésel. Las propiedades reportadas en la literatura de ambas sustancias se muestran en el Cuadro 4 del marco teórico. Según el Cuadro 10 de resultados, se observa que la caracterización del aceite crudo de palma fue de la siguiente forma: pH de 4.928 ± 0.050 , 0.219% m/m de humedad y materia volátil, 1.04% m/m de número ácido y una densidad de $866 \pm 3 \text{ kg/m}^3$. Estos resultados son congruentes con la literatura, pues todos se encuentran muy cercanos o dentro de los rangos reportados en el Cuadro 4 del marco teórico.

Según el Cuadro 12, el pH promedio del biodiésel obtenido fue de 6.843 ± 0.050 , su densidad de $874 \pm 3 \text{ kg/m}^3$ y su índice de refracción de 1.46547 ± 0.00010 . Estas propiedades

coinciden con las consultadas en la literatura, mostradas en el Cuadro 4 del marco teórico. La excepción es el índice de refracción, no obstante, este se encuentra muy cercano (diferencia de 0.01067) al valor reportado en la literatura, por lo que no es un factor preocupante. Estos resultados comprueban que el producto obtenido en las reacciones de transesterificación fueron en efecto biodiésel. Esto además es soportado por la prueba 3/27 mostrada en el Cuadro 35, en el cual se observa que en todos los casos se obtuvo biodiésel libre de aceite. Ello implica que todo el aceite utilizado en cada lote de producción reaccionó de forma completa para la formación de productos.

IX. CONCLUSIONES

1. Se determinó que los sólidos suspendidos en el aceite crudo de palma africana disponible son principalmente estearinas de palma, ya que su punto de fusión teórico es 51°C y el punto de fusión obtenido fue $49 \pm 2^\circ\text{C}$.
2. El mejor método de tratamiento de los evaluados fue el sin sedimentación, ya que se recuperó un 58.98% en masa de aceite crudo sin sólidos suspendidos (respecto al total de aceite crudo con sólidos suspendidos antes del proceso de tratamiento), mientras que el proceso con sedimentación logró recuperar 58.10% en masa de aceite limpio.
3. En promedio, se recuperó 49.39% en masa de aceite limpio utilizable para producir biodiésel, del total del aceite crudo disponible.
4. El rendimiento de producción (71.63% m/m) obtenido para los lotes en donde no se realizó la operación de secado entre la esterificación y la transesterificación resultó ser 12.41% m/m menor que el rendimiento de producción obtenido (84.04% m/m) cuando dicho secado sí se realizó.
5. Se obtuvo un rendimiento de 84.04% m/m para el procedimiento en donde sí se realizó una esterificación ácida (previa a la transesterificación alcalina), el cual fue 3.54% m/m mayor al rendimiento de producción (80.50% m/m) obtenido cuando dicha esterificación no se realizó.
6. El rendimiento obtenido (85.68% m/m) para una transesterificación catalizada por medio ácido fue 5.18% m/m superior al rendimiento (80.50% m/m) obtenido para una transesterificación catalizada por medio básico.
7. Se requirió un promedio de 4 lavados (0.66 g de agua c/u), realizados por aspersión en una ampolla de decantación, para lavar los lotes producidos de biodiésel, lo cual representa un 3.05% con respecto a la masa del biodiésel producido en cada lote.
8. El rendimiento promedio de producción de biodiésel a escala de laboratorio (80.46% m/m) determinado en este trabajo resultó ser 4.33% m/m menor que el rendimiento promedio de la planta de producción de biodiésel (84.79% m/m) del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
9. La caracterización realizada al aceite consistió en la determinación promedio de las siguientes propiedades físicas: pH de 4.928 ± 0.050 , $0.21 \pm 0.01\%$ m/m de "humedad y materia volátil", $1.04 \pm 0.04\%$ m/m de número ácido, 38.510 ± 0.003 cSt de viscosidad cinemática y densidad de 866 ± 3 kg/m³ g/cm³.
10. El producto obtenido en las transesterificaciones en efecto fue biodiésel dado que las propiedades físicas promedio medidas al biodiésel producido (pH de 6.843 ± 0.050 , densidad de 874 ± 3 kg/m³ e índice de refracción de 1.46547 ± 0.00010) se encontraron

dentro de los rangos consultados en literatura (pH entre 6 y 8, densidad entre 860 y 900 kg/m³, índice de refracción entre 1.4440 y 1.4548).

X. RECOMENDACIONES

1. Realizar una caracterización de otros aceites crudos de palma de diferentes fuentes para analizar la variabilidad en factores como el número ácido, la humedad y el contenido de sólidos suspendidos.
2. Ante una adecuación a una planta piloto que ya produce biodiésel a partir de aceites usados, se recomienda llevar a cabo la esterificación y transesterificación en un solo reactor, siempre y cuando el diseño de este reactor permita remover los subproductos de la primera reacción (agua).
3. Llevar a cabo un estudio de la influencia de la variación del número ácido del aceite de palma africana en el rendimiento de producción de biodiésel, para determinar hasta qué punto se hace realmente necesaria la implementación de una esterificación ácida.
4. Si se llega a adecuar la planta piloto de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala, para la producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana, según la metodología propuesta en este trabajo de graduación, se recomienda calentar a 51°C los sólidos removidos en el pretratamiento del aceite crudo (pues dicha es su temperatura de fusión), lo cual facilitaría el transporte y extracción de los sólidos.
5. Estudiar si la fuerza motriz de una filtración a escala planta piloto (fuerza de una bomba centrífuga o de desplazamiento positivo) es suficiente para lograr una mejor separación que la lograda a escala laboratorio (que utiliza como fuerza motriz un sistema de vacío de succión), permitiendo así obviar posteriores operaciones de tratamiento del aceite, como la centrifugación.
6. Dado que en promedio se logró recuperar un 49.39% en masa de aceite limpio utilizable para producir biodiésel, del total del aceite crudo disponible, se recomienda realizar un estudio del aprovechamiento que se le podrían dar al 50.61% (m/m) de ceras y jabones que se separan en el proceso de tratamiento del aceite crudo.
7. Llevar a cabo el calentamiento del balón de tres bocas para las reacciones de esterificación y transesterificación con una chaqueta térmica en lugar de una estufa, para permitir un calentamiento más uniforme, una mayor área de transferencia de calor y un menor consumo energético.
8. Llevar a cabo un estudio del tratamiento que se le podría realizar al agua de lavado de biodiésel, para su recuperación y reutilización en el proceso de producción.
9. Evaluar un proceso de adsorción para la remoción de agua del biodiésel producido y el aceite crudo de palma, para poder comparar dicha operación con la operación de secado implementada en la metodología propuesta en este trabajo.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Agro-Caribe. 2014. *Aceite Crudo de Palma (Crude Palm Oil)*.
<http://www.agrocaribe.com/aceite-crudo-de-palma-crude-palm-oil> [14/06/17]
- Alkabbashi, A.N, *et al.* 2009. «Biodiésel production from crude palm oil by transesterification process». *Revista Journal of Applied Sciences*. [Malasia]. 9 (17): 3166-3170.
- Anguebes-Franceschi, Fransico, *et al.* 2016. «Optimization of biodiésel production from african crude palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq) with high concentration of free fatty acids by a two-step transesterification process». *Revista Open Journal of Ecology*. [México]. 6 (2016): 13-21.
- ANIAGA. 2016. *El valor del aceite usado se desploma*. <https://gestoresderesiduos.org/noticias/aniaga-el-valor-del-aceite-usado-se-desploma> [24/03/17]
- ASAJA Jaén. 2017. *Tendencia semanal del mercado de aceite. Asociación Agraria de Jóvenes Agricultores de Jaén*. <https://www.asajajaen.com/precio-del-aceite> [30/05/17]
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1984. *Official methods of analysis*. 14^a ed. Virginia, Estados Unidos: Editorial de la AOAC. 1102 págs.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 2006. *Official methods of analysis. Volume 2*. 18^a ed. Virginia, Estados Unidos: Editorial de la AOAC. 684 págs.
- ASTM. 2006. *Standard test method for water and sediment in middle distillate fuels by centrifuge*. Método D2709-96.
- ASTM. 2006. *Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)*. Método D445-06.
- Berchmans, Hanny Jojanés e Hirata, Shizuko. 2008. «Biodiésel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids». *Revista Bioresource Technology*. 99 (2008): 1716-1721.

- British Standards (BSi). 2010. *EN 14214 Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods*. Método BS 14214 2008 + A1 2009.
- CHEMPRO. 2017. Top-NOTCH Technology in production of oils and fats. <https://www.chempro.in/palmoilproperties.htm>. [31/01/17]
- Delgado, William; Echeverry, L. F. y Suárez, S. R. 2004. «Caracterización fisicoquímica del aceite de palma crudo proveniente de diferentes materiales genéticos y de dos zonas geográficas de Colombia». *Revista Palmas*. 25 (2): 74-83.
- Elares, R. 2017. *Estimados de producción*. GREPALMA. La Palma, Bolétín Técnico. <http://www.grepalma.org/boletin/2017/boletin9-lapalma.pdf> [03/06/17]
- FEADAPAL. 2017. *Precios de los aceites. Reporte Diario*. <http://fedapal.org/web2017/> [19/02/17]
- Fife, B. 2007. *The palm oil miracle*. Primera edición. Editorial Piccadilly Books. Estados Unidos.
- GREPALMA. 2016. «La palma de aceite es desarrollo para los guatemaltecos». *Revista Guatemala Productiva. Nuestro Diario*. 67 (2016): 1-8.
- GREPALMA. 2017. *Impacto del aceite de palma en Guatemala*. <http://www.grepalma.org> [04/04/17]
- Haas, Michael J, et al. 2006. «A process model to estimate biodiesel production costs». *Revista Science Direct*. [Estados Unidos] 97 (2006): 671-678.
- IARNA (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). 2010. *Análisis de la dinámica de expansión del cultivo de palma africana en Guatemala*. Universidad Rafael Landívar de Guatemala.
- INE. 2014. *República de Guatemala: Encuesta nacional agropecuaria 2013*. Publicación del Instituto Nacional de Estadística de Guatemala.
- INE. 2015. *República de Guatemala: Encuesta nacional agropecuaria 2014*. Publicación del Instituto Nacional de Estadística de Guatemala.
- Irwin, Scott. 2017. «The Profitability of Biodiesel Production in 2016». *Revista farmdocDaily*. [Estados Unidos]. 7 (38): 1-5.
- Kirk-Othmer. 2004. *Chemical Technology*. 5ta ed. Editorial Kirk-Othmer. 896 págs.

- MAGA. 2006. *Mapa de Cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala, Año 2003*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala.
- Maldonado, Oscar; Zambrano, G y Roltz, C. 2010. Producción de biodiésel: estrategias y tecnología. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*. 21 (2010): 11-21.
- Ministerio de Energía y Minas de Guatemala (MEM). 2017. Estadísticas de Hidrocarburos Guatemala. Primer Informe 2017. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/2017-Revista-Hidrocarburos-01T.pdf> [06/09/17]
- ____; 2017. Precios combustibles nacionales. <http://www.mem.gob.gt/hidrocarburos/precios-combustible-nacionales/> [22/06/17]
- Monsalve, M.; Gaibar, D. y Bello, A. 2017. «Transesterificación por catálisis ácida y básica del aceite de las semillas de *Crescentia Cujete L. (MATE)*». Universidad de Guayaquil, Ecuador. *Revista Cumbres*. 3 (1). 161-166.
- Nduwayezu, Jean Baptiste, *et al.* 2015. «Biodiésel production from unrefined palm oil on pilot plant scale. Revista: International Journal of Sustainable and Green Energy». *Revista International Journal of Sustainable and Green Energy*. [Rwanda]. 4 (1): 11-21.
- Nita, I. 2013. «Estimation of the refraction index of diésel fuel + biodiésel blends». *Revista de Universitatii Ovidius Constanta*. [Rumania]. 24 (1): 24-26.
- Ortega, M. y Vázquez, L. 1993. «Caracterización fisicoquímica del aceite crudo y refinado de la semilla de *Proboscidea parviflora* (Uña de Gato)». *Revista del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora*. [México]. 44 (1).
- Ortuño, M. 2006. *Manual práctico de aceites esenciales, aromas y perfumes*. España: Editorial AIYANA.
- Perry, R y Green, D. 2008. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 8a ed. Kansas, Estados Unidos: Editorial McGrawHill.
- Pisarello, L. 2010. *Producción de biodiésel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes*. Universidad Nacional de Litoral. Facultad de Ingeniería Química.

- Prensa Libre. 2012. *Aceite de Exportación. Semanario económico: Efectivo*. Publicación No.41 del 12 de agosto de 2012
- Prensa Libre. 2015. *Cultivos Rinden menor Producción*. <http://www.prensalibre.com/cultivos-rinden-menor-produccion> [28/08/17]
- Proaño, F.; Stuart, J, *et al.* 2015. «Caracterización química y validación de residuos de aceite de palma (*Elaeis guineensis*) y sebo ovino como materias primas grasas protegidas de la degradación ruminal». *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 49 (1): 41-47.
- Purcella, G. 2008. *Do it yourself guide to biodiésel. Your alternative fuel solution for saving money, reducing oil dependency, helping the planet*. Estados Unidos: Editorial Press Ulysses. 181 págs.
- Ramadhas, A.S.; Jayaraj, S. y Muraleedharan, C. 2005. «Biodiésel production from high FFA rubber seed oil». *Revista Fuel*. 84 (2005): 335-340.
- REPSA. 2017. *Historia de la palma de aceite en Guatemala. Obtenido de la página web de Reforestadores de Palma del Petén S.A*: <http://repsa.com.gt/historia-de-la-palma-de-aceite-en-guatemala/> [30/04/17]
- Santori, Giulio, *et al.* 2012. «A review analyzing the industrial biodiésel production practice starting from vegetable oil refining». *Revista Applied Energy*. [Italia] 92 (2012): 109-132.
- Solano, L. 2015. «Palma africana y empresas se expanden aceleradamente a lo largo de la FTN. Revista El Observador». *Revista Enfoque*. [Guatemala]. 7 (36): 1-23.
- Tapia, M. C, *et al.* 2016. «Obtención de biodiésel a partir de aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.). Aplicación del método de ruta ascendente». *Revista Acta Universitaria*. 26 (5): 3-10.
- USDA. United States Department of Agriculture. 2017. *Guatemala Palm Oil Production by year. Index Mundi*. <http://www.indexmundi.com/agriculture/?country=gt&commodity=palm-oil&graph=production> [13/05/17]
- ____; 2017. *Guatemala Palm Oil Exports by year. Index Mundi*. <http://www.indexmundi.com/agriculture/?country=gt&commodity=palm-oil&graph=exports> [13/05/17]
- Wade, L.G. 2012. *Química Orgánica. Volumen 1*. 7ª ed. México, México D.F: Editorial Pearson. 660 pp.
- ____; 2012. *Química Orgánica. Volumen 2*. 7ª ed. México, México D.F: Editorial Pearson. 660 pp.

Zambrano, Gamaliel; Rossi, C y Hernández, A. 2014. «Estudio sobre el balance en el uso de la tierra para alimentos y el uso de la tierra para biocombustibles». *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*. 27 (2014): 68-74.

____; 2014. «Producción de biodiésel a escala planta piloto utilizando catálisis ácida y básica». *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*. 28 (2014): 68-74.

Zapata, C. D, *et al.* 2006. «Producción de Biodiésel a Partir de Aceite Crudo de Palma: 1. Diseño y Simulación de dos Procesos Continuos». *Revista Dyna*. 15 (1): 71-82.

XI. ANEXOS

A. CUADROS DE MEDICIONES Y RESULTADOS ADICIONALES

Cuadro 13. Retención de masa porcentual para cada una de las operaciones unitarias y procesos empleados en el tratamiento del aceite crudo de palma africana con pocos sólidos suspendidos (proceso con sedimentación inicial).

| | Antes de proceso (± 0.1 g) | Después de proceso (± 0.1 g) | Masa retenida en proceso (± 0.1 g) | Porcentaje másico retenido |
|---------------------|---------------------------------------|---|--|-------------------------------|
| Inicial | 462.1 | | | 100.00% |
| Sedimentación | 462.1 | 322.9 | 139.2 | 30.12% |
| Filtración | 322.9 | 316.9 | 6.0 | 1.30% |
| Filtración al vacío | 316.9 | 275.5 | 46.4 | 10.04% |
| Centrifugación | 270.5 | 270.1 | 0.4 | 0.09% |
| Secado | 270.1 | 268.5 | 1.6 | 0.35% |
| | | | Total retenido | 41.90% |
| | | | Total aceite | 58.10% |

Notas: (1) En esta prueba se trabajó con aproximadamente 550 mL de aceite crudo. (2) En el proceso de filtración se utilizó un filtro de 0.5-1 mm. (3) La centrifugación se llevó a cabo a 2000 rpm por 10 minutos y el secado se realizó en una estufa magnética a 440 rpm, 90°C, durante 4 horas.

Cuadro 14. Retención de masa porcentual para cada una de las operaciones unitarias y procesos empleados en el tratamiento del aceite crudo de palma africana con pocos sólidos suspendidos (proceso sin sedimentación inicial).

| | Antes de proceso ($\pm 0.1g$) | Después de proceso ($\pm 0.1g$) | Masa retenida en proceso ($\pm 0.1g$) | Porcentaje máscico retenido |
|---------------------|---------------------------------------|---|---|--------------------------------|
| Inicial | 522.5 | | | 100.00% |
| Sedimentación | - | - | - | - |
| Filtración | 522.5 | 402.5 | 120.0 | 22.97% |
| Filtración al vacío | 402.5 | 321.3 | 81.2 | 15.54% |
| Centrifugación | 321.3 | 294.0 | 27.3 | 5.22% |
| Secado | 294.0 | 292.5 | 1.5 | 0.29% |
| | | | Total retenido | 44.02% |
| | | | Total aceite | 58.98% |

Notas: (1) En esta prueba se trabajó con aproximadamente 620 mL de aceite crudo. (2) En el proceso de filtración se utilizó un filtro de 0.5-1 mm. (3) La centrifugación se llevó a cabo a 2000 rpm por 10 minutos y el secado se realizó en una estufa magnética a 440 rpm, 90°C, durante 4 horas.

Cuadro 15. Retención de masa porcentual para cada una de las operaciones unitarias y procesos empleados en el tratamiento del aceite crudo de palma africana con muchos sólidos suspendidos (proceso sin sedimentación inicial).

| | Antes de proceso ($\pm 0.1g$) | Después de proceso ($\pm 0.1g$) | Masa retenida en proceso ($\pm 0.1g$) | Porcentaje máscico retenido |
|---------------------|---------------------------------------|---|--|--------------------------------|
| Inicial | 2034.1 | | | 100.00% |
| Sedimentación | - | - | - | - |
| Filtración | 2034.1 | 1210.5 | 823.6 | 40.49% |
| Filtración al vacío | 1210.5 | 815.7 | 394.8 | 19.41% |
| Centrifugación | 815.7 | 700.0 | 115.7 | 5.69% |
| Secado | 700.0 | 693.5 | 6.5 | 0.32% |
| | | | Total retenido | 65.91% |
| | | | Total aceite | 34.09% |

Notas: (1) En esta prueba se trabajó con aproximadamente 240 mL de aceite crudo. (2) En el proceso de filtración se utilizó un filtro de 0.5-1 mm. (3) La centrifugación se llevó a cabo a 2000 rpm por 10 minutos y el secado se realizó en una estufa magnética a 440 rpm, 90°C, durante 4 horas.

Cuadro 16. Cantidades requeridas y utilizadas de reactivos para la reacción de esterificación ácida en cada uno de los lotes de producción que aplican a esta reacción.

| Lote | Reactivo | Requerido | Usado |
|------|---|-----------|------------------|
| 1 | Aceite (g) | 143.0 | 143.0 ± 0.1 |
| | Metanol 99% m/m (g) | 15.73 | 15.7345 ± 0.0001 |
| | H ₂ SO ₄ 99% m/m (ml) | 0.62 | 1.14 ± 0.02 |
| 2 | Aceite (g) | 113.39 | 113.4 ± 0.1 |
| | Metanol 99% m/m (g) | 12.47 | 13.1034 ± 0.0001 |
| | H ₂ SO ₄ 99% m/m (ml) | 0.493 | 0.60 ± 0.02 |
| 3 | Aceite (g) | 117.6 | 117.6 ± 0.1 |
| | Metanol 99% m/m (g) | 13.83 | 15.7308 ± 0.0001 |
| | H ₂ SO ₄ 99% m/m (ml) | 0.55 | 0.62 ± 0.02 |
| 4 | Aceite (g) | 117.2 | 117.2 ± 0.1 |
| | Metanol 99% m/m (g) | 13.87 | 13.1492 ± 0.0001 |
| | H ₂ SO ₄ 99% m/m (ml) | 0.55 | 0.60 ± 0.02 |

Notas: (1) Las cantidades de reactivos requeridos se calcularon con las cantidades consultadas en la literatura que son necesarias para esta reacción. Estas cantidades corresponden a 11% de metanol al 99.9% (anhidro) y 0.8% de ácido sulfúrico al 96%, con respecto a la masa del aceite. Se trató de que la cantidad de aceite utilizada fuera un valor cercano a 120 gramos. (2) La Esterificación se llevó a cabo a 70°C y 99 kPa, con una agitación de 440 rpm durante 3 horas.

Cuadro 17. Valores máxicos obtenidos para los productos de las reacciones de esterificación ácida empleadas en los primeros 4 lotes de producción de biodiésel, y valores obtenidos para el proceso de secado del aceite esterificado en los procesos que aplican.

| Lote | Aceite esterificado (±0.1g) | Subproductos de esterificación (±0.1g) | Aceite esterificado seco (±0.1g) | Agua removida (±0.1g) |
|------|--------------------------------|--|--|--------------------------|
| 1 | 149.7 | 9.2 | - | - |
| 2 | 118.7 | 7.4 | - | - |
| 3 | 123.2 | 7.4 | 121.4 | 1.8 |
| 4 | 122.9 | 7.5 | 120.6 | 2.3 |

Notas: (1) El agua se removió con una operación de secado en una estufa magnética a 90°C y 440 rpm, durante 4 horas.

Cuadro 18. Cantidades requeridas y utilizados de reactivos para la reacción de transesterificación en cada uno de los lotes de producción de biodiésel.

| Lote | Reactivo | Requerido | Usado |
|------|--|-----------|------------------|
| 1 | Aceite (g) | 149.7 | 149.7 ± 0.1g |
| | Metanol 99% m/m (g) | 27.5 | 27.8 ± 0.1g |
| | NaOH (g) | 1.12 | 0.8910 ± 0.0001g |
| 2 | Aceite (g) | 118.7 | 118.7 ± 0.1g |
| | Metanol 99% m/m (g) | 21.8 | 28 ± 0.1g |
| | NaOH (g) | 0.89 | 0.9104 ± 0.0001g |
| 3 | Aceite (g) | 120.4 | 120.4 ± 0.1g |
| | Metanol 99% m/m (g) | 22.2 | 23.5 ± 0.1g |
| | NaOH (g) | 0.90 | 1.003 ± 0.0001g |
| 4 | Aceite (g) | 119.6 | 119.6 ± 0.1g |
| | Metanol 99% m/m (g) | 22.0 | 22.4 ± 0.1g |
| | NaOH (g) | 0.90 | 0.9340 ± 0.0001g |
| 5 | Aceite (g) | 120.3 | 120.3 ± 0.1g |
| | Metanol 99% m/m (g) | 22.1 | 22.8 ± 0.1g |
| | NaOH (g) | 0.90 | 0.9003 ± 0.0001g |
| 6 | Aceite (g) | 120.1 | 120.1 ± 0.1g |
| | Metanol 99% m/m (g) | 22.1 | 22.2 ± 0.1g |
| | NaOH (g) | 0.90 | 0.906 ± 0.0001g |
| 7 | Aceite (g) | 119.9 | 119.9 ± 0.1g |
| | Metanol 99% m/m (g) | 22.1 | 22.0 ± 0.1g |
| | H ₂ SO ₄ 99% m/m (g) | 0.45 | 0.4524 ± 0.0001g |
| 8 | Aceite (g) | 120.3 | 120.3 ± 0.1g |
| | Metanol 99% m/m (g) | 22.1 | 22.0 ± 0.1g |
| | H ₂ SO ₄ 99% m/m (g) | 0.45 | 0.4510 ± 0.0001g |

Notas: (1) Las cantidades de reactivos requeridos se calcularon con las cantidades consultadas en la literatura que son necesarias para esta reacción. Esto corresponde a 99.9% de metanol en una relación 6.7:1 molar con respecto al aceite, y 0.75% m/m de hidóxido de sodio con respecto a la masa total del medio. (2) La reacción se llevó a cabo a 60°C y 99 kPa, con una agitación de 440 rpm, durante 3 horas.

Cuadro 19. Masas obtenidas para los productos de las reacciones de transesterificación de los lotes de producción trabajados.

| Lote | Biodiésel producido sin lavar (± 0.1 g) | Subproductos (± 0.0001 g) |
|------|---|--------------------------------|
| 1 | 135.9 | 26.9844 |
| 2 | 105.0 | 22.5500 |
| 3 | 114.8 | 21.6147 |
| 4 | 118.6 | 21.3250 |
| 5 | 103.9 | 34.0050 |
| 6 | 100.0 | 38.7240 |
| 7 | 104.7 | 27.2467 |
| 8 | 106.3 | 30.0249 |

Notas: (1) En el lote 1 se utilizó 143 gramos de aceite crudo tratado. Para el resto de lotes se usó en promedio 120 gramos de aceite crudo tratado. (2) Refiérase al Cuadro 7 para saber los procesos involucrados en cada lote.

Cuadro 20. Masas del biodiésel obtenidas durante los procesos de limpieza (lavado y secado), con su respectiva cantidad de masa removida en cada proceso.

| Lote | Masa de biodiésel después de lavado (± 0.1 g) | Masa de biodiésel seco (± 0.1 g) | Masa removida en lavado (± 0.1 g) | Masa de agua removida en secado (± 0.1 g) | Masa total removida en procesos de lavado y secado (± 0.1 g) |
|------|--|---------------------------------------|--|--|---|
| 1 | 106.9 | 104.1 | 29.0 | 2.8 | 31.8 |
| 2 | 82.3 | 79.9 | 22.7 | 2.4 | 25.1 |
| 3 | 107.4 | 104.2 | 7.4 | 3.2 | 10.6 |
| 4 | 112.0 | 107.4 | 6.6 | 4.6 | 11.2 |
| 5 | 100.3 | 96.2 | 3.6 | 4.1 | 7.7 |
| 6 | 101.2 | 97.3 | -1.2 | 3.9 | 2.7 |
| 7 | 104.9 | 102.3 | -0.2 | 2.6 | 2.4 |
| 8 | 106.2 | 103.5 | 0.1 | 2.7 | 2.8 |

Notas: (1) En los lotes 6 y 7, la masa removida en el lavado fue negativa, pues la masa aumentó durante este proceso por el agua y jabones formados. (2) Con masa removida se hace referencia a la cantidad en masa de componentes removidos del biodiésel durante los procesos de lavado y secado del biodiésel. (3) Refiérase al Cuadro 7 para saber los procesos involucrados en cada lote.

Cuadro 21. Rendimiento de producción de biodiésel para los lotes trabajados.

| Lote | Masa aceite utilizado (± 0.1 g) | Masa biodiésel obtenida (± 0.1 g) | Rendimiento (m/m) |
|----------|---|---|-------------------|
| 1 | 143.0 | 104.1 | 72.80% |
| 2 | 113.4 | 79.9 | 70.46% |
| 3 | 125.7 | 104.2 | 82.90% |
| 4 | 126.1 | 107.4 | 85.17% |
| 5 | 120.3 | 96.2 | 79.97% |
| 6 | 120.1 | 97.3 | 81.02% |
| 7 | 119.9 | 102.3 | 85.32% |
| 8 | 120.3 | 103.5 | 86.03% |
| Promedio | | | 80.46% |

Nota: En los primeros 4 lotes la masa utilizada de aceite corresponde a la empleada inicialmente en sus respectivos procesos de esterificación Ácida. (2) Refiérase al Cuadro 7 para saber los procesos involucrados en cada lote.

Cuadro 22. Comparación de la masa obtenida de biodiésel con la masa teórica y la masa inicial de aceite crudo.

| Lote | Biodiésel obtenido (± 0.1 g) | Biodiésel | |
|------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | Estequiométricamente Teórico (g) | Aceite inicial (± 0.1 g) |
| 1 | 104.1 | 149.4 | 143.0 |
| 2 | 79.9 | 118.5 | 113.4 |
| 3 | 104.2 | 131.3 | 125.7 |
| 4 | 107.4 | 131.7 | 126.1 |
| 5 | 96.2 | 125.7 | 120.3 |
| 6 | 97.3 | 125.5 | 120.1 |
| 7 | 102.3 | 125.3 | 119.9 |
| 8 | 103.5 | 125.7 | 120.3 |

Notas: (1) El biodiésel teórico corresponde al biodiésel esperado estequiométricamente según la reacción de transesterificación. (2) Refiérase al Cuadro 7 para saber los procesos involucrados en cada lote.

Cuadro 23. Valores de pH obtenidos para el aceite crudo, el aceite crudo tratado y el aceite esterificado.

| Lote | pH del aceite crudo (± 0.050) | pH del aceite limpio (± 0.050) | pH del aceite esterificado (± 0.050) |
|------|--|---|---|
| 1 | 4.940 | 4.945 | 2.542 |
| 2 | 4.988 | 4.854 | 2.642 |
| 3 | 5.004 | 4.991 | 5.642 |
| 4 | 4.945 | 4.926 | 5.599 |
| 5 | 4.951 | 4.911 | - |
| 6 | 4.922 | 4.876 | - |
| 7 | 4.901 | 4.742 | - |
| 8 | 4.766 | 4.743 | - |

Notas: (1) El pH del aceite esterificado para los lotes 3 y 4 se midió después del proceso de secado. Esto no ocurrió para los lotes 1 y 2, pues estos no involucraban dicho proceso de secado por el análisis de variación planteado en la metodología.

Cuadro 24. Valores de pH obtenidos para los lavados de biodiésel.

| Lote | Antes de lavado (± 0.050) | Lavado 1 (± 0.050) | Lavado 2 (± 0.050) | Lavado 3 (± 0.050) | Lavado 4 (± 0.050) | Lavado 5 (± 0.050) | Lavado 6 (± 0.050) |
|------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 8.674 | 7.432 | 7.054 | 6.994 | 6.899 | - | - |
| 2 | 8.563 | 7.524 | 7.324 | 7.042 | 6.865 | - | - |
| 3 | 8.644 | 7.675 | 7.342 | 6.954 | 6.902 | - | - |
| 4 | 8.642 | 7.494 | 7.130 | 6.900 | 6.842 | - | - |
| 5 | 10.893 | 8.943 | 8.243 | 7.643 | 7.324 | 6.984 | 6.842 |
| 6 | 10.843 | 9.144 | 8.454 | 7.544 | 7.302 | 6.899 | 6.802 |
| 7 | 2.563 | 5.024 | 6.042 | 6.774 | 6.789 | - | - |
| 8 | 2.644 | 5.303 | 6.203 | 6.789 | 6.802 | - | - |

Notas: (1) En los lotes 5 y 6 fue necesario realizar dos lavados adicionales (en relación con el resto). (2) Para cada lavado se utilizó un promedio de 0.66 gramos de agua. (3) Los lavados se realizaron en una ampolla de decantación.

Cuadro 25. Porcentaje de agua requerido (con relación a la masa de biodiésel obtenido) para los lavados de biodiésel.

| Lote | Masa de biodiésel (± 0.1 g) | Agua de lavado utilizada (± 0.5 g) | Porcentaje de agua requerido (m/m) |
|------|-------------------------------------|--|---------------------------------------|
| 1 | 104.1 | 2.8 | 2.69% |
| 2 | 79.9 | 2.4 | 3.00% |
| 3 | 104.2 | 3.2 | 3.07% |
| 4 | 107.4 | 4.6 | 4.28% |
| 5 | 96.2 | 4.1 | 4.26% |
| 6 | 97.3 | 3.9 | 4.01% |
| 7 | 102.3 | 2.6 | 2.54% |
| 8 | 103.5 | 2.7 | 2.61% |

Cuadro 26. Porcentaje de humedad y materia volátil del aceite crudo que se utilizó en cada lote de producción.

| Lote | Medición | Antes de proceso (± 0.0001 g) | Después de proceso (± 0.0001 g) | Porcentaje humedad (m/m) | Porcentaje promedio humedad (m/m) | Desviación estándar |
|------|----------|---------------------------------------|---|--------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| 1 | 1 | 10.8783 | 10.8701 | 0.08% | 0.12% | 0.09% |
| | 2 | 12.2095 | 12.2020 | 0.06% | | |
| | 3 | 11.4652 | 11.4389 | 0.23% | | |
| 2 | 1 | 9.4244 | 9.4053 | 0.20% | 0.22% | 0.03% |
| | 2 | 8.5424 | 8.5209 | 0.25% | | |
| | 3 | 9.4924 | 9.4742 | 0.19% | | |
| 3 | 1 | 9.4520 | 9.4400 | 0.13% | 0.21% | 0.08% |
| | 2 | 8.9240 | 8.8994 | 0.28% | | |
| | 3 | 9.6660 | 9.6431 | 0.24% | | |
| 4 | 1 | 10.5150 | 10.4842 | 0.29% | 0.26% | 0.07% |
| | 2 | 9.9910 | 9.9724 | 0.19% | | |
| | 3 | 10.4320 | 10.3999 | 0.31% | | |
| 5 | 1 | 9.3413 | 9.3356 | 0.06% | 0.08% | 0.04% |
| | 2 | 9.6544 | 9.6499 | 0.05% | | |
| | 3 | 9.9965 | 9.9842 | 0.12% | | |
| 6 | 1 | 10.4524 | 10.3999 | 0.50% | 0.39% | 0.10% |
| | 2 | 9.5424 | 9.5101 | 0.34% | | |
| | 3 | 9.4524 | 9.4213 | 0.33% | | |
| 7 | 1 | 9.1344 | 9.1033 | 0.34% | 0.21% | 0.12% |
| | 2 | 9.8833 | 9.8731 | 0.10% | | |
| | 3 | 9.0010 | 8.9843 | 0.19% | | |
| 8 | 1 | 9.4242 | 9.4103 | 0.15% | 0.17% | 0.05% |
| | 2 | 9.5424 | 9.5203 | 0.23% | | |
| | 3 | 9.5431 | 9.5300 | 0.14% | | |

Notas: (1) Los análisis se realizaron triplicado. (2) Se utilizó el método AOAC 926.12.

Cuadro 27. Porcentaje de humedad y materia volátil del biodiésel producido en cada lote de producción. Comprobación de la ausencia de humedad.

| Lote | Antes de proceso (± 0.0001 g) | Después de proceso (± 0.0001 g) | Porcentaje de humedad (m/m) |
|------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
| 1 | 10.0245 | 10.0240 | 0.00% |
| 2 | 10.1231 | 10.1221 | 0.01% |
| 3 | 10.0313 | 10.0311 | 0.00% |
| 4 | 10.0991 | 10.0987 | 0.00% |
| 5 | 10.1413 | 10.1399 | 0.01% |
| 6 | 10.1191 | 10.1146 | 0.04% |
| 7 | 10.0496 | 10.0489 | 0.01% |
| 8 | 10.0413 | 10.0391 | 0.02% |

Notas: (1) Los análisis se realizaron triplicado. (2) Se utilizó el método AOAC 926.12.

Cuadro 28. Mediciones realizadas para la determinación del número ácido del aceite crudo después de tratarlo.

| Lote | Medición | Masa de aceite (± 0.0001 g) | Volumen utilizado para el blanco (± 0.05 mL) | Volumen utilizado de titulación (± 0.05 mL) | Número ácido | Promedio del número ácido | Desviación estándar |
|------|----------|-------------------------------------|--|---|--------------|---------------------------|---------------------|
| 1 | 1 | 7.1515 | 1.67 | 3.23 | 3.19% | 1.99% | 1.04% |
| | 2 | 7.0742 | 0.98 | 1.51 | 1.51% | | |
| | 3 | 7.0889 | 0.84 | 1.28 | 1.28% | | |
| 2 | 1 | 7.0454 | 0.87 | 1.34 | 1.34% | 1.28% | 0.07% |
| | 2 | 7.0744 | 0.92 | 1.28 | 1.28% | | |
| | 3 | 7.0524 | 0.95 | 1.21 | 1.21% | | |
| 3 | 1 | 7.0531 | 0.89 | 1.12 | 1.12% | 1.09% | 0.03% |
| | 2 | 7.0341 | 0.95 | 1.06 | 1.06% | | |
| | 3 | 7.1231 | 0.94 | 1.08 | 1.07% | | |
| 4 | 1 | 7.0641 | 0.9 | 0.87 | 0.87% | 0.79% | 0.07% |
| | 2 | 7.0577 | 0.9 | 0.76 | 0.76% | | |
| | 3 | 7.0994 | 0.91 | 0.75 | 0.75% | | |
| 5 | 1 | 7.1241 | 0.92 | 0.84 | 0.83% | 0.86% | 0.02% |
| | 2 | 7.0724 | 0.95 | 0.87 | 0.87% | | |
| | 3 | 7.0742 | 0.9 | 0.87 | 0.87% | | |
| 6 | 1 | 7.0942 | 0.87 | 0.79 | 0.79% | 0.81% | 0.02% |
| | 2 | 7.0555 | 0.88 | 0.82 | 0.82% | | |
| | 3 | 7.0642 | 0.88 | 0.81 | 0.81% | | |
| 7 | 1 | 7.1414 | 0.9 | 0.77 | 0.76% | 0.76% | 0.01% |
| | 2 | 7.0805 | 0.89 | 0.77 | 0.77% | | |
| | 3 | 7.2221 | 0.93 | 0.76 | 0.74% | | |
| 8 | 1 | 7.0554 | 0.89 | 0.81 | 0.81% | 0.80% | 0.01% |
| | 2 | 7.0562 | 0.92 | 0.80 | 0.80% | | |
| | 3 | 7.0938 | 0.92 | 0.80 | 0.80% | | |

Notas: (1) La solución utilizada para las titulaciones fue NaOH 0.25 N. (2) El procedimiento se realizó en triplicado. (3) Se utilizó el método estándar de la AOAC 940.28.

Cuadro 29. Mediciones realizadas para la determinación del número ácido del aceite esterificado.

| Lote | Medición | Masa de aceite ($\pm 0.0001\text{g}$) | Volumen utilizado para el blanco ($\pm 0.05\text{mL}$) | Volumen utilizado de titulación ($\pm 0.05\text{mL}$) | Número ácido | Promedio del número ácido | Desviación estándar |
|------|----------|--|---|--|--------------|---------------------------|---------------------|
| 1 | 1 | 1.0030 | 0.85 | 0.03 | 0.21% | 0.23% | 0.04% |
| | 2 | 1.0100 | 0.92 | 0.04 | 0.28% | | |
| | 3 | 1.0090 | 0.95 | 0.03 | 0.21% | | |
| 2 | 1 | 1.0020 | 0.95 | 0.04 | 0.28% | 0.28% | 0.07% |
| | 2 | 1.0101 | 0.90 | 0.03 | 0.21% | | |
| | 3 | 1.0220 | 0.87 | 0.05 | 0.35% | | |
| 3 | 1 | 1.0040 | 0.88 | 0.02 | 0.14% | 0.27% | 0.17% |
| | 2 | 1.0531 | 0.92 | 0.07 | 0.47% | | |
| | 3 | 1.0431 | 0.88 | 0.03 | 0.20% | | |
| 4 | 1 | 1.0843 | 0.82 | 0.02 | 0.13% | 0.23% | 0.09% |
| | 2 | 1.0070 | 0.85 | 0.04 | 0.28% | | |
| | 3 | 1.0025 | 0.85 | 0.04 | 0.28% | | |

Notas: (1) La solución utilizada para las titulaciones fue NaOH 0.25 N. (2) El procedimiento se realizó en triplicado. (3) Se utilizó el método estándar de la AOAC 940.28.

Cuadro 30. Mediciones realizadas para la determinación de la densidad del biodiésel producido en cada lote de producción.

| Lote | Medición | Masa ($\pm 0.0001\text{g}$) | Densidad ($\pm 3\text{kg/m}^3$) | Desviación estándar ($\pm 0.003\text{g/cm}^3$) | Temperatura de medición ($^{\circ}\text{C}$) |
|------|----------|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| 1 | 1 | 21.8306 | 866 | 0.0059 | 21.0 |
| | 2 | 21.7928 | 864 | | 21.0 |
| | 3 | 21.5439 | 855 | | 21.0 |
| 2 | 1 | 21.6042 | 857 | 0.0020 | 22.0 |
| | 2 | 21.6040 | 857 | | 22.0 |
| | 3 | 21.6999 | 861 | | 22.0 |
| 3 | 1 | 21.8931 | 868 | 0.0032 | 20.0 |
| | 2 | 21.8300 | 866 | | 20.0 |
| | 3 | 21.7349 | 862 | | 20.0 |
| 4 | 1 | 22.0310 | 874 | 0.0004 | 20.0 |
| | 2 | 22.0503 | 875 | | 20.0 |
| | 3 | 22.0431 | 874 | | 20.0 |
| 5 | 1 | 21.7843 | 864 | 0.0012 | 21.0 |
| | 2 | 21.8432 | 866 | | 21.0 |
| | 3 | 21.7903 | 864 | | 21.0 |
| 6 | 1 | 21.2012 | 841 | 0.0101 | 22.0 |
| | 2 | 21.7541 | 863 | | 22.0 |
| | 3 | 21.5413 | 854 | | 22.0 |
| 7 | 1 | 22.8932 | 908 | 0.0026 | 21.5 |
| | 2 | 22.8211 | 905 | | 21.5 |
| | 3 | 22.7521 | 903 | | 21.5 |
| 8 | 1 | 22.7525 | 903 | 0.0031 | 21.5 |
| | 2 | 22.9020 | 908 | | 21.5 |
| | 3 | 22.8932 | 908 | | 21.5 |

Notas: (1) El procedimiento se realizó en triplicado. (2) El volumen del picnómetro utilizado es de 25.210 cm^3 .
(3) Se utilizó el método de la AOAC 985.19.

Cuadro 31. Mediciones realizadas para la determinación del aceite de palma africana después de tratarlo.

| Lote | Masa ($\pm 0.0001\text{g}$) | Densidad ($\pm 0.003\text{kg/m}^3$) | Temperatura de medición ($^{\circ}\text{C}$) |
|------|-------------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 21.6414 | 858 | 21 |
| 2 | 21.6310 | 858 | 21 |
| 3 | 21.7313 | 862 | 21 |
| 4 | 21.6841 | 860 | 21 |
| 5 | 21.5431 | 855 | 21 |
| 6 | 21.5431 | 855 | 21 |
| 7 | 22.5313 | 894 | 21 |
| 8 | 22.4134 | 889 | 21 |

Notas: (1) El volumen del picnómetro utilizado es de 25.210 cm^3 . (2) Se utilizó el método de la AOAC 985.19.

Cuadro 32. Mediciones realizadas para la determinación de la viscosidad cinemática del aceite crudo después de tratarlo.

| Lote | Medición | Tiempo ($\pm 0.32s$) | Viscosidad cinemática (± 0.03 cSt) | Viscosidad cinemática promedio (± 0.03 cSt) | Desviación estándar (cSt) |
|------|----------|---------------------------|---|---|---------------------------------|
| 1 | 1 | 56.24 | 5.38 | 5.58 | 0.190 |
| | 2 | 60.21 | 5.76 | | |
| | 3 | 58.42 | 5.59 | | |
| 2 | 1 | 51.41 | 4.92 | 4.99 | 0.081 |
| | 2 | 51.80 | 4.96 | | |
| | 3 | 53.03 | 5.08 | | |
| 3 | 1 | 49.93 | 4.78 | 4.84 | 0.054 |
| | 2 | 51.04 | 4.89 | | |
| | 3 | 50.67 | 4.85 | | |
| 4 | 1 | 52.39 | 5.01 | 5.17 | 0.166 |
| | 2 | 53.78 | 5.15 | | |
| | 3 | 55.83 | 5.34 | | |
| 5 | 1 | 53.00 | 5.07 | 5.07 | 0.021 |
| | 2 | 52.77 | 5.05 | | |
| | 3 | 53.21 | 5.09 | | |
| 6 | 1 | 60.54 | 5.79 | 5.65 | 0.123 |
| | 2 | 58.21 | 5.57 | | |
| | 3 | 58.43 | 5.59 | | |
| 7 | 1 | 56.72 | 5.43 | 5.53 | 0.124 |
| | 2 | 59.23 | 5.67 | | |
| | 3 | 57.42 | 5.50 | | |
| 8 | 1 | 58.19 | 5.57 | 5.68 | 0.180 |
| | 2 | 58.39 | 5.59 | | |
| | 3 | 61.54 | 5.89 | | |

Notas: (1) El procedimiento se realizó en triplicado. (2) La constante del viscosímetro utilizado a 40°C es de 0.09572 cSt/s. (3) Se utilizó el método de la ASTM D445-06.

Cuadro 33. Mediciones realizadas para la determinación de la viscosidad del biodiésel producido en cada lote de producción.

| Lote | Tiempo ($\pm 0.32s$) | Viscosidad cinemática (± 0.03 cSt) |
|------|------------------------|---|
| 1 | 396.78 | 37.98 |
| 2 | 405.54 | 38.82 |
| 3 | 400.53 | 38.34 |
| 4 | 397.49 | 38.05 |
| 5 | 401.79 | 38.46 |
| 6 | 407.33 | 38.99 |
| 7 | 405.66 | 38.83 |
| 8 | 403.81 | 38.65 |

Notas: (1) La constante del viscosímetro utilizado a 40°C es de 0.09572 cSt/s. (2) Se utilizó el método de la ASTM D445-06.

Cuadro 34. Índices de refracción obtenidos para el biodiésel producido en cada lote.

| Lote | Medición | Índice de refracción (± 0.00050) | Índice de refracción promedio (± 0.00050) | Desviación estándar |
|------|----------|---|---|------------------------|
| 1 | 1 | 1.44421 | 1.44353 | 0.0006 |
| | 2 | 1.44331 | | |
| | 3 | 1.44308 | | |
| 2 | 1 | 1.38093 | 1.38148 | 0.0039 |
| | 2 | 1.38561 | | |
| | 3 | 1.37789 | | |
| 3 | 1 | 1.44403 | 1.44584 | 0.0016 |
| | 2 | 1.44660 | | |
| | 3 | 1.44690 | | |
| 4 | 1 | 1.44942 | 1.44923 | 0.0002 |
| | 2 | 1.44913 | | |
| | 3 | 1.44914 | | |
| 5 | 1 | 1.46788 | 1.46948 | 0.0014 |
| | 2 | 1.47001 | | |
| | 3 | 1.47054 | | |
| 6 | 1 | 1.50675 | 1.50576 | 0.0041 |
| | 2 | 1.50123 | | |
| | 3 | 1.50931 | | |
| 7 | 1 | 1.49012 | 1.49217 | 0.0018 |
| | 2 | 1.49308 | | |
| | 3 | 1.49331 | | |
| 8 | 1 | 1.53941 | 1.53624 | 0.0031 |
| | 2 | 1.53600 | | |
| | 3 | 1.53331 | | |

Notas: (1) Las mediciones se realizaron en triplicado. (2) Las lecturas se realizaron a 20°C. El procedimiento se realizó en triplicado. (3) Se utilizó el método de la AOAC 921.08.

Cuadro 35. Resultados obtenidos de las pruebas cualitativas: prueba 3/27 y prueba de agua y sedimentos.

| Lote | Prueba 327 | Prueba agua y sedimentos |
|------|------------|--------------------------|
| 1 | No | No |
| | No | No |
| | No | No |
| 2 | No | No |
| | No | No |
| | No | No |
| 3 | No | No |
| | No | No |
| | No | No |
| 4 | No | No |
| | No | No |
| | No | No |
| 5 | No | No |
| | No | No |
| | No | No |
| 6 | No | No |
| | No | No |
| | No | No |
| 7 | No | No |
| | No | No |
| | No | No |
| 8 | No | No |
| | No | No |
| | No | No |

Notas: (1) Un Sí indica que sí hay presencia de aceite en el biodiésel, y que sí hay agua o sedimentos, respectivamente. Un NO, indica lo opuesto. (2) Se utilizó la prueba 3/27 de Jan Warneqvist y el método ASTM D2709-06 para la prueba de agua y sedimentos.

Cuadro 36. Punto de fusión para los sólidos suspendidos en el aceite crudo.

| Muestra | Punto de fusión ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) |
|----------|---|
| 1 | 47 |
| 2 | 44 |
| 3 | 56 |
| 4 | 46 |
| 5 | 48 |
| 6 | 52 |
| 7 | 49 |
| 8 | 50 |
| Promedio | 49 |

Notas: (1) Para esta determinación se fue subiendo gradualmente la temperatura de los sólidos (recolectados en un Beaker) hasta observar su cambio de fase por fusión.

B. CÁLCULOS

Cálculo 1: Determinación de la masa retenida en el proceso de sedimentación para el tratamiento del primer lote de aceite crudo tratado. Se utilizan los datos del Cuadro 8 de resultados como ejemplo para este cálculo.

$$\text{Ecuación 1} \quad \text{Masa Retenida} = \text{Masa antes de proceso} - \text{Masa después de proceso}$$

$$\text{Ecuación 2} \quad \text{Masa Retenida} = 462.1 \pm 0.1 \text{ g} - 322.9 \pm 0.1 \text{ g} = 139.2 \pm 0.1 \text{ g}$$

Cálculo 2: Determinación del porcentaje de masa retenida en el proceso de sedimentación para el tratamiento del primer lote de aceite crudo tratado. Se utilizan los datos del Cuadro 8 de resultados como ejemplo para este cálculo.

$$\text{Ecuación 3} \quad \text{Porcentaje Retenido} = \frac{\text{Masa Retenida}}{\text{Masa inicial}} * 100\%$$

$$\text{Ecuación 4} \quad \text{Porcentaje Retenido} = \left(\frac{139.2 \pm 0.1 \text{ g}}{461.2 \pm 0.1 \text{ g}} \right) * 100\% = 30.12\% \frac{m}{m}$$

Cálculo 3: Rendimiento de producción del biodiésel. Como ejemplo se realiza el cálculo para el rendimiento de producción del primer lote. Véase el Cuadro 13 de resultados para comparar valores.

$$\text{Ecuación 5} \quad \eta = \text{rendimiento} = \left(\frac{\text{Masa biodiésel obtenida}}{\text{Masa inicial de aceite crudo tratado}} \right) * 100\%$$

$$\text{Ecuación 6} \quad \eta = \left(\frac{104.1 \pm 0.1 \text{ g}}{143.0 \pm 0.1 \text{ g}} \right) * 100\% = 72.80\%$$

Cálculo 4: Determinación de la cantidad teórica esperada de biodiésel.

Para este cálculo se necesita información de la literatura. Se requiere el peso molecular promedio del aceite crudo de palma y del biodiésel. Estos valores se muestran en la sección de Propiedades Físicas del Marco Teórico de este trabajo. Estas corresponden a 850 g/gmol y 296 g/gmol, respectivamente. Además, también se requiere el conocimiento de que la relación estequiométrica del aceite (triglicéridos) y el biodiésel (metil ésteres) es de 1:3, según la reacción de transesterificación mostrada en la sección de Reacciones Involucradas del Marco Teórico de este trabajo.

Como ejemplo, se calcula el biodiésel teórico para el primer lote de producción. Véase el Cuadro 14.

$$\text{Ecuación 7} \quad 143.0 \pm 0.1 \text{ g} * \frac{1 \text{ gmol aceite}}{850 \text{ g aceite}} * \frac{3 \text{ gmol biodiésel}}{1 \text{ gmol aceite}} * \frac{296 \text{ g biodiésel}}{1 \text{ gmol biodiésel}} =$$

$$149.4 \text{ g biodiésel}$$

Cálculo 5: Determinación metanol requerido para la esterificación ácido del lote 1 de producción de biodiésel.

En este caso se calcula la cantidad de metanol requerido como ejemplo. Esto se realiza según el porcentaje másico consultado en la literatura que se requiere de metanol con respecto al aceite. Véase la sección de Pretratamiento en la Metodología de este trabajo para más información. Nótes. Este mismo procedimiento se realizó para el cálculo de las cantidades requeridas de otros reactivos en las esterificaciones y transesterificaciones realizadas, según las cantidades necesarias de cada reactivo según la metodología propuesta.

$$\text{Ecuación 8} \quad \text{Metanol requerido} = \text{Masa aceite crudo} * 11\% \frac{m}{m} * \text{pureza}$$

$$\text{Ecuación 9} \quad \text{Metanol requerido} = 143.0 \pm 0.1 \text{ g aceite} * \frac{0.11 \text{ g metanol}}{1 \text{ g aceite}} * \frac{0.99 \text{ g metanol puro}}{1 \text{ g metanol}}$$

$$\text{Ecuación 10} \quad \text{Metanol requerido} = 15.73 \text{ g metanol puro}$$

Cálculo 6: Determinación del porcentaje de humedad y materia volátil. Se utilizan los datos del Cuadro 27 como ejemplo. Este cálculo corresponde al porcentaje de humedad calculada para la primera medición del primero lote de producción de biodiésel.

$$\text{Ecuación 11} \quad \text{Porcentaje Humedad} = \left(\frac{\text{Masa después de secado}}{\text{Masa antes de secado}} \right) * 100\%$$

$$\text{Ecuación 12} \quad \text{Porcentaje Humedad} = \left(\frac{10.8701}{10.8783} \right) * 100\% = 0.08\% \frac{m}{m}$$

Cálculo 7: Determinación de la densidad del aceite crudo después de tratarlo. Como ejemplo se muestra el cálculo para la densidad de la primera medición del primer lote de producción de biodiésel (ver Cuadro 31). Lo mismo se realizó para el cálculo de la densidad del biodiésel. El volumen del picnómetro utilizado fue de 25.210 cm³ a 20°C. La temperatura de medición fue de 27.3°C

$$\text{Ecuación 13} \quad \rho = \text{densidad} = \frac{\text{masa tarada picnómetro}}{\text{volumen picnómetro}} * \frac{\text{Temperatura estándar}}{\text{Temperatura medición}}$$

$$\text{Ecuación 14} \quad \rho = \frac{21.8306 \pm 0.0001 \text{ g}}{25.210 \text{ cm}^3} * \frac{20^\circ\text{C}}{21^\circ\text{C}} = 0.825 \pm 0.003 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

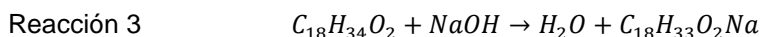
Cálculo 8: Determinación de la viscosidad cinemática. Para este ejemplo se calcula la viscosidad del aceite crudo tratado. El cálculo es el mismo para el caso del biodiésel. La constante (k) del viscosímetro utilizado a 40°C es de 0.09572 cSt/s. El tiempo al que se hace referencia en la siguiente ecuación, es el tiempo que transcurre desde que el aceite parte de la línea superior del capilar y llega hasta la línea inferior del capilar del viscosímetro, por acción de la fuerza de la gravedad.

$$\text{Ecuación 15} \quad \mu = \text{viscosidad cinemática} = \text{Tiempo} * k$$

$$\text{Ecuación 16} \quad \mu = (56.24 \pm 0.32 \text{ s}) * 0.09572 \frac{\text{cSt}}{\text{s}} = 5.38 \pm 0.03 \text{ cSt}$$

Cálculo 9. Determinación del número ácido del aceite crudo tratado. Como ejemplo se determina el número ácido para la primera medición del primer lote de producción de biodiésel.

Es importante saber que el método utilizado de la AOAC 940.28 calcula el número ácido asumiendo que los ácidos grasos corresponden al ácido oleico, La reacción de neutralización de dicho ácido con NaOH 0.25 N es la siguiente:



Según la reacción 3, la relación molar entre el ácido oleico (C₁₈H₃₄O₂) y el hidróxido de sodio es de 1:1. Basándose en ello, se procede con el cálculo de la siguiente manera. El peso molecular del ácido oleico es de 282.46 g/gmol

$$\text{Ecuación 17} \quad 3.23 \text{ mL NaOH} * \frac{0.25 \text{ eq NaOH}}{1000 \text{ mL NaOH}} * \frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ eq NaOH}} * \frac{1 \text{ mol C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2}{1 \text{ mol NaOH}} * \frac{282.46 \text{ g C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2}{1 \text{ mol C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2} = 3.19\% \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Los 3.23 mL NaOH corresponden a la cantidad de solución NaOH 0.25 N que se utilizó para neutralizar el ácido oleico hasta lograr el viraje de la fenolftaleína.

C. FIGURAS

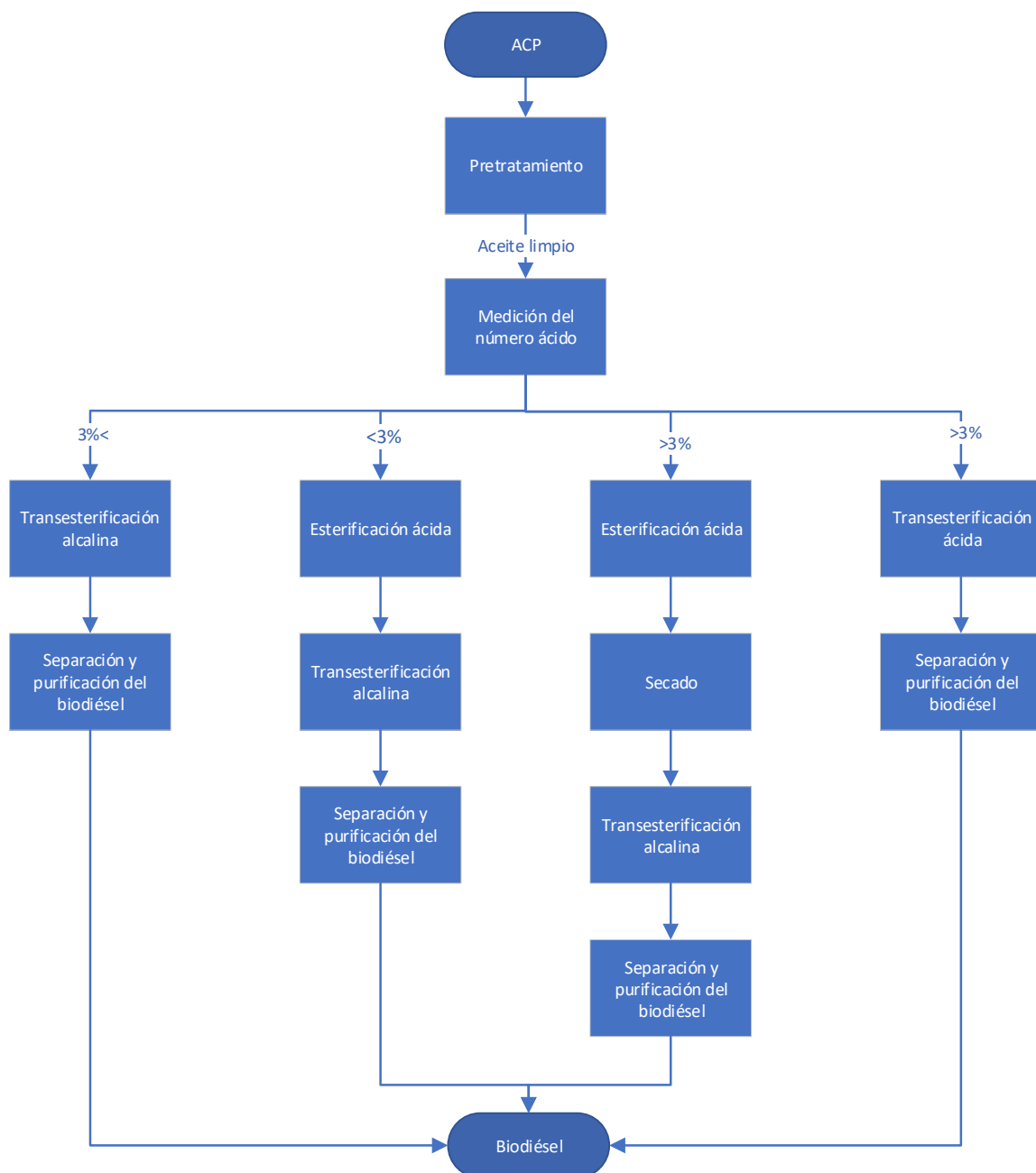
Figura 7. Aceite crudo de palma con pocos sólidos suspendidos.



Figura 8. Aceite crudo de palma con muchos sólidos suspendidos



Figura 9. Árbol de decisiones según las variaciones del número ácido del aceite crudo de palma africana para la producción de biodiésel.



Notas: (1) ACP se refiere al aceite crudo de palma africana. (2) Los porcentajes mostrados corresponden al número ácido del aceite limpio, es decir, del aceite crudo después de haber pasado por el proceso de pretratamiento.