



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**OBTENCIÓN DE UN CATALIZADOR A PARTIR DEL
CASCARÓN DE HUEVO Y SU APLICACIÓN EN LA
OBTENCIÓN DE BIODIESEL**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

ABRIL JANET LILI GALICIA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: JAIME PIO NORIEGA BERNECHEA

VOCAL: Profesor: CARLOS GUZMAN DE LAS CASAS

SECRETARIO: Profesor: JOSE ANTONIO ARCOS CASARRUBIAS

1er. SUPLENTE: Profesor: MA GUADALUPE LEMUS BARAJAS

2do. SUPLENTE: Profesor: LINO JOEL REYES TREJO

SITIOS DONDE SE REALIZÓ EL TEMA

LABORATORIO 208, DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ORGÁNICA, DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO, EDIFICIO B, FACULTAD DE QUÍMICA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

LABORATORIO DE PRODUCTOS NATURALES, ÁREA DE QUÍMICA, DEPARTAMENTO DE PREPARATORIA AGRÍCOLA. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHAPINGO

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC (TESE)

ASESOR DEL TEMA: MTRO. JAIME NORIEGA BERNECHEA

SUPERVISOR TÉCNICO: DR. LINO JOEL REYES TREJO

SUSTENTANTE: ABRIL JANET LILI GALICIA

GLOSARIO

Mtep: Millones de toneladas equivalentes de petróleo

ALC: América Latina y el Caribe

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

GEI: Gases de Efecto Invernadero

MtCO₂e: Tonelada métrica equivalente de dióxido de carbono

ASTM: International (American Society for Testing and Materials)

EN: Normativa Europea

AVU: Aceite vegetal usado de papas fritas

SEM: Microscopía Electrónica de Barrido

FAME: Ácido graso de metil ester

Mm³/a: Millones de metros cúbicos por año

GWh_e /a: Giga watt- Hora eléctrico por año

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1.-INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2.- OBJETIVOS E HIPÓTESIS | 2 |
| 2.1. Objetivo General. | 2 |
| 2.2. Objetivos Particulares | 2 |
| 2.3. Hipótesis | 2 |
| 3. ANTECEDENTES | 3 |
| 3.1 Consumo energético y su impacto ambiental | 3 |
| 3.2 Biomasa como fuente de energía alterna | 4 |
| 3.2.1 Aprovechamiento de la biomasa proveniente de las agroindustrias | 4 |
| 3.2.2 Aceite vegetal usado (AVU) | 7 |
| 3.3 Biocombustibles | 9 |
| 3.3.1 Biogás | 9 |
| 3.3.2 Bioetanol | 12 |
| 3.3.3 Biodiesel | 13 |
| 3.3.4 El Cascarón de huevo como catalizador para obtener biodiesel. | 16 |
| 3.3.5 Normas para la utilización de biocombustibles. | 18 |
| 3.4 Catálisis | 23 |
| 3.4.1 Catálisis Heterogénea | 23 |
| 3.4.2. Adsorción. | 23 |
| 3.4.3 Isotermas de adsorción | 24 |
| 3.4.4 Quimisorción | 27 |
| 3.4.5 Cinética de la reacción sólido-líquido | 28 |
| 3.4.6 Langmuir Rideal o Eley-Rideal | 29 |
| 3.4.7 Elovich | 30 |



| | |
|--|----|
| 4. METODOLOGÍA | 31 |
| 4.1 Materia prima | 31 |
| 4.2 Limpieza del cascarón de huevo | 31 |
| 4.3 Síntesis del catalizador (CaO) a partir del cascarón de huevo | 31 |
| 4.4 Propiedades del AVU | 33 |
| 4.4.1 Determinación del índice de acidez..... | 33 |
| 4.4.2 Determinación del índice de Iodo | 33 |
| 4.4.3 Viscosidad cinemática y densidad..... | 34 |
| 4.4.4 Calor de combustión | 35 |
| 4.5 Pretratamiento del AVU..... | 37 |
| 4.5.1 Pretratamiento básico. | 37 |
| 4.5.2 Pretratamiento Acuoso..... | 37 |
| 4.5.3 Pretratamiento Ácido..... | 37 |
| 4.6 Reacción de transesterificación..... | 39 |
| 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 41 |
| 5.1.1 Propiedades del AVU | 41 |
| 5.1.2 Índice de acidez | 41 |
| 5.1.3 Índice de yodo..... | 42 |
| 5.1.4 Densidad del AVU..... | 42 |
| 5.1.5 Viscosidad del AVU..... | 44 |
| 5.2 Pretratamiento del AVU..... | 45 |
| 5.2.1 Calor de combustión del AVU | 46 |
| 5.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) del CaO obtenido del cascarón de huevo una vez efectuada la calcinación..... | 47 |
| 5.4 Transesterificación..... | 48 |
| 5.5 Propiedades del biodiesel obtenido..... | 50 |
| 5.5.1 Calor de combustión | 50 |



| | |
|--|----|
| 5.5.2 Densidad..... | 51 |
| 5.5.3 Viscosidad cinemática..... | 52 |
| 5.6 Propuesta mecanismo de reacción | 55 |
| 6. CONCLUSIONES | 56 |
| 7.- BIBLIOGRAFÍA..... | 57 |
| 8.- ANEXOS..... | 67 |
| 8.1 Equipo para efectuar la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y aspecto del cascarón molido | 67 |
| 8.2 Proceso para reutilización de la cáscara de huevo tratada térmicamente | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 1.- Residuos agroindustriales y su posible aplicación.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Figura 2.- Reacciones durante la fritura</i> | <i>8</i> |
| <i>Figura 3.- Planta productora de biogás</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 4.- Proceso en la obtención de bioetanol mediante diversas fuentes de materia prima. .12</i> | |
| <i>Figura 5.- Reacción de transesterificación con metanol</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 6.-Aplicaciones del biodiesel.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 7.-Transesterificación en presencia de CaO (como catalizador)</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 8. Cinética de la reacción.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 9.- Representación esquemática Langmuir-Rideal o Eley-Rideal</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 10. Obtención de un catalizador heterogéneo.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 11.-Calorímetro Isoperibólico Automático Parr 6400</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 12. Obtención y caracterización del AVU.</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 13. Pretratamiento del AVU.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 14.-Reacción de transesterificación</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 15. Transesterificación.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 16.- Composición química elemental de nano polvo del cascarón de huevo calcinado por Microscopía Electrónica de Barrido.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Figura 17.-Mapeo de la cáscara de huevo calcinada</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 18.-Productos de transesterificación, separados con centrifugadora.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 19. Equipo utilizado para efectuar la Microscopía Electrónica de.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Barrido.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 20.-Aspecto del cascarón de huevo molido.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 21.-Recuperación de CaO.....</i> | <i>68</i> |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | |
|--|-----------|
| <i>Gráfica. 1. Demanda de petróleo en México y América Central por sector en el año 2019</i> | <i>3</i> |
| <i>Gráfica. 2. Biomasa residual en México</i> | <i>6</i> |
| <i>Gráfica. 3. Densidad del AVU vs Temperatura.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Gráfica. 4. Viscosidad cinemática AVU. vs Temperatura</i> | <i>45</i> |
| <i>Gráfica. 5. Comparación de los métodos de pretratamiento.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Gráfica. 6. Densidad de biodiesel con KOH, CaO y diésel PEMEX.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Gráfica. 7. Viscosidad cinemática de biodiesel con KOH, CaO y diésel PEMEX.....</i> | <i>54</i> |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1. Agroindustria alimentaria en México.....</i> | <i>5</i> |
| <i>Tabla 2. Tipos de catalizadores utilizados para la obtención de biodiesel.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Tabla 3. Especificaciones mexicanas de calidad y características del biodiésel (B100).....</i> | <i>20</i> |
| <i>Tabla 4. Especificaciones para el biodiesel EN y ASTM.</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 5. Índice de acidez AVU.</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabla 6. Índice de yodo del AVU.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Tabla 7. Densidad del AVU a diferentes temperaturas.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Tabla 8. Viscosidad del AVU a diferentes temperaturas.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Tabla 9. Índice de Acidez pretratamiento Básico, Acuoso, Ácido y sin pretratamiento</i> | <i>45</i> |
| <i>Tabla 10. Rendimiento de la reacción de transesterificación.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Tabla 11. Densidad de biodiésel con KOH, CaO y diésel PEMEX.</i> | <i>51</i> |
| <i>Tabla 12. Viscosidad cinemática de biodiesel con KOH, CaO y diésel PEMEX.</i> | <i>53</i> |

1.-INTRODUCCIÓN

La demanda en el consumo de petróleo como fuente de energía en el mundo conlleva a problemas ambientales, la escasez de este recurso no renovable y su utilización descontrolada ha generado la necesidad de implementación de energías renovables, como la eólica, solar, geotérmica, entre otras.

Una fuente de energía renovable es la biomasa, la cual es obtenida en grandes cantidades de los residuos orgánicos que se generan en hogares, sectores agrícolas y en la industria agroalimentaria, entre otros.

Actualmente se han realizado diversos estudios en donde la biomasa juega un papel muy importante en la utilización como insumo para obtener bioetanol, biogás, biodiesel, etc. La producción de biodiesel se lleva a cabo mediante una reacción de transesterificación de aceite vegetal o grasas animales, un alcohol de cadena corta y un catalizador. Algunas opciones para producir biodiesel son las siguientes: aceite vegetal usado de cocina (AVU) y aceites de semillas de diversas leguminosas. Sin embargo, es recomendable emplear aceites y grasas proveniente de fuentes no alimentarias o de residuos orgánicos. Si bien, el catalizador más empleado en la industria para obtener biodiesel es el hidróxido de sodio (NaOH), diversos catalizadores obtenidos de residuos orgánicos son utilizados con éxito en la reacción de la transesterificación, por ejemplo, la cáscara de huevo y las conchas de moluscos. Estos residuos pueden ser sometidos a tratamiento térmico para obtener Óxido de Calcio, un catalizador eficiente en la obtención de biodiesel.

Cabe destacar que el huevo es un alimento consumido en grandes cantidades a nivel mundial generando cantidades considerables de cáscara, lo que lleva a la comunidad científica a tener interés en su aplicación a nivel industrial. Entre las ventajas del empleo del CaO obtenido de la cáscara de huevo, para la obtención de biodiesel, están las siguientes: a) se separa con facilidad del producto final de la reacción, b) se puede reutilizar y es amigable con el ambiente al no requerir de agua o ácidos para separar el producto final, c) resulta económico si se considera de donde proviene.

El presente trabajo, tiene como finalidad investigar al Óxido de Calcio (CaO) obtenido del cascarón de huevo mediante tratamiento térmico como catalizador heterogéneo para la producción de biodiesel en una reacción de transesterificación del AVU.

2.- OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo General.

Obtención de un catalizador heterogéneo proveniente de la cáscara de huevo tratada térmicamente y su aplicación en la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal usado.

2.2. Objetivos Particulares

- Obtención del óxido de calcio a partir de cascarón de huevo mediante tratamiento térmico.
- Caracterización del catalizador obtenido.
- Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado de cocina pretratado.
- Determinación de los parámetros de calidad del biodiesel obtenido.
- Propuesta para la identificación del paso controlante de la rapidez de reacción catalítica en la obtención de biodiesel mediante el modelo de Langmuir Rideal o Eley Rideal.

2.3. Hipótesis

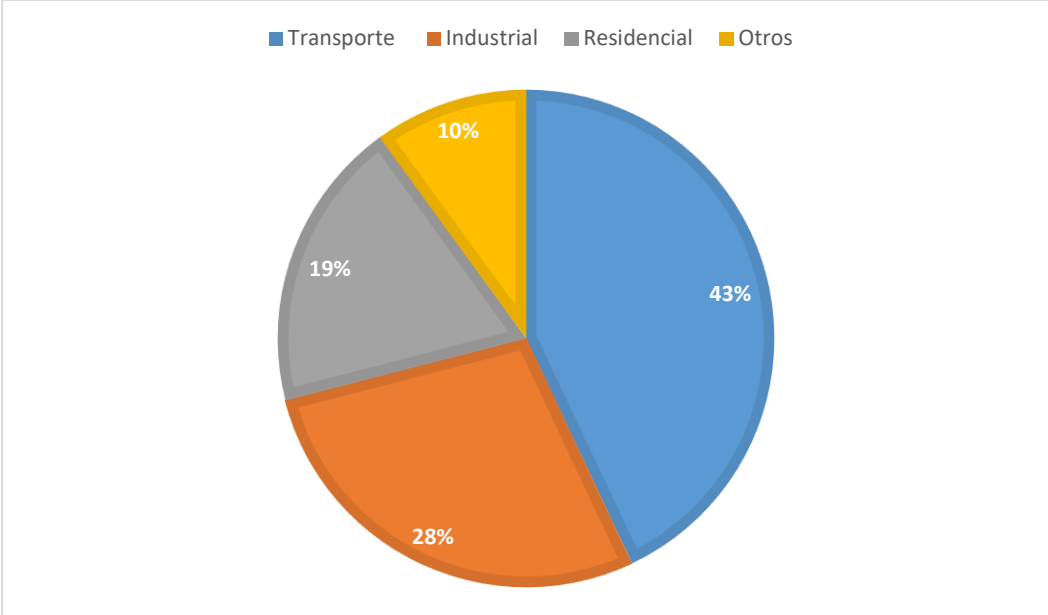
El óxido de calcio obtenido del cascarón de huevo tratado térmicamente, representará una alternativa viable como catalizador para obtener biodiesel a partir de aceite vegetal usado (AVU), con los parámetros de calidad requeridos.

3. ANTECEDENTES

3.1 Consumo energético y su impacto ambiental

A partir de la segunda mitad del siglo XIX la utilización del petróleo se incrementó en diversos sectores de la actividad económica generando avances tecnológicos.

Actualmente los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda de energía primaria a nivel mundial y es la fuente de aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO₂. (Foster et al., 2023). El consumo de energía comercial en el mundo se ha incrementado, por ejemplo, en el 2019 los países de América Latina y el Caribe mostraron un consumo de 618 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), aproximadamente 4 veces más que el consumo registrado en 1973. La subregión mesoamericana, compuesta por México y América Central, presentó un consumo energético de 160 Mtep para el año 2019, lo que representa alrededor del 26% del consumo energético regional de ALC. Este consumo se concentra en los sectores transporte (43%), industrial (28%) y residencial (19%), los otros sectores cubren en conjunto el 10% restante, ver Gráfica 1 (OLADE, 2021)



Gráfica. 1. Demanda de petróleo en México y América Central por sector en el año 2019

(Elaboración propia con datos de OLADE, 2021)

Una de las fuentes más importantes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es el transporte, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) este sector emite en México alrededor de 171 MtCO₂e (de un total de 683 MtCO₂e), lo que equivale aproximadamente al 25% de nuestras emisiones de gases de efecto invernadero (ICM, 2021).

Con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, se ha planteado la utilización de recursos energéticos renovables, los cuales son fuentes de energía no finitas, entre las cuales se encuentran: hidráulica, eólica, solar, geotérmica y la energía obtenida de la biomasa. (UNEP, s.f.)

3.2 Biomasa como fuente de energía alterna

La biomasa es de origen biológico, natural, totalmente respetuosa con el medio ambiente y cualquier materia orgánica obtenida a partir de vegetales o de animales puede ser convertida en otras formas de energía renovable (UM, 2023).

La biomasa, como recurso energético, puede clasificarse en biomasa natural y residual:

- Biomasa natural, es la que se produce en la naturaleza sin intervención humana.
- Biomasa residual, es el subproducto o residuo generado en las actividades agrícolas (poda, rastrojos, etc.), silvícolas y ganaderas, así como residuos sólidos de la industria agroalimentaria.

En México se producen 36 toneladas de basura orgánica por minuto (Asgrow, 2019), las cuales son depositadas en vertederos sin ningún tratamiento previo. Estos desechos orgánicos son una fuente abundante, de bajo costo y viable para generar diversas fuentes de energía alterna como el bioetanol, biogás, biodiesel, etc.

3.2.1 Aprovechamiento de la biomasa proveniente de las agroindustrias

La agroindustria es la actividad económica que comprende la producción, industrialización y comercialización de productos agropecuarios, forestales y otros recursos naturales (FIRCO, 2017). Así mismo, son responsables de la generación de cantidades considerable de residuos sólidos, líquidos y emisión de gases de efecto invernadero.

Las agroindustrias se dividen principalmente en alimentarias y no alimentarias, las primeras corresponden a las actividades relacionadas con el aporte de valor a productos que han sido extraídos de la naturaleza, en sectores como el agrícola o el ganadero; las últimas incluyen actividades económicas relacionadas con la producción y preparación de recursos naturales, recursos que posteriormente se convierten en materias primas susceptibles de ser utilizadas en procesos de producción de bienes acabados (Morales, F., & Westreicher, G.2021)

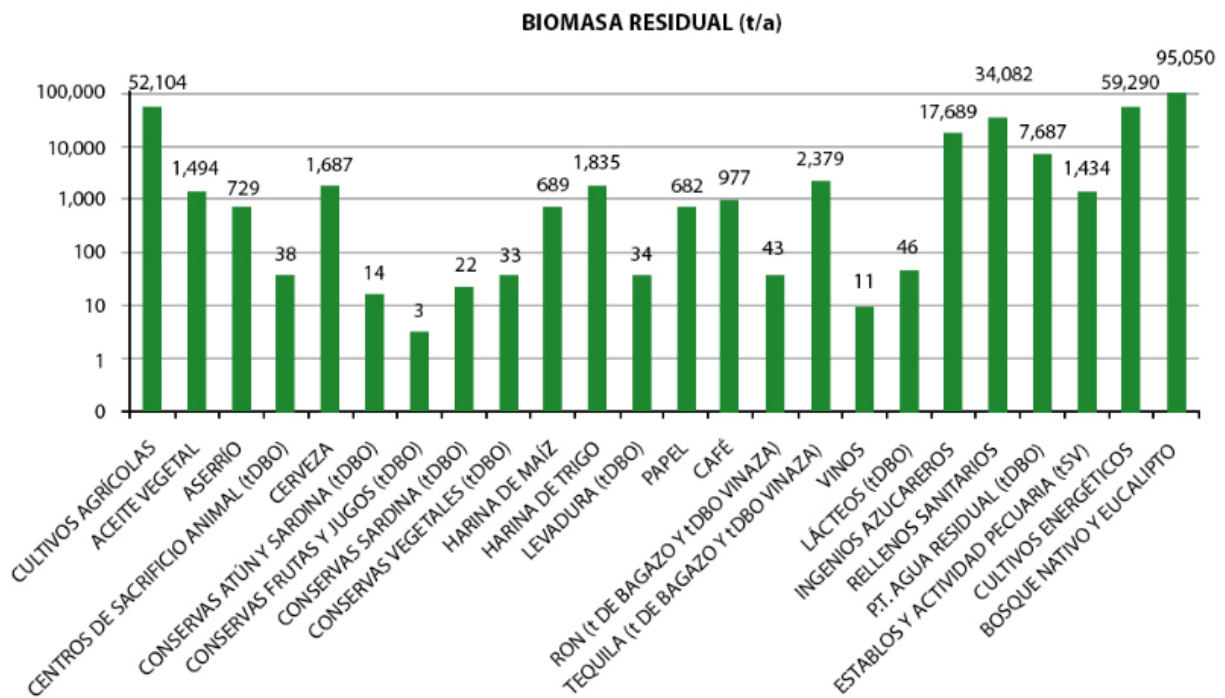
Las agroindustrias alimentarias presentes en el territorio mexicano (Tabla 1) generan huellas de agua, carbono y grandes cantidades de residuos; Por ello es necesario estimular la creación de programas que midan y cuantifiquen el consumo e insumos a lo largo de la cadena de suministro implementando acciones de mejora que no solo involucra la fase de producción sino también las etapas de suministro de materias primas, transporte , etapas de consumo y venta de los productos finales(Centro Mario Molina, 2018).

Tabla 1. Agroindustria alimentaria en México

| Algunas Agroindustrias Alimentarias presentes en el territorio Mexicano |
|---|
| <i>Conserva de vegetales y frutas</i> |
| <i>Producción de caña</i> |
| <i>Producción de aceite vegetal</i> |
| <i>Producción de agave</i> |
| <i>Producción de vino</i> |
| <i>Producción de leche</i> |

Elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Biomasa ANBIO 2021

Algunas fuentes de biomasa residual en México producidas en toneladas al año (Gráfica 2) evidencian los residuos generados, demostrando que nuestro territorio es una fuente viable y sustentable que puede utilizar la biomasa como una fuente de energía renovable beneficiando al medio ambiente, la economía y la sociedad.



Gráfica. 2. Biomasa residual en México

Obtenido del atlas Nacional de Biomasa ANBIO 2021

Los residuos agroindustriales presentan un potencial elevado de aprovechamiento gracias a su variada composición química, y esto se ve reflejado en la diversidad de alternativas existentes (Figura 1) para su reutilización entre los que se encuentran la obtención de bioenergéticos, proceso de compostaje, producción de alimentos para animales y elaboración de otros productos de interés (ladrillos, estibas, etc.) (Vargas, Y., & Pérez, L. 2018). Es importante conocer la calidad del residuo, cantidades generadas y averiguar si después de su utilización este genera otro residuo que puede ser empleado nuevamente en un proceso distinto. La utilización de residuos agroindustriales sólidos y líquidos será beneficioso a nivel industrial, al no incrementarse los costos, además de no generar competencia con el sector alimenticio para cubrir la demanda de materia prima requerida.



Figura 1.- Residuos agroindustriales y su posible aplicación
 Obtenida de Digital Ciencia @UAQRO 2019

3.2.2 Aceite vegetal usado (AVU)

El aceite vegetal es utilizado principalmente en hogares, comedores y restaurantes, es considerado como uno de los desechos más peligrosos al generar efectos adversos en la flora y fauna en medio acuático y terrestre. A pesar de ello, la mayor parte de la población mundial desecha el aceite vegetal usado directamente al alcantarillado o en bolsas de basura por consiguiente se busca recolectar el aceite vegetal usado con el propósito de contribuir a la generación de un insumo de valor agregado, disminución de la contaminación ambiental, además de incrementar la producción y el consumo de combustibles líquidos alternativos.

El aceite vegetal se encuentra expuesto a una gran cantidad de modificaciones químicas y físicas como consecuencia de la interacción entre el aceite, agua y otros componentes del alimento, trayendo consigo un deterioro al aumentar su tiempo de utilización (Rivera, 2014). Dentro de los diferentes deterioros que pueden llegar a presentarse se encuentra el incremento de acidez derivado de procesos de hidrólisis, termo oxidación a causa de las temperaturas elevadas, auto oxidación al ser transportada o distribuida de manera inadecuada, entre otras (Figura 2)

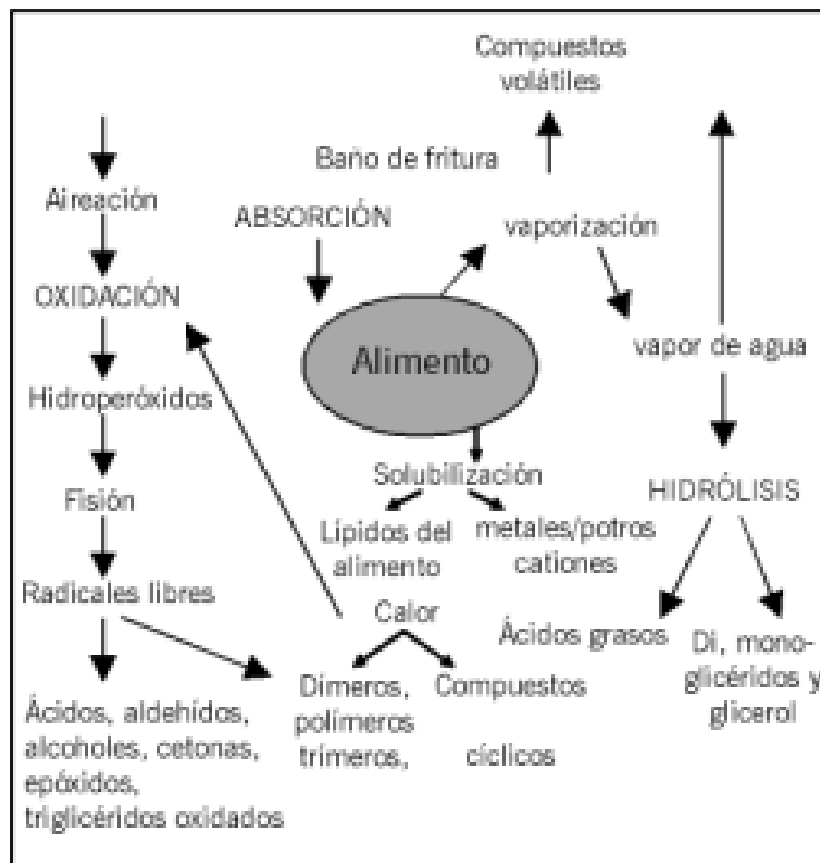


Figura 2.- Reacciones durante la fritura

Obtenida de (Juárez, M., & Sammán, N 2007)

3.3 Biocombustibles

Son aquellos combustibles derivados de la biomasa, rentables y considerados como una fuente de energía renovable.

Se clasifican en cuatro generaciones (Álvarez, 2009); (Cortés et al., 2019):

- Primera generación: Procedentes de cultivos agrícolas, de origen alimenticio. Algunos ejemplos son: el jugo de la caña de azúcar, granos de maíz, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de ricino, aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de maní o cacahuate, entre otros.
- Segunda generación: Materias primas que no provienen de fuentes alimenticias, provenientes de agroindustrias, residuos sólidos urbanos, insumos compuestos principalmente por celulosa. Ejemplos: el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallo, hojas y olote), paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, etcétera
- Tercera generación: Obtenidos de especies no comestibles, por ejemplo, los pastos perennes, árboles, plantas de crecimiento rápido, las algas verdes y verde-azules
- Cuarta generación: Producidas por bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean dióxido de carbono (CO₂)

Entre los diferentes tipos de biocombustibles encontramos al: bioetanol, biodiesel, biogás, etc.

3.3.1 Biogás

Se produce mediante una serie de reacciones bioquímicas durante la digestión anaeróbica de la biomasa, el cual, está constituido principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) puede ser capturado y usado como combustible y/o electricidad. De esta forma, la digestión anaeróbica, como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándose en bioabonos y al mismo tiempo, produce energía gaseosa (biogás). (Varnero, 2011)

En la actualidad, el biogás es una fuente de combustible utilizada a nivel mundial en los sectores industriales y domésticos. De esta manera se impulsa el desarrollo económico sostenible y ha proporcionado una fuente de energía renovable.

Ventajas

- Energía renovable.
- Reduce los niveles de metano en la atmósfera.
- Utilización de residuos proveniente de animales de granja o de biomasa obtenida principalmente por industrias productoras de desechos orgánicos.
- Saneamiento mediante el control de contaminación.
- Fomenta la aplicación del protocolo de Kioto al establecer leyes y políticas que disminuyen los gases de efecto invernadero.
- Apertura de nuevas empresas.
- Autonomía energética.

Desventajas

- Pocos avances tecnológicos para desarrollar una planta generadora de biogás
- Debe estar situada en áreas industriales o específicas debido al mal olor producido

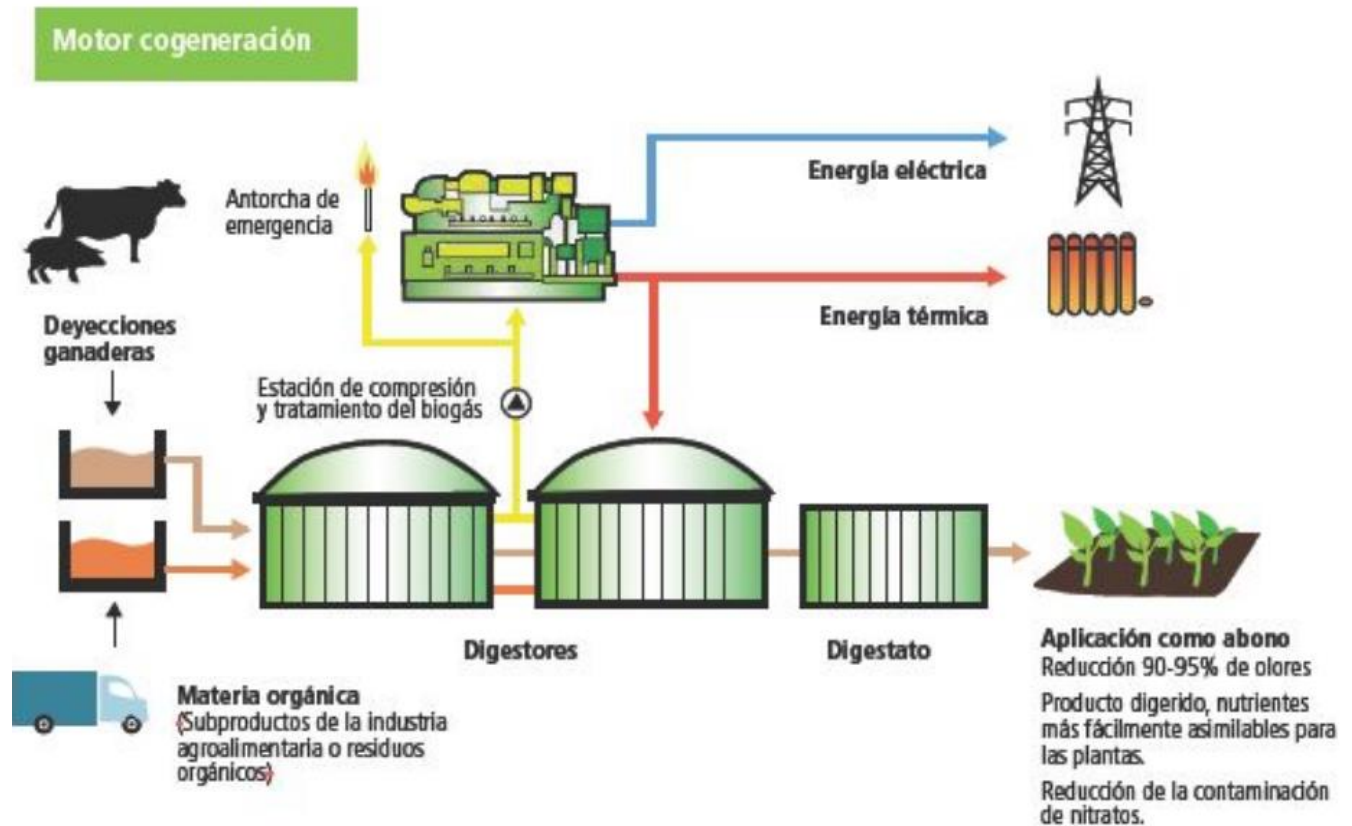


Figura 3.- Planta productora de biogás

Obtenida de (Red Agrícola, 2021)

Existen diversas fuentes de materia prima consideradas como desecho (Figura 3) utilizados para generar un producto de valor agregado. Actualmente se encuentra en investigación y auge la utilización de estos insumos aplicados en diversos sectores debido a su bajo costo, accesibilidad y contribución en la disminución de contaminación ambiental. En México la bioenergía y el biogás han quedado rezagados en los últimos lugares en las estadísticas de energías limpias. Según estimaciones, se producen en México actualmente unos 114 Mm³/a de biogás con una generación eléctrica de 109 GWh_e /a, lo que representa una fracción minúscula de la meta de energía limpia para 2024 de unos 112,000 GWh_e /a. (Gutiérrez, 2018)

3.3.2 Bioetanol

Para la obtención de bioetanol se requieren residuos ricos en polímeros de celulosa y hemicelulosa, que por la difícil degradación se les dará tratamientos físicos, químicos y biológicos con los que se obtendrá monosacáridos que lo convertirán en etanol.

Algunos de los insumos utilizados para este proceso son el azúcar procedente de la caña, cereales como el maíz, trigo, cebada para obtener almidón y la biomasa con la cual se obtendrá celulosa y hemicelulosa a causa de la fermentación del azúcar presente en ella (Figura 4).

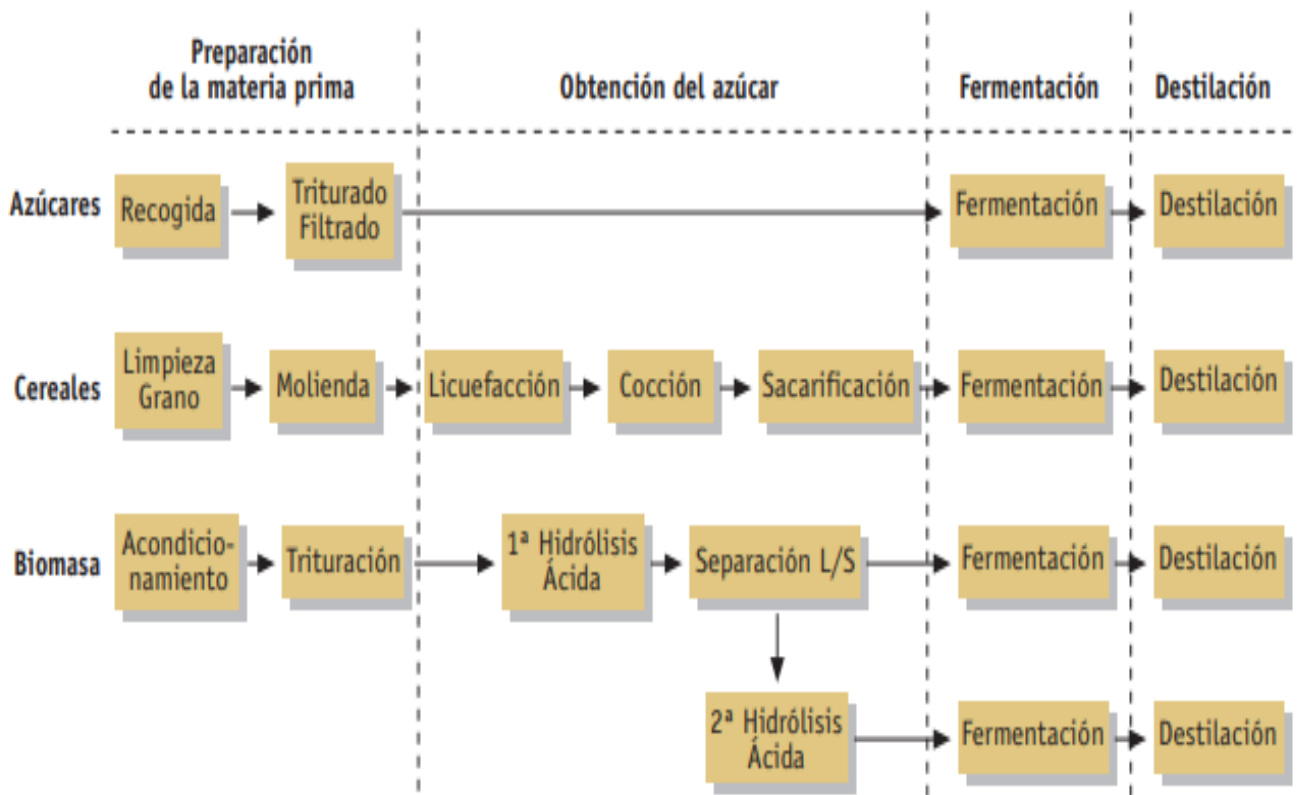


Figura 4.- Proceso en la obtención de bioetanol mediante diversas fuentes de materia prima.

Obtenida de (García, Juan., & García, José. 2006).

Ventajas.

- En los automóviles se realizan mezclas de bioetanol con gasolina para lograr reducir los gases de efecto invernadero.
- Se utiliza como aditivo de las gasolinas con el objetivo de reducir contaminantes.
- Es menos inflamable que la gasolina.
- Se utiliza como materia prima en la industria química.
- Es renovable.

Desventajas.

- El costo de producción es más costoso a comparación con la gasolina y diésel
- Utilización de pesticidas y herbicidas para los cultivos

3.3.3 Biodiesel

De acuerdo con la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) D6751 el biodiesel es un combustible diésel compuesto por ésteres Monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga. Derivados de aceites vegetales o grasas animales, designado como B100

El biodiesel es una excelente alternativa al ser un combustible alternativo con bajas emisiones de carbono, es biodegradable, presenta una excelente eficiencia de combustión y baja toxicidad en comparación con combustibles de origen fósil. Por lo tanto, cuenta con ciertas propiedades beneficiosas para el medio ambiente (Yie et al., 2015). Existen diversos métodos para producir biodiesel entre los que se encuentran las micro emulsiones, pirolisis, transesterificación, reactor de ultrasonido mediante el método supercrítico, y métodos enzimáticos. La transesterificación es el método más viable y prometedor para ser adaptado a la industria debido a su simplicidad, se utiliza aceite vegetal o animal en combinación con etanol o metanol y un catalizador.

El catalizador puede ser homogéneos y heterogéneos entre los más utilizados encontramos el NaOH y KOH (catalizadores homogéneos básicos), CaO, MgO y SrO

(catalizadores heterogéneos), los cuales cuentan con actividad catalítica elevada a baja temperatura y condiciones de presión atmosférica

En la reacción de transesterificación se producen tres reacciones reversibles consecutivas en las que el triglicérido se convierte en diglicérido y el diglicérido se convierte en monoglicérido finalmente el monoglicérido en glicerol (Yie et al., 2015) (Figura 5)

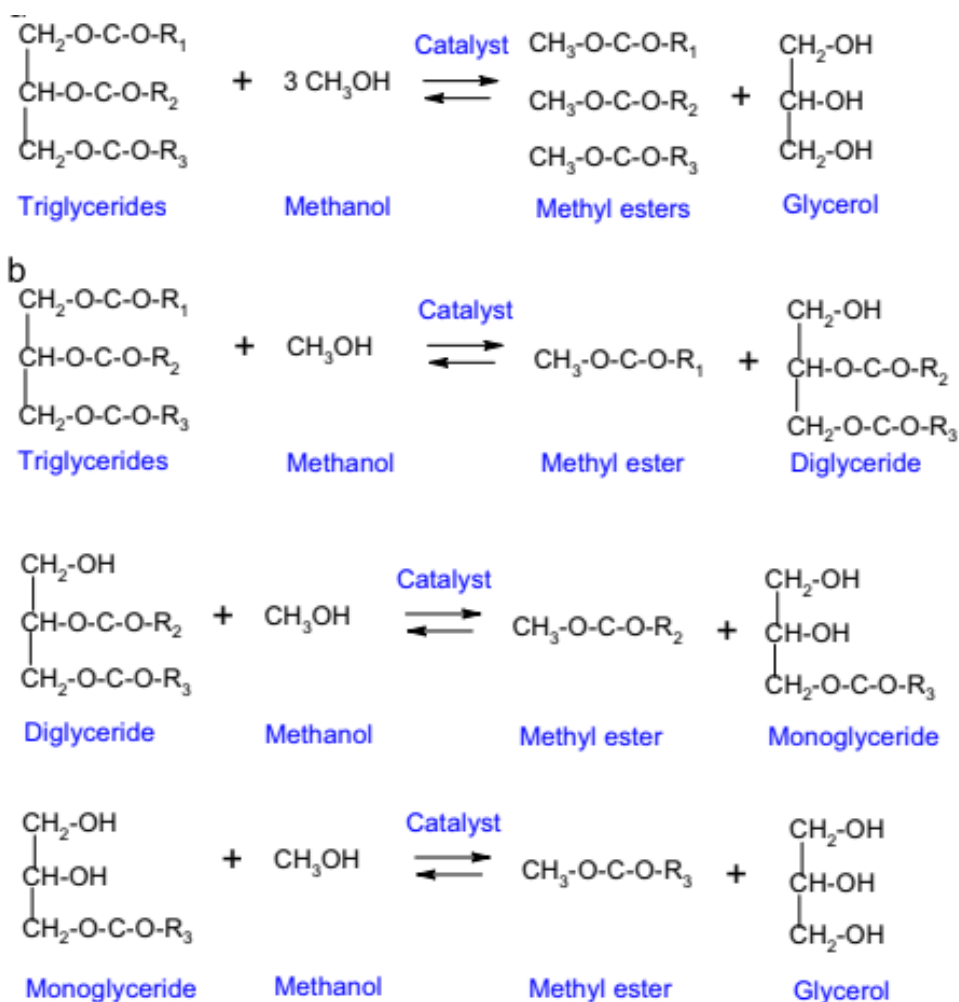


Figura 5.- Reacción de transesterificación con metanol

Obtenida de (Yie et al., 2015).

El biodiesel se utiliza como combustible cuando se cuenta con las características fisicoquímicas establecidas en las normas EN 14214 y la ASTM D6751. En la Figura 6 se muestran algunas aplicaciones del biodiesel.

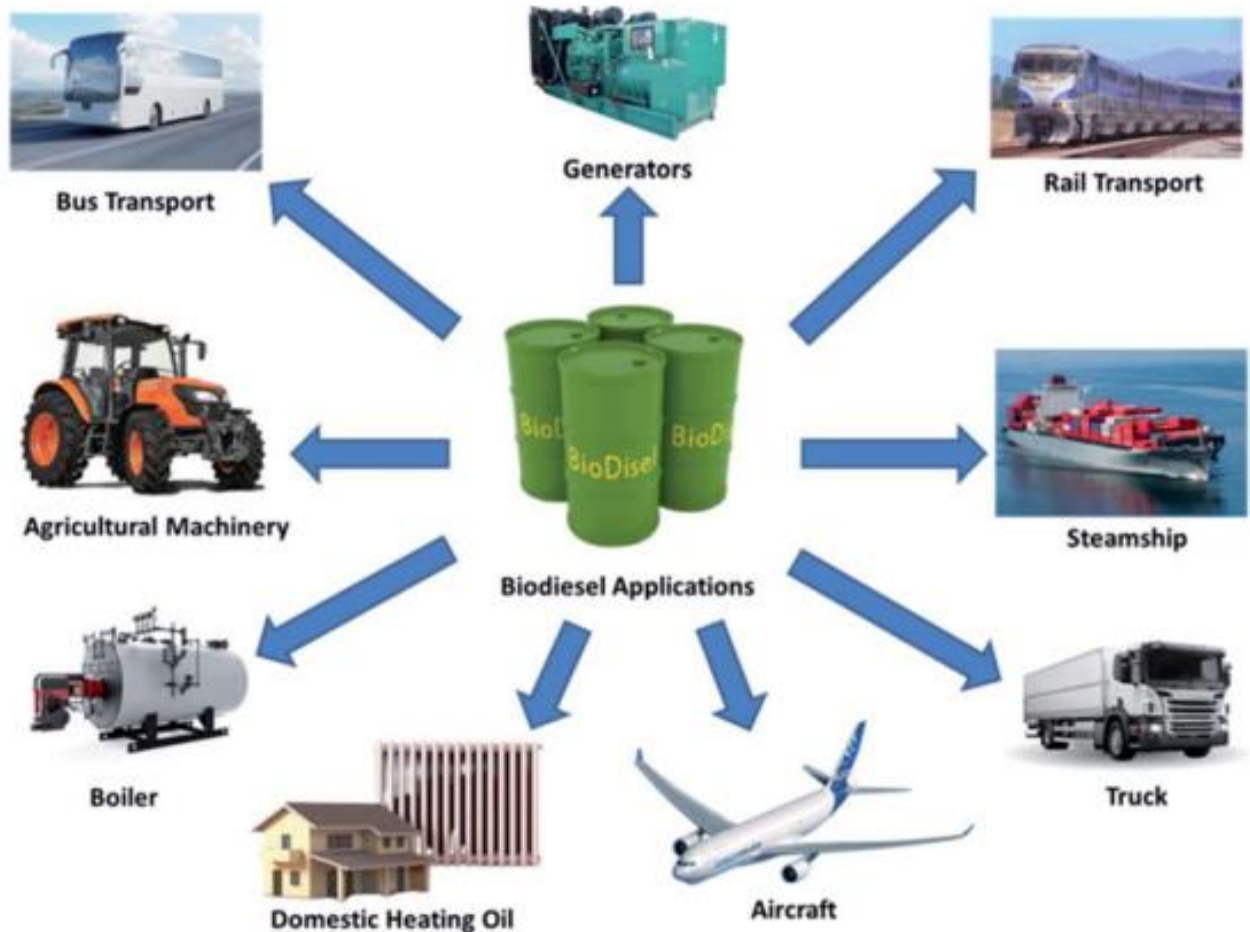


Figura 6.-Aplicaciones del biodiesel

Imagen obtenida de (Nabgan et al., 2022)

Cuando el petróleo convencional es comparado con el biodiesel notamos que este no tiene azufre, produce menor cantidad de monóxido de carbono, partículas de humo, tiene más oxígeno libre. Al tener mayor oxígeno libre obtenemos una combustión completa y reduce las emisiones (Gebremariam et al., 2018)

3.3.4 El Cascarón de huevo como catalizador para obtener biodiesel.

El huevo es un alimento primordial en la dieta de la población mexicana, es una fuente de proteína de excelente calidad, superior a la de la leche y la carne (Mendoza et al., 2016); en el año 2018 México produjo 2 millones 806,000 toneladas de huevo cubriendo así, la demanda de consumo nacional colocando a México en primer lugar como consumidor de huevo en el mundo (Del pilar, 2018) la cáscara de huevo es una fuente abundante de carbonato de calcio (CaCO_3) (Burezq, 2021). El mayor componente de la cáscara de huevo residual es el carbonato de calcio presente entre 94% a 98 % de su peso total, la cáscara contiene, además, componentes minoritarios como carbonato de magnesio 1%, fosfato de calcio 1%, materia orgánica entre 3,5% y 4% como glicoproteínas y proteoglicanos, fracciones ricas en arginina y glutamina. La cáscara de huevo de gallina representa entre el 10 y el 12% de su peso está conformada por un 95% de compuestos minerales y entre un 3,0% a 3,5% por componentes orgánicos (Bedoya et al., 2020); Los estados con mayor producción de huevo en México son Jalisco, Puebla, Sonora, Coahuila, Durango y Yucatán (Unión Nacional de Avicultores, 2022)

A nivel industrial los catalizadores heterogéneos son elegidos para la obtención de biodiesel debido a su resistencia, bajo costo y fácil reutilización (Mazaheri et al., 2021). El óxido de calcio puede ser sintetizado a partir de fuentes baratas presentes en la naturaleza por ejemplo el cascarón de huevo y conchas marinas; La diferencia entre ambos es de escala microscópica esto debido a que el CaO obtenido del cascarón de huevo tiene mayor porosidad superficial (Oliveira et al. ,2013) la cáscara de huevo es una fuente abundante de carbonato de calcio (CaCO_3), que al ser calcinado da paso al CaO un catalizador sólido poroso (Burezq, 2021). El CaCO_3 presente en el cascarón permite producir un catalizador activado por tratamiento térmico a una temperatura entre 800-1000 °C, dando lugar a la formación de cristales de CaO , con sitios activos que favorecen la reacción de transesterificación.

Tabla 2. Tipos de catalizadores utilizados para la obtención de biodiesel

| Tipos de catalizadores | Ejemplo de catalizadores |
|-------------------------------|---|
| Ácidos homogéneos | H ₂ SO ₄ y HCl |
| Ácidos heterogéneos | Zeolitas, resinas sulfónicas, |
| Básicos homogéneos | KOH y NaOH |
| Básicos heterogéneos | MgO, CaO y Na/NaOH/Al ₂ O ₃ |
| Enzimáticos | Lipasa, Candida, Penicillium y Pseudomonas |

Obtenido de (Cabello et al., 2016)

De acuerdo a la Tabla 2 existen diversos catalizadores para fabricar biodiesel, el CaO es el catalizador heterogéneo más prometedor para la producción de biodiesel de acuerdo a sus propiedades: baja solubilidad, proceso de producción simple, la separación del producto final no requiere de lavados con agua o alguna otra sustancia adicional por lo que se reduce los costos de operación a nivel industrial, su reutilización es factible debido a que se lava con metanol para retirar cualquier residuo de glicerina o biodiesel para posteriormente calcinarse y reutilizarse. Asimismo, el CaO tiene menor impacto ambiental debido a su baja solubilidad en solventes polares y poca toxicidad.



Reacción del carbonato de calcio sometida a tratamiento térmico entre 800-1000 °C

Los catalizadores a base CaO se activan después de la calcinación térmica a altas temperaturas; este tipo de catalizador puede ser utilizado para la reacción de transesterificación en diferentes formas CaO puro, mezclado con óxidos metálicos como óxido de lantano, zinc, etc. siendo otro método viable para mejorar la actividad catalítica del CaO puro. (Mazaheri et al.,2021). La eficiencia del CaO y el bajo costo del cascarón como catalizador hace la producción de biodiesel más económica y amigable con el ambiente (Figura 7).

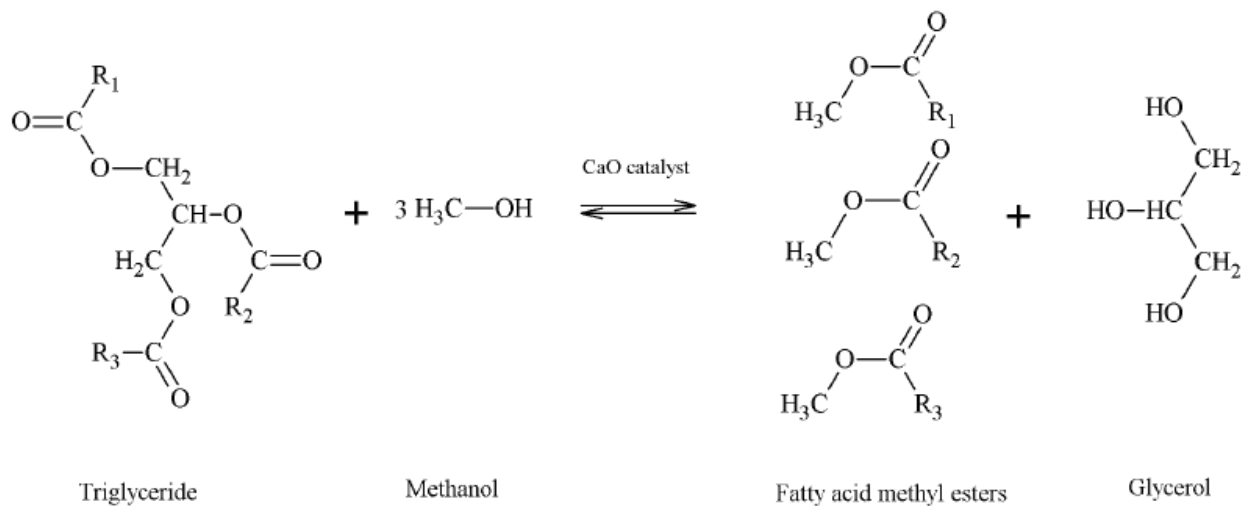


Figura 7.-Transesterificación en presencia de CaO (como catalizador)
 Imagen obtenida de (Kesić et al., 2016)

3.3.5 Normas para la utilización de biocombustibles.

Para promover el uso de biocombustibles se debe incluir certificación y monitoreo constante, aplicado de manera adecuada para asegurar la calidad de los biocombustibles obtenidos y asegurando la obtención de un producto terminado con propiedades físicas y químicas adecuadas para su utilización. Cada norma cuenta con diversas especificaciones que deberán cumplirse para asegurar la calidad del producto.

En beneficio al medio ambiente y la sociedad se crean normas que regulan diversos sectores. Algunas normas son las ASTM internacional y EN (normativa europea) que contribuyen al mejoramiento de la salud y seguridad de las personas. Específicamente en las normas ASTM, contribuyen miembros provenientes de diversos países; se fomenta el desarrollo sustentable aplicado a diversos sectores como son el industrial, farmacéutico, biocombustibles, nanotecnología, entre otros. Las normas sustentan los reglamentos de diversos países que por lo general serán países en vías de desarrollo.

Las normas ASTM se crearon en Estados Unidos en el caso del biodiesel es legal mezclar biodiesel con diésel de petróleo, por ello encontraremos las siguientes abreviaturas B100 lo que significa que es biodiesel puro, el B20 que contiene 20 % de

biodiesel y 80% de diésel de petróleo y B5 conteniendo 5% de biodiesel y 95 %de diésel de petróleo

En México el 22 de octubre del 2018 en el Diario Oficial de la Federación se establecieron los lineamientos para los que se implementan las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiesel y bioturbosina puros considerando la mezcla con petrolíferos antes de comercializar al público o proporcionarles un uso final. Dichos lineamientos utilizan como base las normas ASTM como se muestra en la Tabla 3 (B100), su objetivo principal es establecer los parámetros de calidad adecuados para el biodiésel.

Tabla 3. Especificaciones mexicanas de calidad y características del biodiésel (B100)

| Propiedad | Unidad | Método de prueba | Valor límite |
|--|--------------------|------------------|-----------------|
| Contenido de Azufre | mg/Kg | ASTM D5453 | 15 y 500 máximo |
| Filtrabilidad en reposo en frío | s | ASTM D7501 | 200 a 360 |
| Contenido de Mono glicéridos | % mg/kg | ASTM D6584 | 0.40 máximo |
| Calcio y Magnesio combinado (ppm) | μ(g/g) | EN 14538 | 5 máximo |
| Punto de flasheo (copa cerrada) | °C | ASTM D93 | 93 |
| Control de alcohol (uno de los siguientes métodos deberá emplearse) | | | |
| Contenido de metanol | % mg/kg | EN 14110 | 0.2 máximo |
| Punto de flasheo | °C | ASTM D93 | 130 |
| Agua y sedimento | % vol/vol | ASTM D2709 | 0.050 máximo |
| Viscosidad cinemática a 40 °C | mm ² /s | ASTM D445 | 1.9-6.0 |
| Contenido de cenizas sulfatadas (Fracción masa) | % | ASTM D874 | 0.02 máximo |
| Corrosión al Cu | Adimensional | ASTM D130 | N# 3 |
| Número de Cetano | Adimensional | ASTM D613 | 47 mínimo |
| Temperatura de nublamiento | °C | ASTM D2500 | Informar |
| Residuos de carbón | % mg/kg | ASTM D4530 | 0.05 máximo |
| Valor ácido | mg KOH/g | ASTM D664 | 0.50 máximo |
| Contenido de glicerol libre (Fracción masa) | % | ASTM D6584 | 0.02 máximo |
| Contenido de glicerol total (Fracción masa) | % | ASTM D6584 | 0.240 máximo |
| Contenido de fósforo | % mg/kg | ASTM D4951 | 0.001 máximo |
| Temperatura de destilación: 90% de recuperación | °C | ASTM D1160 | 360 máximo |
| Metales (Na+K) (ppm) | μ(g/g) | EN 14538 | 5 máximo |
| Estabilidad a la oxidación | h/min | EN 15751 | 3 mínimo |

Obtenido del Diario Oficial de la Federación de fecha 22 de octubre de 2018.

De acuerdo con los lineamientos del DOF 2018 las pruebas primordiales básicas por las que tiene que pasar el biodiesel serán, índice de acidez (mg KOH/g), azufre y contenido de glicerol. Dichas pruebas tendrán el objetivo de detectar cualquier variación en el producto, por lo tanto, en caso de no aprobar dichas especificaciones se procederá a realizar pruebas puntuales mencionadas en la Tabla 4. En caso de resultar desfavorables dichos análisis mostraran propiedades que indicaran que el producto deberá ser retirado del mercado o en el mejor de los casos servirá para mejorar el proceso, ya sea en la parte de producción o almacenamiento.

Tabla 4. Especificaciones para el biodiesel EN y ASTM.

| Propiedad | B100 | | | | B5 – B20 | |
|--|----------------------|----------|----------------------|------------------------|---------------------|----------|
| | USA (ASTM D6751-08) | | Europea (EN 14214) | | USA (ASTM D7467-08) | |
| | Limite | Método | Limite | Método | Limite | Método |
| Contenido de agua (vol %, máx.) | 0.05 | D 2709 | 0.05 | EN 128937 ^a | 0.05 | D 2709 |
| Contaminación total (mg/kg, máx.) | - | - | 24 | EN 12662 | - | - |
| Viscosidad cinemática (40°C, mm/s ²) | 1.9 – 6.0 | D 445 | 3.5 – 5.0 | EN 3104 | 1.9 - 4.1 | D 445 |
| Punto flash (°C, min) | 93 | D 93 | 101 | EN 3679 | 52 | D 93 |
| Contenido de MeOH (wt %, max) | 0.20 ^a | EN 14538 | 5.0 | EN 14108 | - | - |
| Índice de cetano (min) | 47 | D 613 | 51 | EN 3987 | 40 | D 613 |
| Punto nube (°C) | Reporte ^d | D 2500 | Reporte ^d | - | Reporte | D 2500 |
| Cenizas sulfatadas (wt %, máx) | 0.020 | D 874 | 0.020 | EN 3987 | - | - |
| Cenizas totales (wt %, máx) | - | - | - | - | 0.01 | D 482 |
| Contenido de Na + K (mg/kg, max) | 5.0 | EN 14538 | 5.0 | EN 14108 | - | - |
| Contenido de Ca + Mg (mg/kg, max) | 5.0 | EN 14538 | 5.0 | EN 14538 | - | - |
| Azufre total (ppm, max) | 15 ^b | D 5453 | 10 | EN 20846 | 15 | D 5453 |
| Fósforo total (ppm, max) | 10 | D 4951 | 4 | EN 14107 | - | - |
| Índice de acidez (mg KOH/g, max) | 0.50 | D 664 | 0.50 | EN 14104 | 0.3 | D 664 |
| Residuo de carbón (wt %, max) | 0.05 | D 4530 | 0.30 | EN 10370 | 0.35 ^a | D 524 |
| Glicerina libre (wt.%, max) | 0.02 | D 6584 | 0.25 | EN 14105 | - | - |
| Glicerina total (wt.%, max) | 0.24 | D 6584 | 0.25 | EN 14105 | - | - |
| Monoglicéridos (wt.%, max) | - | - | 0.80 | EN 14105 | - | - |
| Diglicéridos (wt.%, max) | - | - | 0.20 | EN 14105 | - | - |
| Triglicéridos (wt.%, max) | - | - | 0.20 | EN 14105 | - | - |
| Destilación (T ₉₀ °C, max) | 36 ^c | D 1160 | - | - | 343 | D 86 |
| Contenido de esteres (wt.%, min) | - | - | 96.5 | EN 14103 | 6 – 20 vol % | D 7371 |
| Índice de yodo (g I ₂ /100 g, máx.) | - | - | 120 | EN 14111 | - | - |
| Densidad (°15 C, g/cm ³) | 0.86 – 0.90 | D 1298 | 0.86 – 0.90 | EN 3675 | - | - |
| Estabilidad a la oxidación (h a 110 °C, min) | 3.0 | EN 14112 | 6.0 | EN 14112 | 6 | EN 14112 |

a Alternamente, el punto flash debe ser >130 °C.

b Para mezclas con otros combustibles, contenidos de azufre son permitidos.

c Equivalente atmosférico T-90 puntos.

d Las propiedades a bajas temperaturas no están especificadas estrictamente, pero deben acordarse entre el proveedor y el comprador.

e Este límite está basado en el 10% del combustible, no el volumen total.

f 200s máximo para el uso en mezclas de diésel a bajas temperaturas (< - 12 °C).

g El método EN 12937 mide el total del agua en unidades de g/g, pero no de sedimento

3.4 Catálisis

Determina el incremento de la rapidez de reacción, mediante el aumento en la concentración del complejo activado o al disminuir la energía de activación al agregar una sustancia que se recuperará al finalizar la reacción sin alterarla, sustancia que no interviene en la reacción, pero modifica la rapidez de reacción, se utiliza en pequeñas cantidades en comparación a la cantidad de reactivo utilizado (Satterfield, 1980). En la actualidad más del 80% de todos los productos químicos involucran a la catálisis, por lo tanto, para la modernización de la síntesis química, la aplicación de los catalizadores es crucial (Fairoosa et al., 2022). La utilización de catalizadores en procesos industriales comenzó desde 1980, estos pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos siendo importantes para la vida moderna.

3.4.1 Catálisis Heterogénea

Este tipo de catálisis se encuentra constituido por un gas o líquido en presencia de un catalizador sólido, la separación de la mezcla reaccionante es factible mediante métodos mecánicos por lo que se puede reutilizar a lo largo de varios ciclos de vida útil, disminuyendo así sus costos de producción.

Los procesos catalíticos son fundamentales para la producción de productos químicos, por lo tanto, existe una gran oportunidad para disminuir el consumo de energía y reducir el impacto ambiental, aumentando la eficiencia de los procesos catalíticos. (Friend et al., 2017). La utilización de insumos considerados como desecho en la catálisis ha generado gran interés en los años recientes esto debido a los millones de residuos que se desechan en vertederos (Nabgan et al., 2022)

3.4.2. Adsorción.

Concentración de uno o más componentes de un gas o un líquido en la superficie de un sólido. Existen dos tipos de adsorción, física y química; en la primera de ellas se presentan fuerzas de valores relativamente pequeña y el equilibrio es de fácil obtención, es la mejor herramienta para conocer las propiedades físicas de un catalizador, como el área superficial; en tanto la segunda, se limita a la formación de una monocapa y las

fuerzas presentes serán proporcionales a los átomos de la molécula (Izquierdo et al., 2004).

Adsorción física (Fisorción)

- Las fuerzas de interacción débiles
- Calor de adsorción pequeño, del mismo orden que la licuefacción normal
- Formación de multicapas
- Existe en todos los sólidos
- Se llega de manera inmediata al punto de equilibrio (Paso rápido)
- Reversible
- Toda la superficie es factible para la adsorción física
- Este tipo de adsorción se caracteriza por un calor de adsorción que varía entre 20-40 kJ/mol

Adsorción Química (Quimisorción)

- Las fuerzas de interacción son fuertes
- Calor de adsorción grande, en muchas ocasiones mayor que el calor de licuefacción normal
- Formación de una monocapa
- La adsorción solo ocurre sobre lugares de alta energía
- La adsorción es el paso lento de la reacción heterogénea
- Es Irreversible
- Se caracteriza por un calor de adsorción que varía entre 100-500 kJ/mol.

3.4.3 Isotermas de adsorción

Es la representación gráfica del comportamiento de la cantidad del adsorbato sobre un adsorbente con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio a temperatura constante (Izquierdo et al., 2004). Se utilizan modelos matemáticos para describir este comportamiento entre los que destacan:

Langmuir

Es utilizada ampliamente para estudios cinéticos en la catálisis heterogénea y por ello considerada como la representante de la adsorción química.

- Adsorción en una monocapa
- Sin interacción de moléculas adsorbidas
- Superficie homogénea
- Mecanismos de adsorción igual para cada una de las moléculas
- Equilibrio adsorción- desorción
- Superficie “ideal” homogénea

Expresión de Langmuir:

$$q = \frac{q_m K C}{1 + K C}$$

$$K = \frac{k_a}{k_d}$$

$q =$ capacidad de adsorción en el equilibrio $\left(\frac{\text{Cantidad de adsorbato}}{\text{cantidad de adsorbente}}\right)$

$K =$ constante de equilibrio para la adsorción

$q_m =$ Capacidad de adsorción en monocapa $\left(\frac{\text{Cantidad de adsorbato}}{\text{cantidad de adsorbente}}\right)$

$C =$ Concentración del adsorbato en el equilibrio

Ecuación linealizada

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} * \frac{1}{K C} + \frac{1}{q_m}$$

Freundlich

El calor de adsorción varía logarítmicamente con la tasa de recubrimiento se asume que la energía del adsorbente es energéticamente heterogénea, multicapas, además de ser una expresión completamente empírica, no es válido para concentraciones altas, pero es más precisa a concentraciones intermedias.

$$q = KC^{1/n}$$

$$q = \text{Capacidad de adsorción en el equilibrio} \left(\frac{\text{Cantidad de adsorbato}}{\text{cantidad de adsorbente}} \right)$$

K = Constante de equilibrio de adsorción

C = Concentración del adsorbato en el equilibrio

n = es la constante exponencial para el modelo de Freundlich

Ecuación Linealizada

$$\text{Ln}(q) = \text{Ln}(K) + \left(\frac{1}{n} \right) \text{Ln}(C)$$

La representación gráfica de Ln(q) vs Ln(C) permite obtener n de la pendiente y K de la ordenada en el origen.

BET (Brunauer, Emmett y Teller)

Utilizó como base a Langmuir, pero en este caso la adsorción se da en multicapas.

- Adsorción con multicapas
- La superficie es homogénea es decir no existe adsorción preferente en ningún sitio
- Sin interacción de las moléculas adsorbidas
- El primer mecanismo que se supone es para la primera capas y uno diferente a partir de la segunda

Ecuación:

$$\frac{p}{v(p_s - p)} = \frac{1}{v_m c} + \frac{c - 1}{c v_m} \frac{p}{p_s}$$

v = volumen total de gas adsorbido sobre la superficie del adsorbente a T y P estandar

p = presión parcial del adsorbato

p_s = presión de saturación del adsorbato a la T que se produce la adsorción

v_m = volumen de gas adsorbido cuando la superficie está cubierta con una capa monomolecular

$$c = e^{(E_1 - E_L)/RT}$$

E_1 = Calor de adsorción en la primera capa

E_L = Calor de condensación

R = constante de los gases y T = Temperatura absoluta

3.4.4 Quimisorción

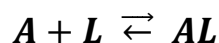
Es un fenómeno específico que depende de la naturaleza de la superficie donde se efectúa la adsorción (adsorbente) y la sustancia que se adhiere en la superficie (adsorbato). Se da la formación de una monocapa dado que las fuerzas presentes disminuyen rápidamente por la distancia.

La efectividad catalítica de los catalizadores sólidos dependerá de la quimisorción, el rango de temperatura donde un dado catalizador será efectivo coincidirá con aquel donde la adsorción química de una o más reactivos sea apreciable.

Como ejemplo de lo antes mencionado, encontramos:

Adsorción de una sustancia

Reacción bimolecular entre los átomos de la superficie y los átomos o moléculas gaseosas y la formación de un átomo o molécula adsorbida.



$$C_{AL} = \frac{LK_A p_A}{1 + K_A p_A}$$

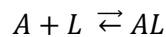
C_{AL} = concentración molar de la sustancia A adsorbida

$K_A = \frac{k_a}{k_d}$ = constante de equilibrio de adsorción de A

P_A = presión parcial del gas en contacto con la superficie

Adsorción de dos gases sobre la misma superficie

Se consideran las dos reacciones en paralelo



$$C_{AL} = \frac{LK_A p_A}{(1 + K_A p_A + K_B p_B)}$$



$$C_{BL} = \frac{LK_B p_B}{(1 + K_A p_A + K_B p_B)}$$

C_{BL} = Concentración molar de la sustancia B adsorbida

3.4.5 Cinética de la reacción sólido-líquido

Se efectúa en al menos siete pasos:

- 1) Se transporta el reactivo a través de la capa de separación hasta la superficie externa del catalizador (Proceso físico)
- 2) Se transporta el reactivo dentro de la partícula del catalizador
- 3) Proceso físico- químico, se efectúa la adsorción del reactivo en la superficie interna del catalizador
- 4) Reacción química en la superficie
- 5) Desorción del producto desde la superficie interna del catalizador

- 6) Transporte interno del producto hacia la superficie externa de la partícula (proceso físico)
- 7) Transportar el producto desde la superficie de la partícula hasta el límite externo de la capa de separación (Figura 8).

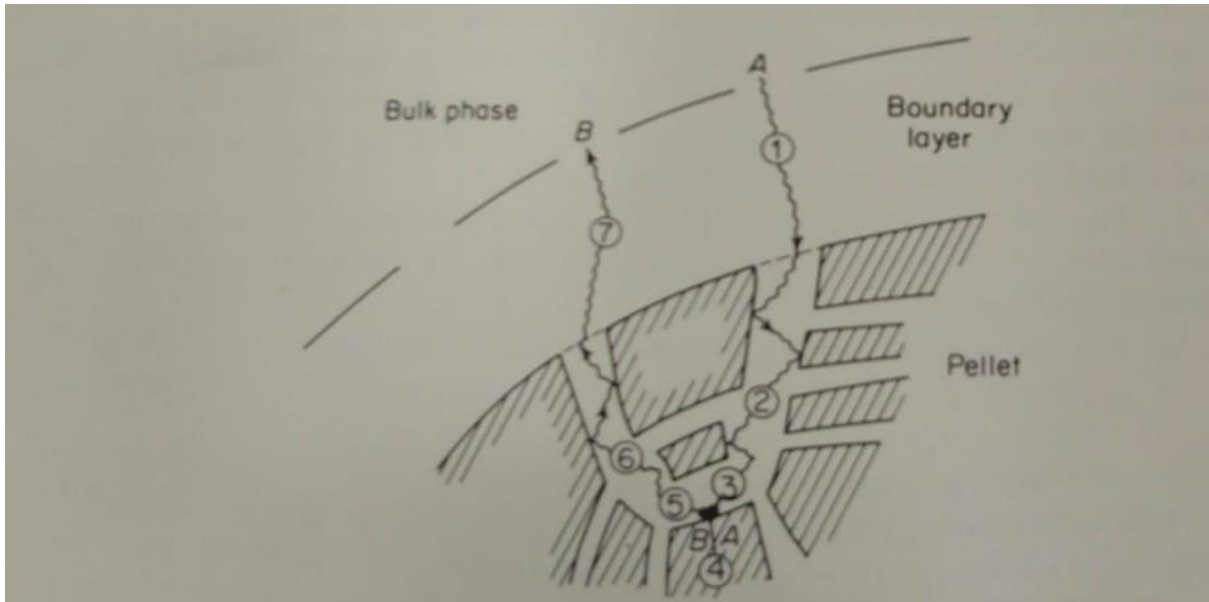


Figura 8. Cinética de la reacción

Imagen obtenida de (Satterfield, 1980)

En varios casos típicos las etapas se efectúan de manera consecutiva, una después de la otra; una de ellas se efectuará de manera lenta a la que conoceremos como la etapa controlante de la reacción que nos llevará a la expresión de una ecuación de rapidez de reacción.

3.4.6 Langmuir Rideal o Eley-Rideal

Son aquellos mecanismos que consideran que no se adsorben todos los reactantes en la superficie del catalizador. Por consiguiente, se efectúa cuando la reacción ocurre entre un reactivo adsorbido y otro se encuentra fuera de la superficie (Figura 9)

$$r = kC_{AL}P_B$$

$$C_{AL} = \frac{C_L K_A p_A}{1 + K_A p_A + K_B p_B}$$

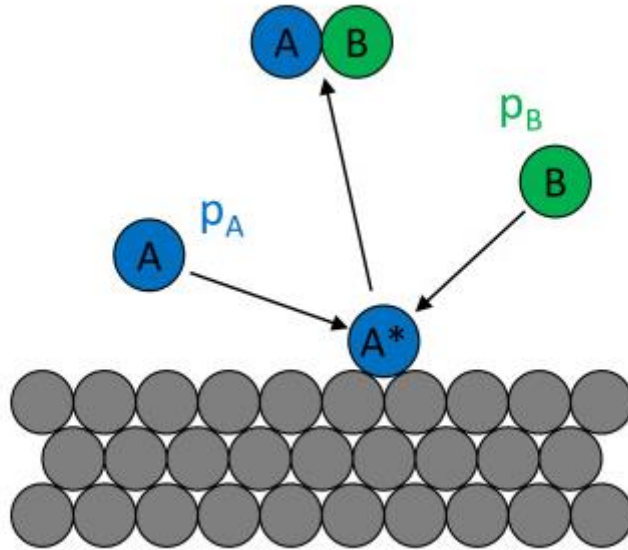


Figura 9.- Representación esquemática Langmuir-Rideal o Eley-Rideal

Obtenido de (Becker.2018 Encyclopedia of interfacial Chemistry)

Para el biodiesel se plantea la posibilidad en la que el alcohol se adsorbe en sitios activos del catalizador de manera que el aceite permanece fuera de la superficie.

3.4.7 Elovich

Describe la cinética de la quimisorción sobre superficies sólidas en la cual los sitios activos del adsorbe son heterogéneos.

$$q_t = \alpha \ln(\alpha * \beta) + \beta \ln(t)$$

$$q_t = \text{Capacidad de adsorción al tiempo } t \left(\frac{\text{Cantidad de adsorbato}}{\text{Cantidad de adsorbente}} \right)$$

α = Constante de adsorción inicial

β = Constante de desorción durante el experimento

t = tiempo de contacto

Con la cual del gráfico q_t vs $\ln(t)$ los resultados de la pendiente β y la ordenada al origen $\alpha \ln(\alpha * \beta)$ Se obtienen los valores de las constantes α y β . Con ambas constantes se determina la constante de equilibrio $K_E = \frac{\alpha}{\beta}$

4. METODOLOGÍA

4.1 *Materia prima*

El cascarón de huevo (2 kg) se obtuvo por tres días consecutivos de la cafetería de la Facultad de Química ubicada en Ciudad Universitaria UNAM.

El aceite vegetal de cocina usado fue obtenido de un local dedicado a la elaboración de papas fritas ubicado entre Av. Guadalupe Ramírez y Adelaida, Delegación Xochimilco.

4.2 *Limpieza del cascarón de huevo*

Se procedió a eliminar todo residuo orgánico proveniente del huevo con agua del grifo, una vez limpias se lavaron nuevamente con agua destilada para retirar cualquier impureza, la cáscara fue colocada de forma extendida en una charola para finalmente secarlas por 48 horas.

4.3 *Síntesis del catalizador (CaO) a partir del cascarón de huevo*

Una vez seco el cascarón de huevo se procedió a su molienda en una licuadora marca Oster modelo 6640-13. El polvo obtenido se tamizó entre la malla 200- 100 (Samrat & Srimanta, 2015) con el propósito de obtener el tamaño de partícula adecuado. Finalmente se calcinó en una mufla por 4 horas a una temperatura de 900 °C. Una vez calcinado el polvo, se almacenó en un recipiente cuidadosamente cerrado con la finalidad de evitar el envenenamiento del catalizador al entrar en contacto con el aire.

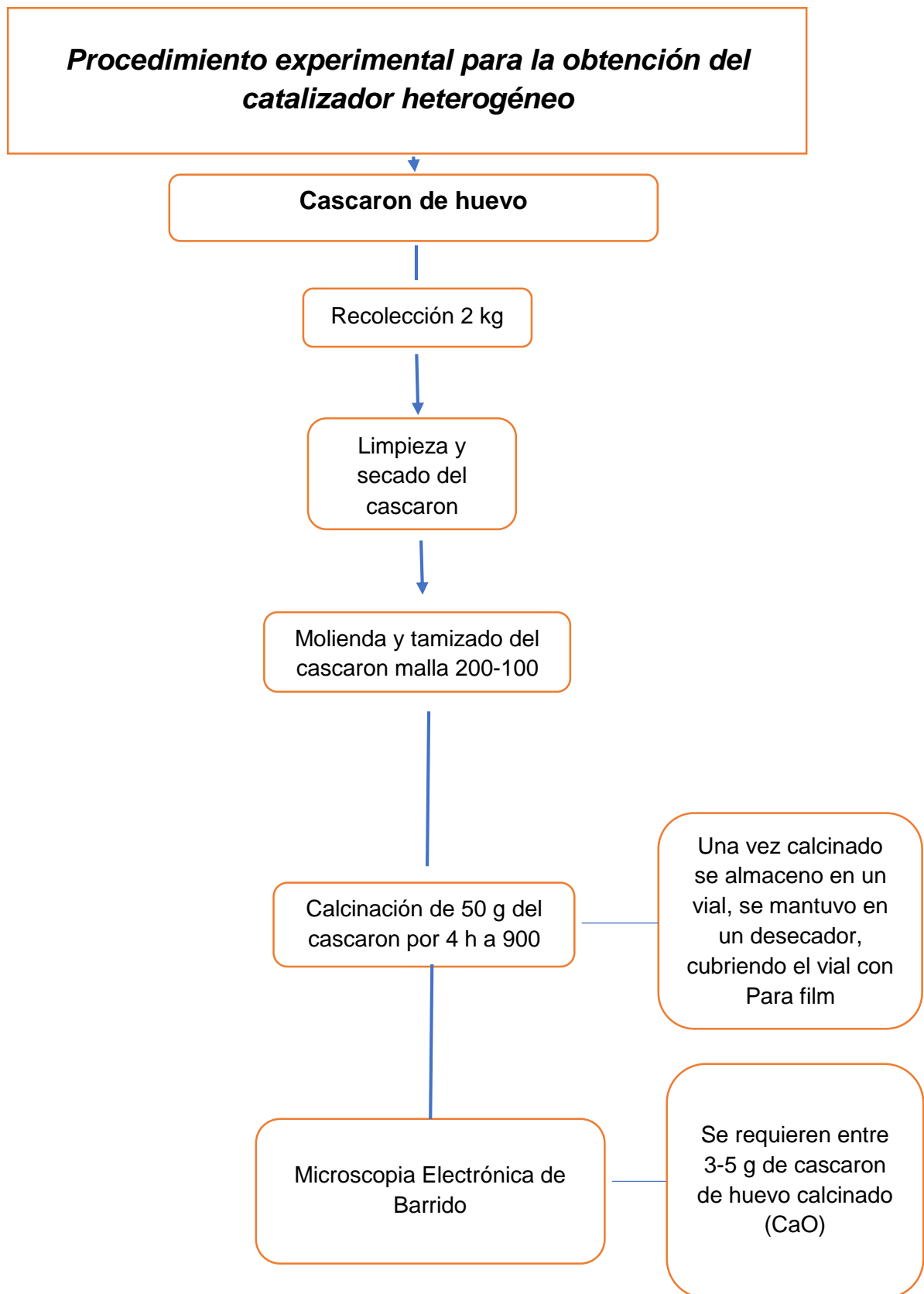


Figura 10. Obtención de un catalizador heterogéneo.

4.4 Propiedades del AVU

Una vez recolectado el AVU, se filtró al vacío con ayuda de un embudo Büchner con el objetivo de eliminar residuos sólidos, se agregó sulfato de sodio anhidro Na_2SO_4 para eliminar el agua y se decantó para eliminar el sólido

4.4.1 Determinación del índice de acidez

Se estimó el índice de acidez del AVU colocando 1 g de muestra en un matraz Erlenmeyer de 125 ml, al cual se le adicionaron 10 ml de metanol y 3 gotas de fenolftaleína. La mezcla se calentó y mantuvo a 50 °C en agitación magnética y se procedió a titular con una solución de KOH 0.02 N, hasta obtener una coloración rosa claro (NMX-F-101-SCF1-2012), Esta determinación se realizó por triplicado.

Se registró el volumen de KOH gastado para efectuar los cálculos correspondientes, empleando la siguiente expresión:

$$\text{Índice de acidez} = \frac{(\text{mL KOH})(N \text{ KOH})(56.102 \text{ mg KOH})}{\text{g muestra}}$$

Donde:

mL KOH=Volumen de Hidróxido de potasio gastado por la muestra; N KOH=Normalidad del Hidróxido de potasio empleado en la titulación; 56.102 mg KOH= peso equivalente de Hidróxido de potasio; g muestra=Masa en gramos de la muestra

4.4.2 Determinación del índice de lodo

Se determinó el índice de lodo pesando 0.1 g de muestra en un matraz de 250 ml cubierto con papel aluminio. Se agregaron 10 ml de diclorometano y 10 ml de reactivo Wijs, dejando reposar la mezcla en la oscuridad durante 30 minutos agitando ocasionalmente. Transcurrido el tiempo se agregaron 10 mL de solución KI al 10 % y 100 ml de agua destilada. La mezcla se tituló con una solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.1 N hasta alcanzar un tono amarillo pálido una vez efectuado esto se le adiciona 1 mL de almidón al 10%, finalmente

se continuó titulando hasta hacer desaparecer la coloración azul intenso (NMX-F-152-SCFI-2011). Esta determinación se realizó por triplicado

Se registró el volumen de solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ gastado, para efectuar los cálculos correspondientes, empleando la siguiente ecuación:

$$IY = \frac{(V_2 - V_1) \times 127 \text{ g } I_2 \times N \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 100}{m_{\text{aceite}}(\text{g})}$$

Dónde

V_2 = Volumen de Tiosulfato de Sodio gastado para la muestra; V_1 = Volumen de Tiosulfato de Sodio gastado en el blanco; N =Normalidad del Tiosulfato de Sodio empleado en la titulación; m = Masa en gramos de la muestra empleada

4.4.3 Viscosidad cinemática y densidad

La viscosidad y la densidad se determinaron con el equipo Anton Paar Stabinger SVM 3000 de oscilación digital, el cual es un equipo de rotación con geometría cilíndrica, que cuenta con un tubo exterior en rápida rotación y un rotor de medición interior, con una rotación más lenta

Para las mediciones de viscosidad cinemática y densidad se tomaron 4.5 ml de la muestra a estudiar, se posicionó en la conexión de manera que fueron inyectados al equipo de manera gradual, comenzando con 1.5 ml para finalmente adicionar toda la muestra lentamente, las mediciones se realizaron con intervalos de 10 °C a una temperatura entre los 20 °C hasta 90 °C.

4.4.4 Calor de combustión

Esta propiedad se determinó con un Calorímetro Isoperibólico Automático Parr 6400 (Figura 11), con ayuda del soporte se pesaron 0.7 g de aceite en el porta muestras, el hilo de ignición se colocó en el alambre de la ignición cuidando que este estuviera sumergido en el aceite, dicha muestra fue introducida en el equipo para finalmente analizarla.



Figura 11.-Calorímetro Isoperibólico Automático Parr 6400

Procedimiento experimental para el análisis del aceite vegetal usado

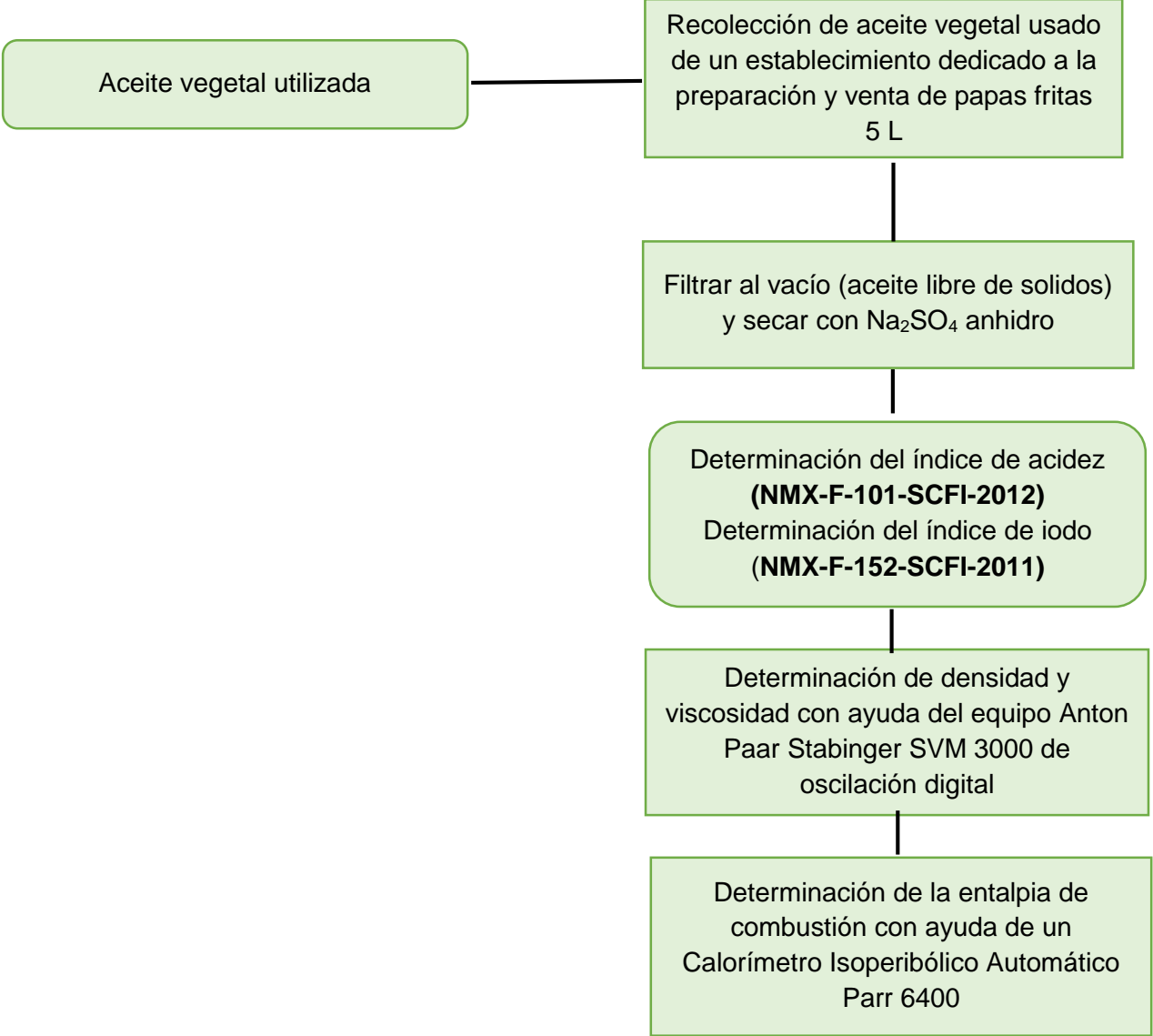


Figura 12. Obtención y caracterización del AVU.

4.5 Pretratamiento del AVU.

Al utilizar AVU como materia prima para la obtención de biodiesel, se deben considerar diversos factores que lo deterioran, como las altas temperaturas a la que fue sometido, el agua presente en el alimento, el contacto con el aire a la hora de ser transportado, entre otros. Se realizaron tres tipos de pretratamiento básico, acuoso y ácido.

4.5.1 Pretratamiento básico.

El aceite (20 mL) una vez filtrado, libre de sólidos y agua se calentó a una temperatura de 60 °C, se agregó una solución saturada de 0.063 g NaOH y 0.1 ml de H₂O agitando a 300 rpm por 60 minutos. Posteriormente el producto se separó con ayuda de una centrifugadora y el aceite vegetal utilizado se lavó tres veces con 10 ml de H₂O destilada a 90 °C en un embudo de separación hasta alcanzar pH neutro, se agregaron 2.20 g de sulfato de sodio anhidro para secarlo, el cual, se separó con una centrifugadora (*Bravo, 2014*).

4.5.2 Pretratamiento Acuoso

El aceite (20 mL) una vez filtrado, libre de sólidos y agua se calentó a una temperatura de 60 °C, se lavó tres veces con 10 ml de agua destilada a 90 °C en un embudo de separación para después decantar ambas fases, se agregaron 2.20 g de sulfato de sodio anhidro el cual se separó con una centrifugadora (*Bravo, 2014*).

4.5.3 Pretratamiento Ácido

El aceite (20 mL) una vez filtrado, libre de sólidos y agua se calentó a una temperatura de 60 °C, se adiciono una solución saturada de 0.12 mL H₂SO₄ (1 M) y 40 ml de CH₃OH a 40 °C bajo agitación constante por 400 minutos, se separaron las fases con ayuda de una centrifugadora y el aceite vegetal utilizado se lavó tres veces con 20 ml de H₂O destilada a 60 °C en un embudo de separación hasta alcanzar pH neutro, se agregaron 2.20 g de sulfato de sodio anhidro para secarlo ,el cual, se separó con una centrifugadora (*Bravo, 2014*).

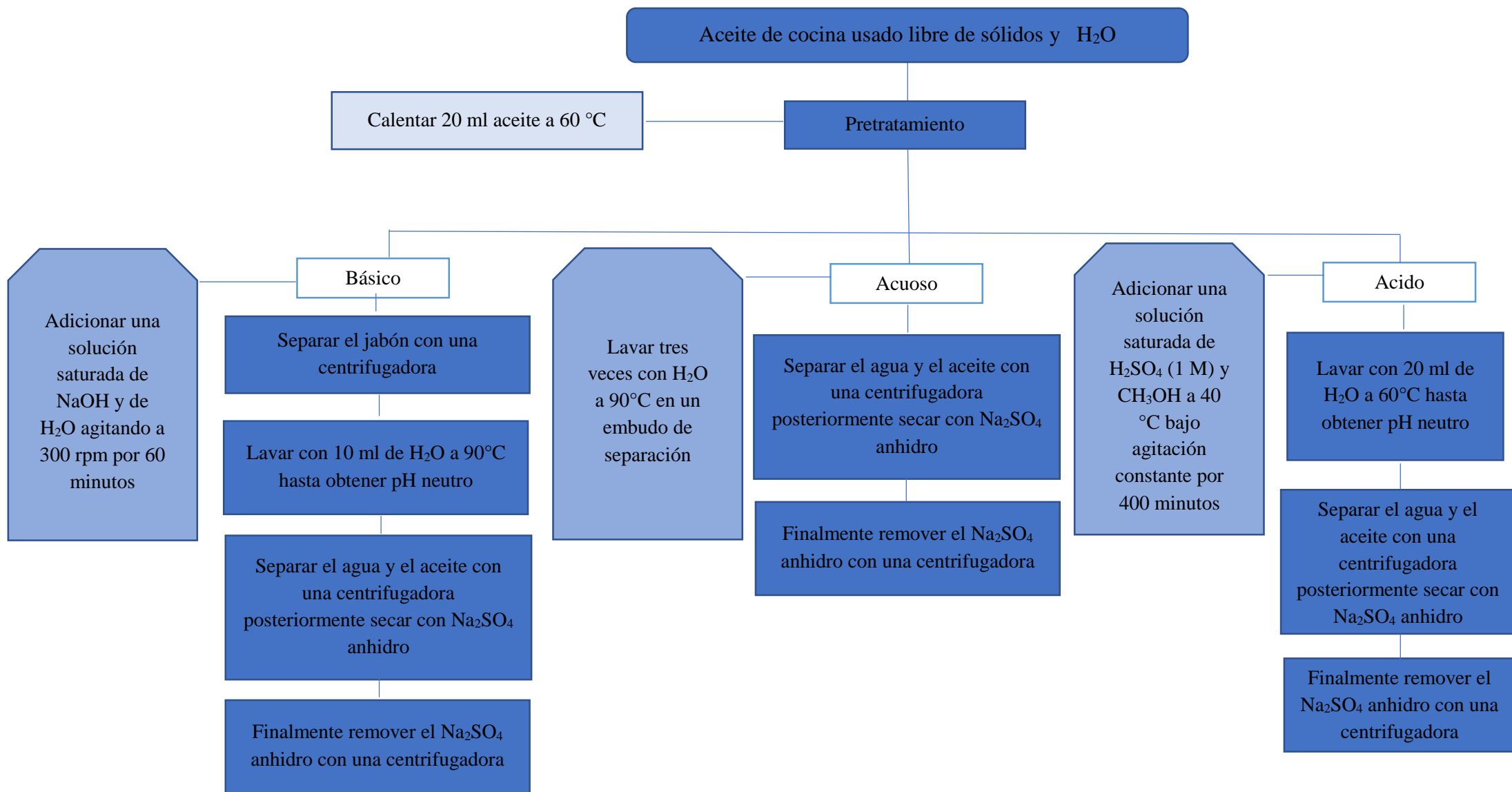


Figura 13. Pretratamiento del AVU.

4.6 Reacción de transesterificación

La reacción se efectuó en un matraz de dos bocas, en el cual se colocó un refrigerante, un termómetro y se sometió a agitación magnética (Figura 14). La variación molar de metanol/aceite vegetal usado fue de 6:1, el porcentaje de catalizador de 6% m/m y un tiempo de reacción mayor a 3 horas (Viriya-Empikui, N et al., 2012; Boey, PL et al., 2011). La reacción se llevó a cabo a presión atmosférica, por lo tanto, se mantuvo destapada la boca superior del refrigerante.

Se realizó un monitoreo de la reacción cada 30-60 minutos mediante Cromatografía de Capa Fina empleando placas de silica gel (Silica Gel 60 F₂₅₄) como fase estacionaria. Se empleó el aceite vegetal usado como referencia y se comparó con el producto de la reacción; como eluyente se utilizó una mezcla de Hexano/AcOEt/AcOH (9:1:0.1) y las cromatoplasas se revelaron en una cámara de iodo



Figura 14.-Reacción de transesterificación

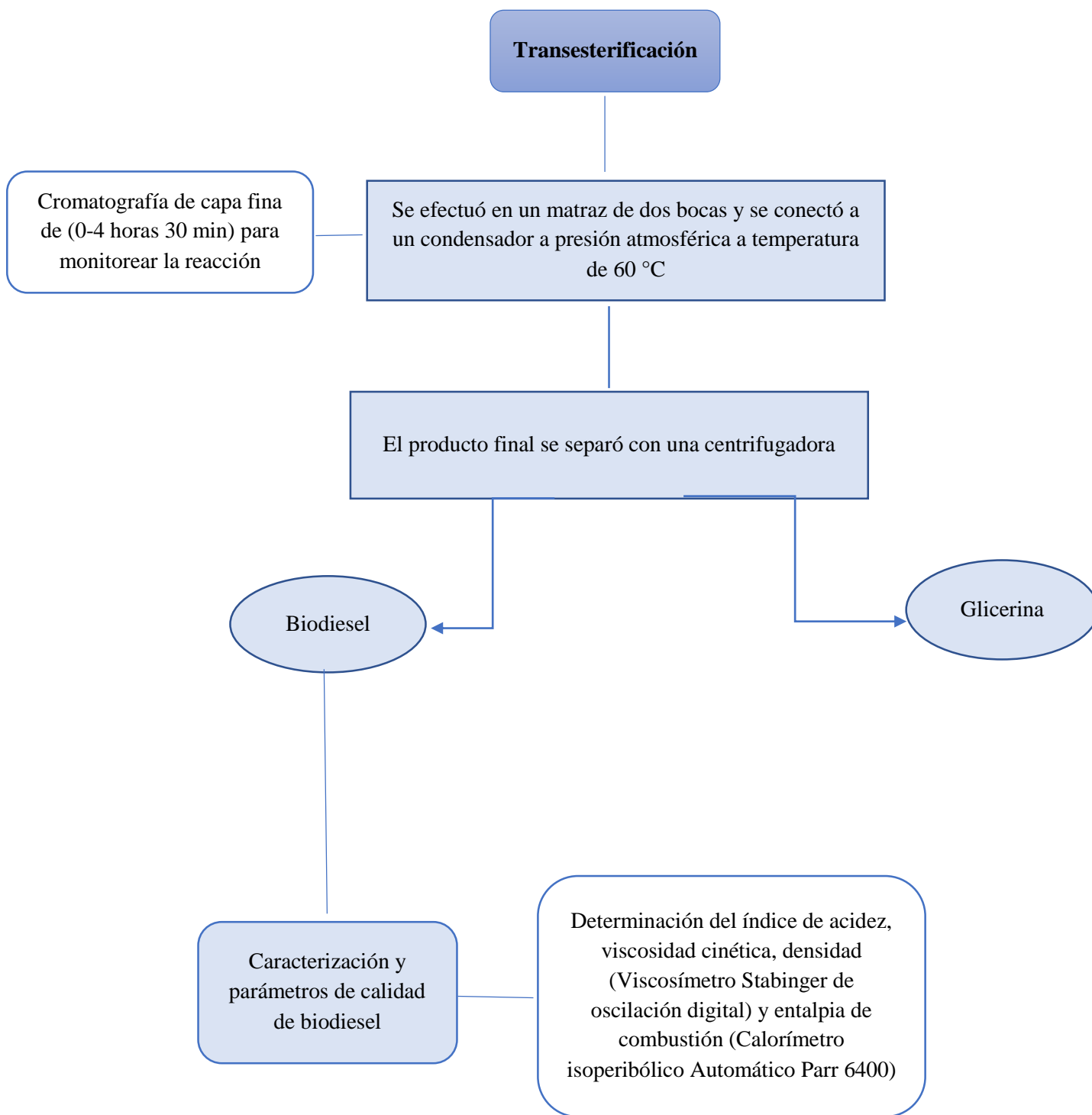


Figura 15. Transesterificación.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1.1 Propiedades del AVU

Las propiedades son de suma importancia al momento de efectuar la reacción de transesterificación; nos proporcionan un parámetro en cuanto a la calidad del biodiesel que se obtendrá.

5.1.2 Índice de acidez

Es conveniente partir de aceites usados de baja acidez para reducir la formación de jabones que dificulten la separación del biodiesel; De acuerdo con los autores Cvengros et al., 2003 y Tariq et al., 2012, los límites máximos permitidos del índice de acidez no deben exceder el tres, debido a que puede aumentar la solubilidad de la glicerina con el biodiesel haciendo difícil su separación.

Tabla 5. Índice de acidez AVU.

| Número de muestra | Índice de acidez AVU (mg KOH/g) |
|-------------------|------------------------------------|
| 1 | 2.5325 |
| 2 | 2.5462 |
| 3 | 2.5829 |
| Promedio | 2.5538 |

Conforme a los resultados mostrados en la Tabla 5 el aceite presenta un índice de acidez menor a tres lo que indica que el aceite contiene pocos ácidos grasos libres, por lo tanto, no se requiere de pretratamiento para dar inicio con la transesterificación. Sin embargo, considerando un escenario más realista en donde el aceite es sometida a temperaturas altas y se mezclan diversos aceites el índice de acidez puede alcanzar valores elevados, por lo cual, se decidió efectuar un pretratamiento básico, ácido y acuoso con el objetivo de disminuir los ácidos grasos libres presentes para favorecer la transesterificación.

5.1.3 Índice de yodo

Esta prueba proporciona información cuantitativa sobre la insaturación del aceite, al obtener un valor elevado, este será propenso a sufrir oxidación presentando un periodo de utilidad menor debido a la degradación por la temperatura o la luz.

El valor obtenido del índice de yodo genera una correlación con el punto de fusión del aceite por lo que al poseer mayor insaturación el punto de fusión del aceite será menor. El punto de fusión de los biocombustibles producidos está relacionado con el aceite de procedencia. (Singh, S., & Singh, D. 2010)

Tabla 6. Índice de yodo del AVU

| Índice de yodo (mg I/g) | Referencia |
|-------------------------|----------------------|
| 83-141.5 | Raqueeb (2015) |
| 148 | Kataria et al (2017) |
| *130.127 ± | Este trabajo |

*Prueba experimental realizada por triplicado en el laboratorio.

Al comparar el valor de índice de yodo con otros experimentos utilizando AVU presente en la Tabla 6, se puede notar AVU utilizado en este trabajo experimental se encuentra dentro del intervalo de 83 a 148 (mg I /g) lo que indica que el aceite cuenta con un periodo de utilidad adecuado para efectuar la transesterificación.

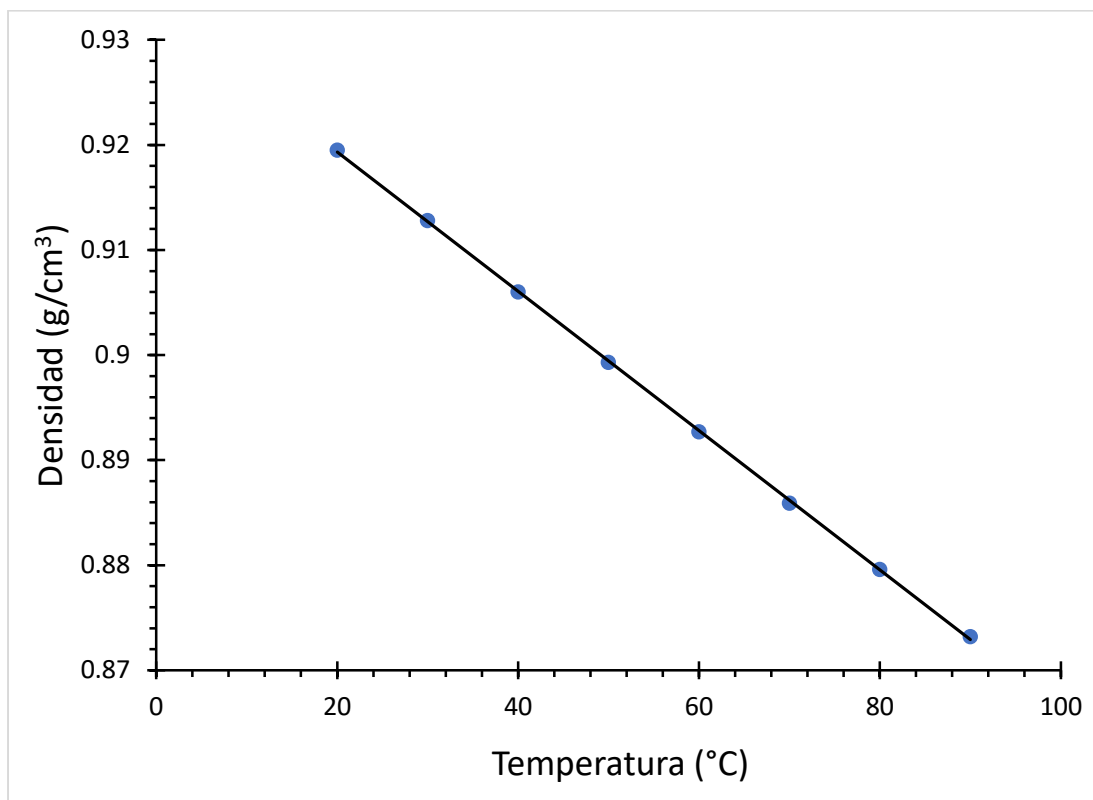
5.1.4 Densidad del AVU

La densidad del aceite será mayor a comparación con el biodiesel, por lo cual, no se recomienda su utilización directa dado que puede causar daños en el motor.

Tabla 7. Densidad del AVU a diferentes temperaturas

| Temperatura (°C) | Densidad (g/cm ³) |
|------------------|-------------------------------|
| 20 | 0.9195 |
| 30 | 0.9128 |
| 40 | 0.9060 |
| 50 | 0.8993 |
| 60 | 0.8927 |
| 70 | 0.8859 |
| 80 | 0.8796 |
| 90 | 0.8732 |

Con esta tabla se confirma que la temperatura y la densidad tiene una relación lineal
Gráfica 3.



Gráfica. 3. Densidad del AVU vs Temperatura

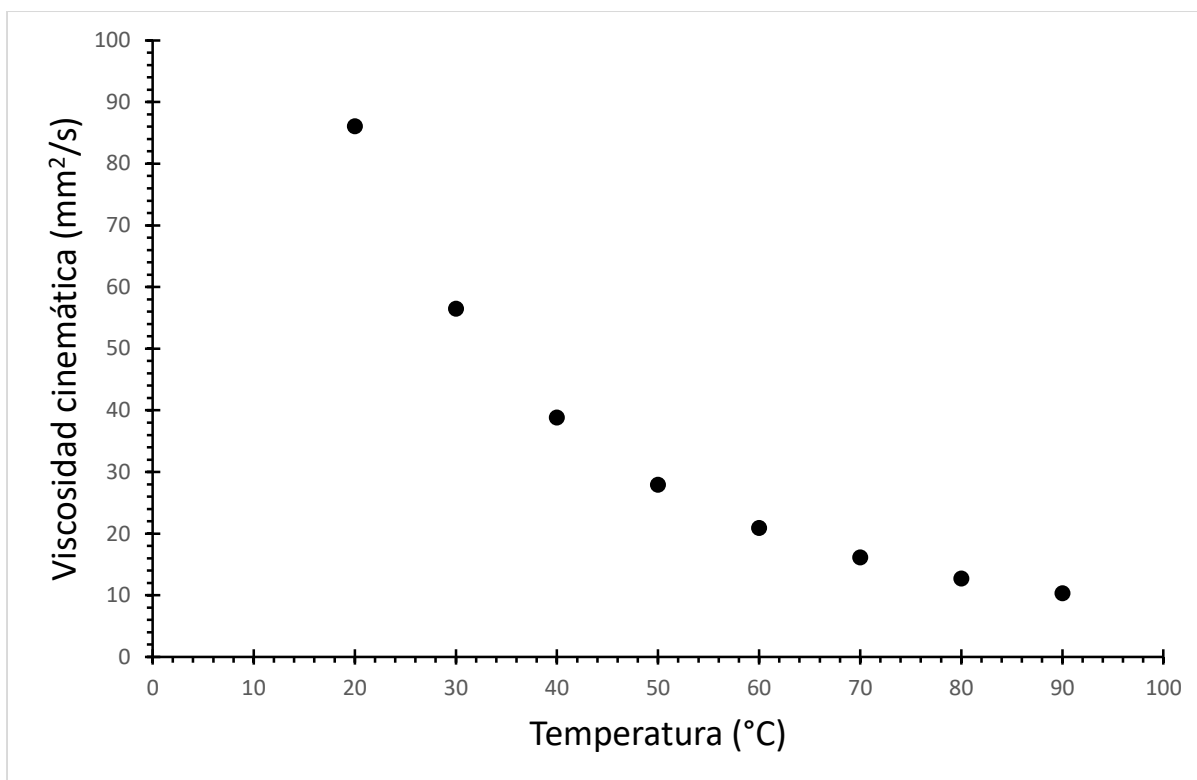
5.1.5 Viscosidad del AVU

De acuerdo con (Demirbas et al., 2016) la viscosidad de los aceites vegetales es 10 a 20 veces más alta que el diésel. Los triglicéridos se encuentran constituidos por moléculas largas lo que resulta en viscosidad elevada (Tabla 8) y baja volatilidad, por lo cual, se comprueba claramente su deficiencia si este se utilizara en un motor dado que no podría circular adecuadamente.

Tabla 8. Viscosidad del AVU a diferentes temperaturas

| Temperatura (°C) | Viscosidad cinemática (mm ² /s) |
|------------------|--|
| 20 | 86.073 |
| 30 | 56.498 |
| 40 | 38.833 |
| 50 | 27.947 |
| 60 | 20.896 |
| 70 | 16.130 |
| 80 | 12.728 |
| 90 | 10.308 |

En base al comportamiento de la Gráfica 4, al aumentar la temperatura, más baja será la viscosidad; es una de las características más importantes del combustible debido a que determina la resistencia del líquido al fluir. Al presentarse niveles demasiado elevados, se afecta la operación de inyección del combustible al motor, lo que generaría un impacto en la eficiencia de éste.



Gráfica. 4. Viscosidad cinemática AVU. vs Temperatura

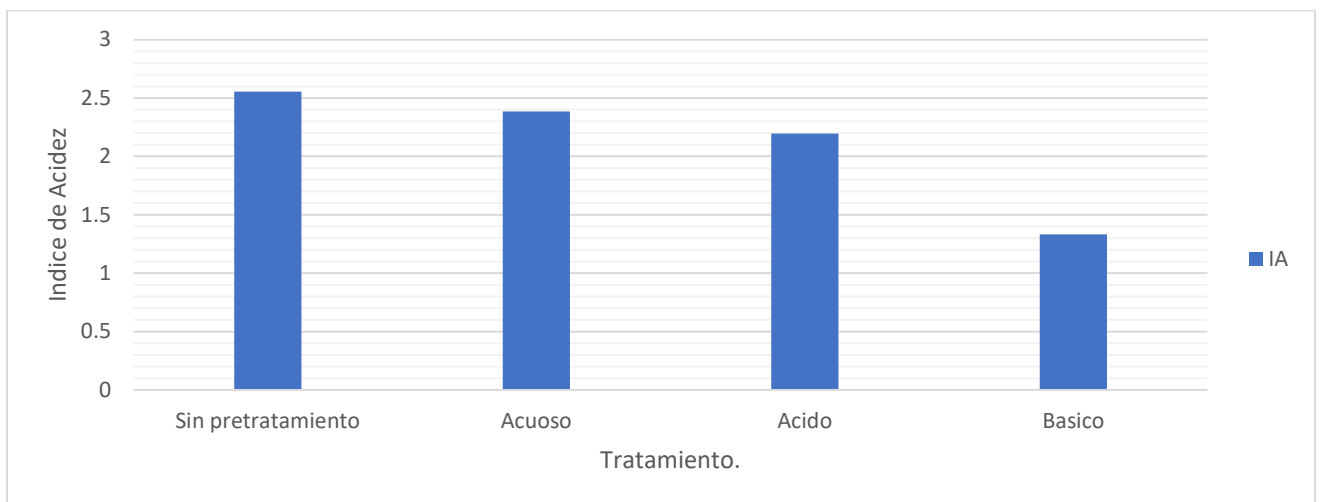
5.2 Pretratamiento del AVU

El aceite vegetal usado presenta ácidos grasos libres causados por el deterioro que ha sufrido. Con el propósito de contar con las condiciones óptimas para el proceso de transesterificación, se realizaron diversos pretratamientos, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 9. Índice de Acidez pretratamiento Básico, Acuoso, Ácido y sin pretratamiento

| Pretratamiento | Índice de Acidez mg KOH/g muestra |
|--------------------|--------------------------------------|
| Básico | 1.3316 |
| Acuoso | 2.3860 |
| Ácido | 2.1949 |
| Sin pretratamiento | 2.5538 |

Cada aceite pretratado fue secado y filtrado para evitar un deterioro mayor. De acuerdo a la Gráfica 5, cada pretratamiento llevado a cabo presentó una reducción de ácidos grasos libres, por lo que se puede concluir, que los pretratamientos cumplieron su objetivo, sin embargo, el pretratamiento acuoso no presentó resultados favorables al no observar una reducción considerable del índice de acidez.



Gráfica. 5. Comparación de los métodos de pretratamiento.

El pretratamiento básico presenta la mayor disminución en el índice de acidez, indicando que es el mejor pretratamiento. Además, la materia prima es de fácil acceso y manejo.

5.2.1 Calor de combustión del AVU

Es importante considerar el calor de combustión de la materia prima (AVU), debido a que esta propiedad determinará el contenido energético que se obtendrá del biodiesel obtenido.

El AVU con pretratamiento básico presentó una entalpia de combustión de 39.2740 KJ/g. Se espera obtener un biocombustible con un calor de combustión en promedio 8% a 15% menor respecto al del diésel petroquímico (44-46 KJ/g), producido a partir del petróleo (Arias et al., 2011).

5.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) del CaO obtenido del cascarón de huevo una vez efectuada la calcinación

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) y composición química elemental del cascarón de huevo una vez efectuada la calcinación se ilustran en la figuras 16 y 17. El análisis proporcionó una imagen tridimensional de la superficie de la muestra con un nivel de detalle y profundidad, revelando que se aglomeran las partículas. De acuerdo a la literatura se calcinó a 900 °C por 4 horas para aumentar el diámetro de poro, la muestra se guardó en un vial cubierto con parafilm para evitar el envenenamiento del catalizador y por último se guardó en un desecador debido a que el CaO es higroscópico, por lo cual, fue utilizado lo antes posible

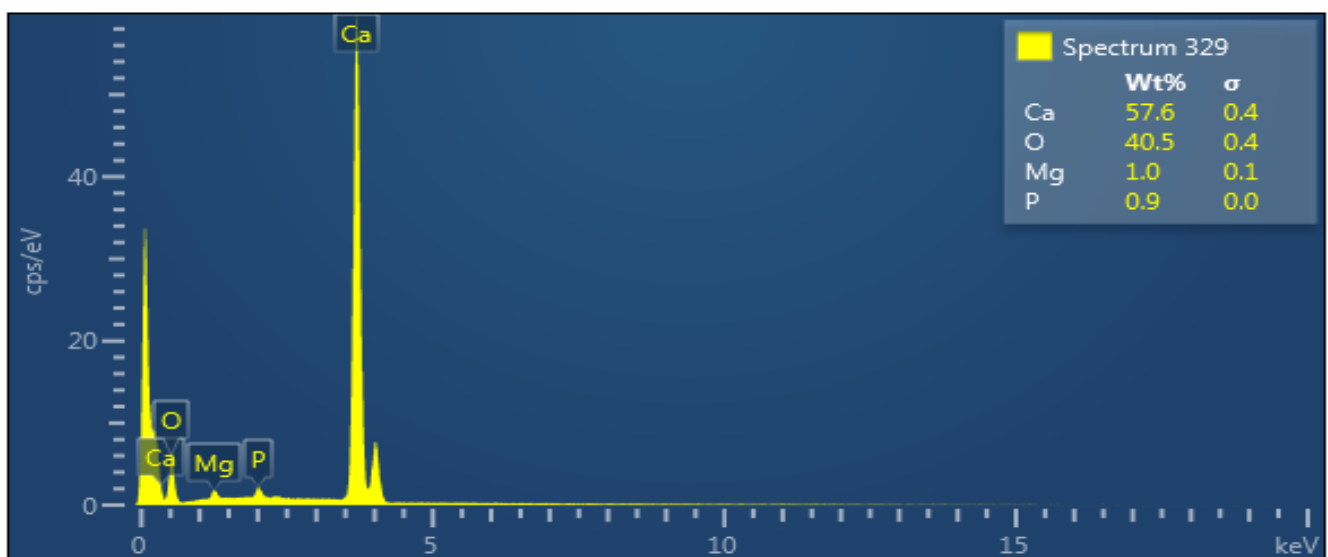


Figura 16.- Composición química elemental de nano polvo del cascarón de huevo calcinado por Microscopía Electrónica de Barrido

El análisis arrojó que el cascarón de huevo calcinado presenta elevados porcentajes de Ca y O, con el mapeo se observa la favorable distribución de estos elementos lo que nos lleva a concluir, que la calcinación fue exitosa siendo favorable para la reacción de transesterificación.

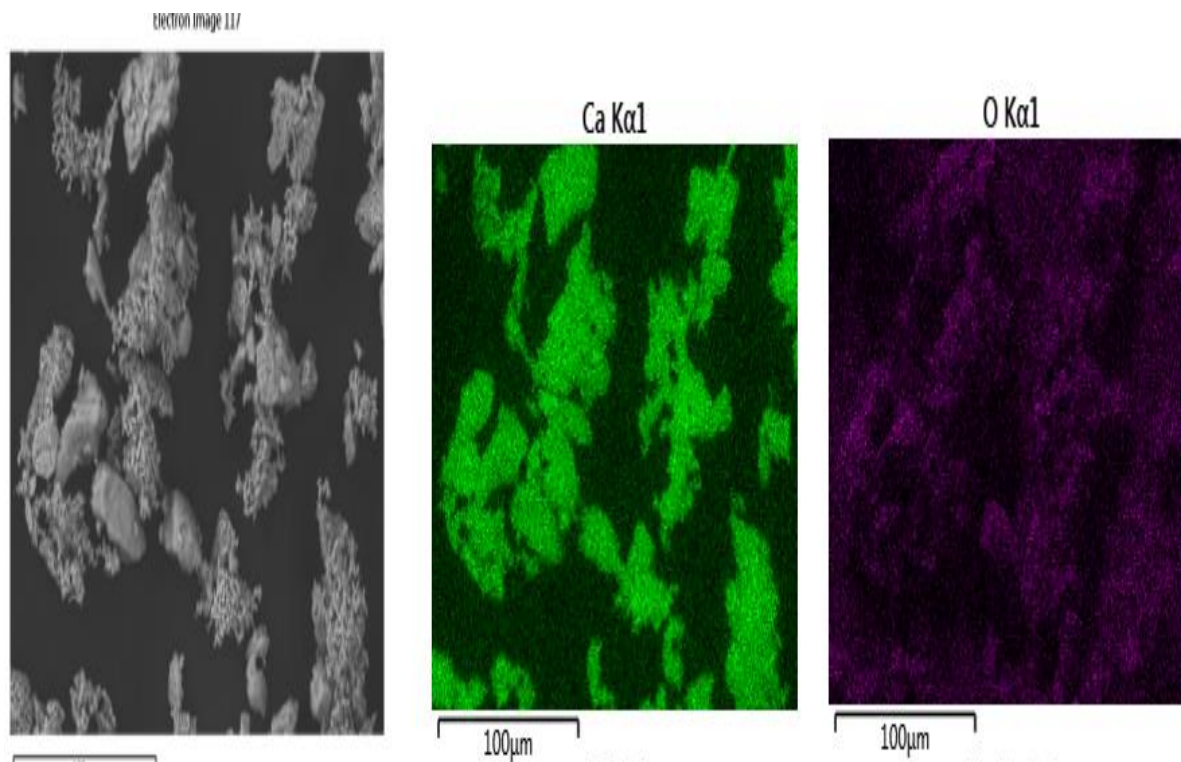


Figura 17.-Mapeo de la cáscara de huevo calcinada

En la figura 17 se observan pequeñas partículas en forma de conglomerado. Al ser de tamaño reducido se espera una mayor área superficial específica que promovería una mayor rapidez de reacción de la transesterificación (El-Gendy et al., 2014)

5.4 Transesterificación

Tan pronto como fueron obtenidas las características fisicoquímicas del aceite vegetal usado, se demostró que puede ser efectuada la transesterificación, siendo el índice de acidez menor al 3%, el valor de índice de iodo y calor de combustión similar al de otros aceites vegetales usados para la producción de biodiesel. Investigaciones realizadas indican que el desempeño del CaO derivado de la cáscara de huevo durante la reacción de transesterificación es factible, sostienen que los valores óptimos para obtener altos rendimientos de FAME utilizando aceites vegetales fresco a 60–65 °C con 1: 9,1:6 o 1:12 aceite: metanol y tiempo de reacción mayor a 3 horas (Navajas, A et al., 2013) (Viriya-Empikui, N et al., 2012). Se ha sugerido que la reacción puede alcanzar rendimientos de FAME (97%) con la utilización de aceite/metanol 1:6 y 5.8% m/m con agitación constante (Alla, P et al., 2016).

El avance de la reacción se monitoreo mediante Cromatografía en capa Delgada, donde se empleó como eluyente Hexano/AcOEt/AcOH (9:1:0.1) para finalmente revelar las placas en una cámara de Iodo. Se monitoreo la reacción cada 30 minutos y la reacción se consideró finalizada cuando se apreció la marca del biodiesel por arriba de la marca del aceite esto se logró visualizar a las 4 horas 30 minutos. La transesterificación se efectuó en condiciones anhidras ya que por cada pretratamiento efectuado este se filtró y se secó. Después de la reacción se centrifugó con el objetivo de obtener al éster metílico, glicerol y el catalizador.

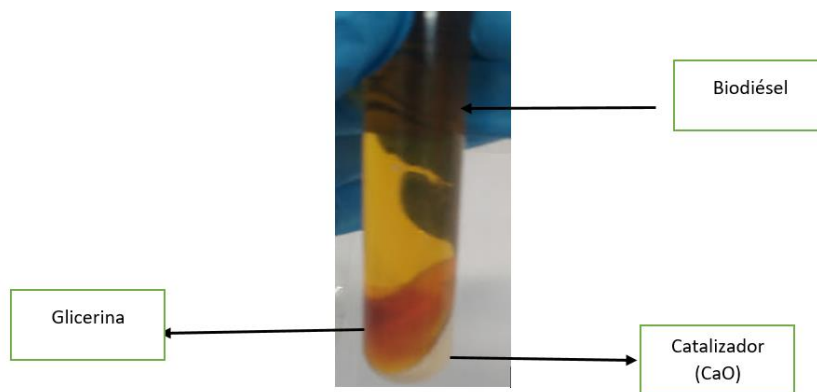


Figura 18.-Productos de transesterificación, separados con centrifugadora

Al recuperar el biodiesel se calcularon los rendimientos obtenidos, los cuales se encuentran en la Tabla 10, en donde se puede notar que la transesterificación realizada al aceite vegetal usado de papas fritas con pretratamiento básico presenta un porcentaje de 85.47, el cual, presenta mejores resultados a comparación de los pretratamientos, básico y acuoso

Las reacciones se efectuaron en un tiempo de 4 hr 30 minutos a una temperatura de 60 °C, catalizador 6% m/m y una relación 1: 6 aceite: metanol

Tabla 10. Rendimiento de la reacción de transesterificación

| Prueba experimental | Pretratamiento | Rendimiento % |
|---------------------|----------------|---------------|
| 1 | Básico | 85.47 |
| 2 | Acuoso | 84.99 |
| 3 | Ácido | 56.98 |

Considerando los resultados del rendimiento obtenido se considera que el aceite, pretratamientos, catalizador son eficientes y viables para la producción de biodiesel. En este caso se considera idóneo utilizar un pretratamiento básico debido a que presenta mejores resultados.

Para próximas experimentaciones se plantea optimizar el proceso al proponer un mecanismo de reacción, y mediante el análisis de datos cinéticos conocer el paso determinante de la rapidez de reacción catalítica para así mejorar el proceso.

5.5 Propiedades del biodiesel obtenido

Las propiedades del biodiesel obtenido deben estar dentro de los parámetros de calidad establecidos por los organismos internacionales (ASTM y EN), para que este biodiesel pueda ser considerado como un sustituto parcial o total del diésel fósil.

5.5.1 Calor de combustión

Es de suma importancia debido a que nos indica la energía liberada al efectuarse el proceso de combustión del biodiesel. De acuerdo a Arias et al., 2011 se espera obtener un biocombustible con calor de combustión entre 8% a 15% con un valor menor respecto del Diésel PEMEX., Al comparar entre el valor de Diésel Pemex (46.04-44 KJ/g) y el obtenido con CaO como catalizador (39.5736 KJ/g) se llega a la conclusión que el biodiesel obtenido es viable y tendrá una buena eficiencia en el motor.

5.5.2 Densidad

Se analizó la densidad de dos biodiesel fabricados con diferente catalizador el primero de ellos fue fabricado con un catalizador homogéneo KOH, y el segundo con un catalizador heterogéneo CaO, finalmente se comparó su comportamiento con el diésel de Pemex.

La densidad influye en la eficiencia de la atomización del combustible entre más combustible es inyectado más se incrementará la densidad.

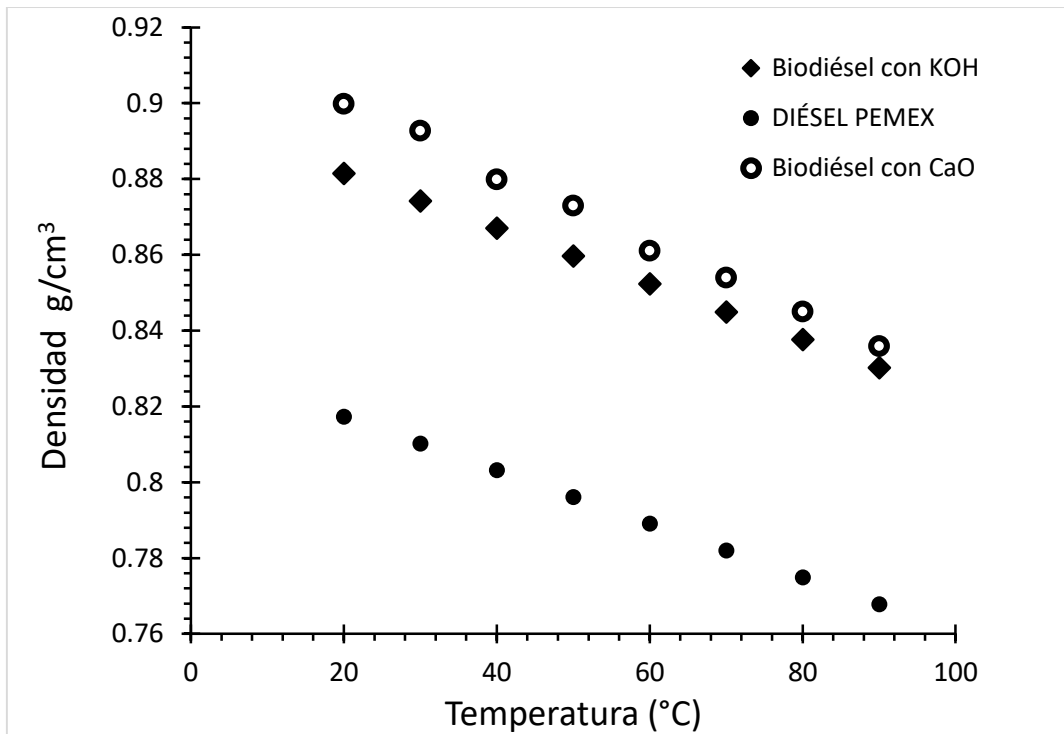
En general, el biodiesel obtenido de un aceite vegetal o grasa es denso y menos compresible que el combustible diésel (García, et al., 2018).

Tabla 11. Densidad de biodiésel con KOH, CaO y diésel PEMEX.

| Temperatura (°C) | Densidad (g/cm ³) Biodiésel con CaO | Densidad (g/cm ³) Biodiésel con KOH | Densidad (g/cm ³) Diésel PEMEX |
|------------------|---|---|--|
| 20 | 0.8998 | 0.8815 | 0.8173 |
| 30 | 0.8927 | 0.8742 | 0.8102 |
| 40 | 0.8799 | 0.867 | 0.8032 |
| 50 | 0.873 | 0.8597 | 0.7961 |
| 60 | 0.8611 | 0.8523 | 0.7891 |
| 70 | 0.854 | 0.8449 | 0.782 |
| 80 | 0.845 | 0.8376 | 0.7749 |
| 90 | 0.8359 | 0.8302 | 0.7678 |

Comparación del biodiesel obtenido con KOH y CaO como catalizadores vs Diésel Pemex.

En la Tabla 11 se observa que la densidad del biodiesel fabricado con ambos catalizadores (KOH y CaO) es mayor que la del diésel Pemex. Sin embargo, considerando la tendencia observada en el comportamiento lineal de la densidad con respecto a la temperatura, se puede establecer que la densidad cumple con las normas ASTM y EN en un intervalo de 0.86-0.9 g/cm³ a una temperatura de 15 °C.



Gráfica. 6. Densidad de biodiesel con KOH, CaO y diésel PEMEX.

Al comparar los valores de densidad obtenidos (Gráfica 6) para ambos catalizadores KOH y CaO, se observa que estos son muy cercanos, indicando que el CaO es un catalizador adecuado para producir biodiesel.

5.5.3 Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática se define como la resistencia del líquido a fluir y es una característica importante del combustible porque afecta la operación de inyección del combustible, formación de mezclas y procesos de combustión. La alta viscosidad interfiere con el proceso de inyección e induce a una insuficiente atomización del combustible (García, et al., 2018).

La viscosidad es fundamental para el motor ya que esta propicia una combustión completa o incompleta., al presentarse una viscosidad elevada se verá afectada la atomización a la entrada de la cámara de combustión por lo tanto la combustión será incompleta generando diversos problemas como son: la formación de depósitos en los inyectores, mayor volumen de combustible inyectado, entre otros.

El valor de viscosidad es de suma relevancia para los motores que usarán biodiesel, ya que suele ser elevado respecto al diésel comercial (Arias et al., 2011)

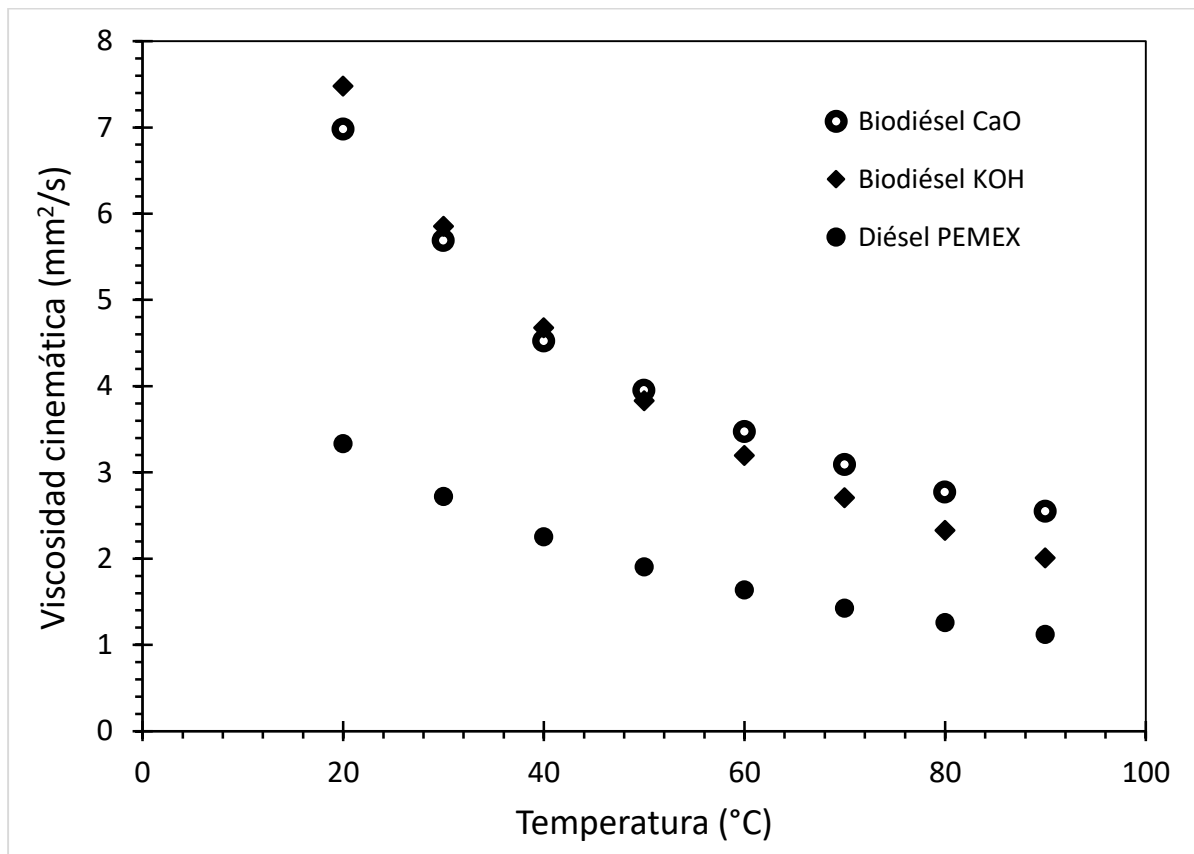
Tabla 12. Viscosidad cinemática de biodiesel con KOH, CaO y diésel PEMEX.

| Temperatura (°C) | Viscosidad cinemática (mm ² /s) Biodiésel CaO | Viscosidad cinemática (mm ² /s) Biodiésel KOH | Viscosidad cinemática (mm ² /s) Diésel PEMEX |
|------------------|--|--|---|
| 20 | 6.9804 | 7.4813 | 3.3361 |
| 30 | 5.6916 | 5.8563 | 2.7211 |
| 40 | 4.5249 | 4.6804 | 2.2552 |
| 50 | 3.9518 | 3.8312 | 1.9061 |
| 60 | 3.474 | 3.1997 | 1.6384 |
| 70 | 3.0922 | 2.7098 | 1.4279 |
| 80 | 2.7732 | 2.328 | 1.2595 |
| 90 | 2.5495 | 2.009 | 1.1229 |

De acuerdo con los intervalos de viscosidad cinemática de las normas internacionales ASTM a 40 °C para B100 de 1.9-6 mm²/s y EN a 40 °C de 3.5- 5 mm²/s ambos catalizadores de biodiesel se encuentran dentro del intervalo adecuado, los resultados son 4.6804 KOH y 4.5249 CaO (Tabla 12) indicando que el biodiesel producido en ambos cumple con las normas internacionales de manera idónea.

Al cumplir con las especificaciones de las normas ASTM y EN B100 se contará con una viscosidad adecuada lo que asegurará una combustión completa, una correcta atomización del combustible y con ello la inyección del volumen adecuado de combustible. Sin embargo, a pesar de cumplir con las normas existen pocos vehículos que cuenten con las especificaciones para utilizar biodiesel al cien por ciento y de ahí la utilización de mezclas. Por ejemplo, si consideramos a los motores con combustión interna se debe tomar en cuenta que el biodiesel B100 debe presentar ciertas modificaciones debido a que el biodiesel puede reaccionar con diversos materiales como el cobre, plomo, estaño, zinc, y sus aleaciones aceleran el proceso de degradación oxidativa del B100, además puede desgastar, ablandar, o filtrarse a través de mangueras o sellos fabricados con elastómeros, gomas, y plásticos con la exposición prolongada. Para mezclas de 20% o menor no presentan grandes dificultades de compatibilidad (Ganduglia, F et al.,2009). Para utilizar el biodiesel

obtenido con CaO, en motores diésel se recomienda la mezcla de biodiesel con diésel desde B10, B20 y B50.



Gráfica. 7. Viscosidad cinemática de biodiesel con KOH, CaO y diésel PEMEX

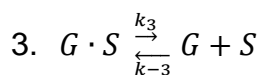
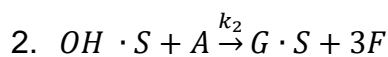
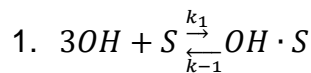
La viscosidad para el biodiesel es mayor a comparación con la del diésel Pemex, al comprar la viscosidad del aceite recolectado después de efectuarse la transesterificación esta disminuye drásticamente (Tabla 8 y 12) lo que nos indica que la transesterificación se efectuó de manera correcta. En la Gráfica 7 podemos ver que a mayor temperatura disminuye la viscosidad lo que indica que el biodiesel tiene mejor funcionamiento a altas temperaturas.

5.6 Propuesta mecanismo de reacción

Con base a los resultados anteriores buscando optimizar la reacción de transesterificación con CaO como catalizador se propone un mecanismo de reacción. El siguiente mecanismo de reacción se tomó del artículo (Cardozo et al., 2015). Activando de manera previa el CaO con metanol lo que hace que aumenta la conversión del metil ésteres del aceite.

Eley- Rideal

El sistema es controlado por la adsorción



$$4. -r_A = k_2[A \cdot OH \cdot S] \quad \text{Etapla controlante}$$

$$5. C_T = [S] + [OH \cdot S] + [G \cdot S]$$

$$6. C_T = [S] + K_{OH}[OH]^3[S] + \frac{k_2 K_{OH}}{k_3}[A][OH]^3[S] + \frac{1}{K_G}[G]$$

$$7. C_T = [S] \left(1 + K_{OH}[OH]^3 + \frac{k_2 K_{OH}}{k_3}[A][OH]^3 + \frac{1}{K_G}[G] \right)$$

$$8. [S] = \frac{C_T}{\left(1 + K_{OH}[OH]^3 + \frac{k_2 K_{OH}}{k_3}[A][OH]^3 + \frac{1}{K_G}[G] \right)}$$

$$9. -r_A = k_2[K_{OH}[OH]^3[S][A]]$$

Sustituyendo a la ec.8 en 9

$$-r_A = \frac{k_2 K_{OH}[A][OH]^3 C_T}{\left(1 + K_{OH}[OH]^3 + \frac{k_2 K_{OH}}{k_3}[A][OH]^3 + \frac{1}{K_G}[G] \right)}$$

$$K_{OH} = \frac{k_1}{k_{-1}} \quad y \quad K_G = \frac{k_3}{k_{-3}}$$

6. CONCLUSIONES

- Se empleó CaO proveniente de la calcinación de cáscara de huevo para obtener biodiesel del aceite vegetal usado de cocina.
- Se demostró que la obtención de CaO con la calcinación de cáscara de huevo a 900 °C es factible.
- Se encontró que el pretratamiento básico es el más adecuado al presentar una disminución considerable en el índice de acidez.
- Las propiedades fisicoquímicas obtenidas como calor de combustión, viscosidad cinemática y densidad, cumplieron con los parámetros establecidos en las normas ASTM y EN, produciendo un biodiesel apto para ser utilizados en motores de combustión interna.
- Se evidenció que con materia prima considerada como desecho se puede producir biodiesel con los parámetros de calidad requeridos y constituir una alternativa a la demanda de combustible en México
- Para mejorar el proceso de transesterificación con CaO, para próximas experimentaciones se plantea proponer un mecanismo de reacción y mediante el análisis de datos cinéticos conocer el paso determinante de la rapidez de reacción.

7.- BIBLIOGRAFÍA.

- ✓ Abdel-khalek, M., Abdel Rahman., & Francis, A. (2017). Exploring the adsorption behavior of cationic and anionic dyes on industrial waste shells of egg. *Environmental Chemical Engineering*, 319-327.
- ✓ A Better Way Biogás <https://rembio.org.mx/biogas/>
- ✓ Alla, P., Betina, T., Nina, P., & Aharon, G. (2016). A green and low -cost room temperature biodiesel production method from waste oil using egg shells as catalyst. *Fuel*, 182, 34-41.
- ✓ Álvarez, C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, núm. 359 ▪ julio-agosto
<http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>
- ✓ Arce, J. (2011). Fundamentación teórica. En el diseño de un biodigestor biogás y abono para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicables en las zonas agrarias del litoral (pp. 18-45). Guayaquil Ecuador
- ✓ Arias, D., Teuta, C., & Parra, J. (2011). Caracterización de las propiedades del biodiesel de girasol bajo la Norma NTC de 100/04 y medición de poder calorífico. *AVANCES Investigación en Ingeniería Vol. 8 - No. 2*
- ✓ Asgrow (2019) La bioenergía en México. Consultado el 3 de enero del 2023. [Online] Disponible en: <https://www.asgrow.com.mx/es-mx/tendencias/agrotecnologia/-la-bioenergia-en-mexico.html>
- ✓ Atlas Nacional de Biomasa ANBIO. (2021). Biomasa. <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa>
- ✓ Becker, C. (2018). From Langmuir to Ertl: The “Nobel” History of the Surface Science Approach to Heterogeneous Catalysis. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering. doi:10.1016/b978-0-12-409547-2.13527-9
- ✓ Bedoya Salazar Esp., Apolonia, & Valencia González M.Sc., Mónica Patricia. (2020). Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática. *Revista colombiana de ciencia animal*

recia, 12(2), 106-116. Epub August 29, 2021. <https://doi.org/10.24188/recia.v12.n2.2020.776>

- ✓ Bernal, E., & Suárez, S. (2018). *Diseño Conceptual de un biodigestor Partiendo de estiércol Vacuno y avícola, Producido en la Finca el Guarumal, para la obtención de Biogás* (Licenciatura). Fundación Universidad de América facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Química Bogotá D.C.
- ✓ Boey, PL., Maniam, GP., & Hamid, SA . 2011. Performance of calcium oxide as a heterogeneous catalyst in biodiesel production: a review. *Chem Eng J* 2011;168(1):15–22.
- ✓ Boro, J., Deka, D., & Thakur AJ. 2012. A review on solid oxide derived from waste shells as a catalyst for biodiesel production. *Renew Sust Energ Rev* 2012;16(1):904–10.
- ✓ Bravo, F. (2014). Optimización del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite de cocina usado. (Tesis). Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.
- ✓ Burezq, H. (2021). Utilization of Eggshell as Valuable Products for Sustainable Ecosystem and Agriculture (Review). *Poult. Sci. J.* 9(2): 147-165.
- ✓ Cabello, C., Rincón, S., y Zepeda, A. (2016). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad*, LXXIV (577), 51-57.
- ✓ Camacho, L. (2021). Optimización del proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite de cocina usado empleando un catalizador obtenido de concha de almeja chocolata (*megapitaria squalida*). (Tesis). Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.
- ✓ Cardozo, J., Zapata, R., & Giraldo, S. (2015). Cinética de la Transesterificación del Aceite de Palma con Metóxido de Calcio. *Revista Ciencia en Desarrollo*, Vol. 5 No. 1, pp. 65-75. Enero 2021.
- ✓ Centro Mario Molina. (2018). Rutas de bajo carbono sectoriales: 1.1 Desarrollo de bajo carbono de las principales agroindustrias de México. 5.- Resumenejecutivo_agroindustria_2018.pdf (centromariomolina.org)
- ✓ Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2013), Banco de Datos del Comercio Exterior de América Latina y el Caribe (BADECEL), [en línea], Santiago de Chile, [marzo de 2013] http://websie.eclac.cl/badecel/badecel_new/basededatos.asp.

- ✓ Cortés, M., Gata, E., Pipio, A., Rodríguez, A., & Sánchez, J. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 35, 1-6. https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero35/De_stacado-1.pdf
- ✓ Cuevas, J. (2021). Perspectiva del comportamiento avícola para el segundo semestre del 2021. *El economista*, [online] p.1. Available at: <https://www.eleconomista.com.mx/opinion/Perspectivas-del-comportamiento-avicola-para-el-segundo-semester-de-2021-20210720-0153.html> [Accessed Noviembre. 2021].
- ✓ Cvengros J, & Cvengrosova Z. (2003). Used frying oils and fats and their utilization in the production of methyl esters of higher fatty acids. *Biomass and Bioenergy*. 27. 173–181.
- ✓ Daniel H. Villavicencio C. et Julio César Millán, «La transición energética en México: disyuntivas, tensiones y avances en la ejecución del proyecto nacional», *Caravelle* [En ligne], 115 | 2020, 09 febrero 2021, consulté el 21 octubre 2023. URL: <http://journals.openedition.org/caravelle/8635>; DOI: <https://doi.org/10.4000/caravelle.8635>
- ✓ Del Pilar Martínez, M. (2018). México ocupa el primer lugar en consumo de huevo en el mundo. *El economista*, [online] p.1. Available at: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-ocupa-el-primer-lugar-en-consumo-de-huevo-en-el-mundo-20181011-0069.html> [Accessed 3 Feb. 2019].
- ✓ Demirbas, A., Bafail, A., Ahmad, W., & Sheikh, M. (2016). Biodiesel production from non-edible plant oils. *ENERGY Exploration and Exploitation*, 34(2):290-318
- ✓ El-Gendy, N. S., Hamdy, A &, Abu Amr, S.S. 2014. An investigation of biodiesel production from wastes of seafood restaurants. *International Journal of biomaterials*, 2014, 17. Article ID 609624
- ✓ Facilitación del transporte y el comercio en América Latina y el Caribe (2014) Consumo de energía y eficiencia energética: nuevos retos del comercio con contenedores frigoríficos en las terminales de contenedores de América del Sur. Edición 329, número 1, 2014, pp. 1-3. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37282/Bolet%C3%ADn%20FAL%20329_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- ✓ Fairroosa, P., Vishwas, Ch., Kishore, N & Rajenahally, J. (2022). Synergy between homogeneous and heterogeneous catalysis. *Catal. Sci. Technol.*, 2022,12, 6623-6649
- ✓ Fernandez. (2022). Diseño de una planta de biogas (Tesis). Universidad Europea Madrid.
- ✓ FIRCO (2017). Agroindustria en México. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/firco/articulos/agroindustria-en-mexico?idiom=e>
- ✓ Foster, S., & Elzinga D. (2023) El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible. Crónica ONU. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- ✓ Friend, C. M., & Xu, B. (2017). *Heterogeneous Catalysis: A Central Science for a Sustainable Future*. *Accounts of Chemical Research*, 50(3), 517–521. doi:10.1021/acs.accounts.6b00510
- ✓ Ganduglia F. (2009). Manual de Biocombustibles. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 3-9
- ✓ García, K. (2023). La OPEP sugiere a México mantener inversión en combustibles fósiles El economista, [online] p.1. Available at: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/La-OPEP-sugiere-a-Mexico-mantener-inversion-en-combustibles-fosiles-20230309-0144.html>
- ✓ García, R. (2018). Transformación del aceite de las semillas de toronja (*Citrus paradisi*) para la producción sustentable de biodiesel (Tesis). Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.
- ✓ García, S., Lafargue, F., Labrada, B., Díaz, M., & Sánchez, A. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 142-158., http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000100012&lng=es&tlng=es.
- ✓ García, Juan., & García, José. (2006). Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol. Madrid España: Universidad Rey Juan Carlos del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME).

- ✓ Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2018). Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 168, 74-84. doi:10.1016/j.enconman.2018.05.002
- ✓ Gómez, Evaluación del óxido de calcio en la transesterificación del aceite de palma, "Trabajo de grado, Ingeniería Química", Bucaramanga, Colombia, Universidad Industrial de Santander, 2011. Disponible en <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/137915.pdf>.
- ✓ Gómez, F., Gutiérrez, C., Hernández, S., Conde, C., López, Antioqueño, & Morales, R. (2019) Producción de biocombustibles en México. Parte 1. Materias primas. *Digital Ciencia @UAQRO* (pp. 41- 50) ISSN: 2395-8847 | Año 12, No. 2, julio-diciembre de 2019
- ✓ Gutiérrez, J. (2018) Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030. Red Mexicana de Bioenergía A.C. Red Temática de bioenergía de CONACYT. pp. 157-164 <https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2020/11/Situacion-actual-y-escenarios-para-el-desarrollo-del-biogas-en-Mexico.pdf>
- ✓ Iniciativa Climática de México ICM (04 de octubre de 2021). Emisiones del sector transporte. https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/10/COP26-T9_Transporte_final.pdf
- ✓ Izquierdo, J., Cunill, F., Tejero, J., Iborra, M., & Fité, C. (2004). Cinética de las Reacciones Químicas. Edicions Universitat de Barcelona. 143-187
- ✓ Juárez, M., & Sammán, N. (2007). El deterioro de los aceites durante la fritura. *Rev Esp Nutr Comunitaria* 2007;13(2):82-94
- ✓ Juárez, N. (2007). El deterioro de los aceites durante la fritura. *Rev Esp Nutr Comunitaria*; 13 (2): 82-94 <https://www.renc.es/imagenes/auxiliar/files/0032007.pdf>
- ✓ Kataria, J., Mohapatra, S.K., & Kundu, K (2017): Biodiesel production from frying oil using zinc-doped calcium oxide as heterogeneous catalysts, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, DOI: 10.1080/15567036.2016.1270376
- ✓ Kesić, Z., Lukic, I., Zdujic, M., Mojovic, L., & Skala, D. (2016). Calcium oxide based catalysts for biodiesel production: A review. *hem. Ind. Chem. Eng. Q.* 22 (4) 391–408.

- ✓ Khemthong, C., Luadthong, W., Nualpaeng, P., Changsuwan, P., Tongprem, N & Faungnawakij, K. Industrial eggshell wastes as the heterogeneous catalysts for microwave-assisted biodiesel production. *Catalysis Today* 190 (2012) 112-116.
- ✓ Lazaro, M (2018). Alteraciones de los aceites vegetales durante la fritura. Universidad de Sevilla https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/82324/TFG_MariaLazaro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- ✓ Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiesel y bioturbina puros, Diario Oficial de la Federación (D. O. F), 22 de octubre 2018, (México).
- ✓ Lukić, I., Kesić, Ž., Maksimović, S., Zdujić, M., Liu, H., Krstić, J., & Skala, D. (2013). *Kinetics of sunflower and used vegetable oil methanolysis catalyzed by CaO-ZnO. Fuel*, 113, 367–378. doi:10.1016/j.fuel.2013.05.093
- ✓ Maninder Meenu, Eric A. Decker & Baojun Xu (2021): Application of vibrational spectroscopic techniques for determination of thermal degradation of frying oils and fats: a review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, DOI: 10.1080/10408398.2021.1891520
- ✓ Marques, L., Alves, R., DeSousa, N., Cecilia, J., Rodríguez, E., Cavalcante., C., & Silveira., R. (2014). Characterization of calcium oxide catalysts from natural sources and their application in the transesterification of sunflower oil. *Bioresource Technology*, 151, 207-213
- ✓ Mazaheri, H; Ong, H.C; Amini, Z; Masjuki, H.H; Mofijur, M.; Su, C.H.; Anjum Badruddin, I.; Khan, T.M.Y. 2021. An Overview of Biodiesel Production via Calcium Oxide Based Catalysts: Current State and Perspective. *Energies* 2021, 14, 3950. <https://doi.org/10.3390/en14133950>
- ✓ Mendoza, Y., Brambila, J., Arana, J., Sangerman, D., & Molina, J. (2016). El mercado de huevo en México: tendencia hacia la diferenciación en su consumo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(6), 1455-1466. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000601455&lng=es&tlng=es.
- ✓ Morales., F & Westreicher., G. (1 de mayo de 2021). Agroindustria. *Economipedia*. <https://economipedia.com/definiciones/agroindustria.html>

- ✓ Nabgan, W., Jalil, A., Nabgan, B., Jadhav, A., Ikram, M., Hamid, U., & Wijayanudin, M. (2022). Sustainable biodiesel generation through catalytic transesterification of waste sources: a literature review and bibliometric survey. *RSC Adv.*, 2022,12, 1604-1627. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ra/d1ra07338a#!divAbstract>
- ✓ Navajas A, Issariyakul T, Arzamendi G, Gandía LM, Dalai AK. Development of eggshell derived catalyst for transesterification of used cooking oil for biodiesel production. *Asia-Pac J Chem Eng* 2013;8(5):742–8.
- ✓ NMX-F-101-SCFI-2012 “Alimentos – aceites y grasas vegetales o animales – determinación de ácidos grasos libres - método de prueba” Norma Mexicana. Diario Oficial de la Federación, 17 de septiembre de 2012.
- ✓ NMX-F-152-SCFI-2011 “Alimentos - aceites y grasas vegetales o animales - determinación del índice de yodo por el método ciclohexano – método de prueba” Norma Mexicana. Diario Oficial de la Federación, 2011.
- ✓ OCDE/FAO (2022), "OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas", *Estadísticas de la OCDE sobre agricultura* (base de datos), <http://dx.doi.org/10.1787/agr-outl-data-en>.
- ✓ OLADE, Sistema de Información Energética de Latinoamérica y el Caribe (sieLAC) <https://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/06/Situacion-del-consumo-energetico-a-nivel-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC-y-sus-perspectivas.pdf>
- ✓ Oliveira, D. A., Benelli, P., & Amante, E. R. (2013). A literature review on adding value to solid residues: egg shells. *Journal of Cleaner Production*, 46, 42–47. doi:10.1016/j.jclepro.2012.09.045
- ✓ Raqueeb, M., & Bhargavi, R. 2015. Biodiesel production from waste cooking oil. *Journal of Chemical and pharmaceutical Research*, 7(12), 670-681
- ✓ Red Agrícola. (01 de 03 de 2023). Lo básico para entender el biogás. Obtenido de <https://www.redagricola.com/cl/lo-basico-entender-biogas/>
- ✓ Rivera, Y., Gutiérrez, C., Gómez, Rubén., Matute., & Izaguirre, C. (2014). Cuantificación del deterioro de aceites vegetales usados en procesos de frituras en establecimientos ubicados en el Municipio Libertador del Estado Mérida. *Revista Ciencia e Ingeniería*. Vol. 35, No. 3, pp. 157-164. <https://www.redalyc.org/pdf/5075/507550626005.pdf>

- ✓ Rodríguez, I. (10 de enero de 2018). ¿Desaparecerá realmente el motor de combustión interna? *Expansión*, p p. 1-2.
- ✓ Rodríguez, J., Meza, J., & Gutiérrez, I. (2022). Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado. *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 23(23), 149-176. Recuperado en 12 de abril de 2023, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2022000100008&lng=es&tlng=es.
- ✓ Romero, A. (2012). Calidad del aire y control de las emisiones de los vehículos. *Rev. R.Acad. Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, 293-305. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2018.URL: <http://www.rac.es/ficheros/doc/01023.pdf>.
- ✓ Samrat M., & Srimanta, R. (2015). A study on production of biodiesel using a novel solid oxide catalyst derived from waste, *pollution control technologies and alternate energy options*, *Environ Sci Pollut Res* (2016) 23:9251–9259
- ✓ Sánchez, M., Gutiérrez, I., Muñoz, A., & Rivera, A. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. Diciembre 2021, de *Revista Tumbaga* Sitio web: <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/58/58>
- ✓ Satterfield.C. (1980). *Heterogeneous catalysis in practice*. New York: McGraw-Hill Book Company, pp. 47-54.
- ✓ Servicios manufactureros chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<http://www.oas.org/dsd/Energy/Documents/SimposioG/3%20Panel%20I%20Biogas.pdf>
- ✓ Singh, S., & Singh, D. (2010). *Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 200–216. doi:10.1016/j.rser.2009.07.017
- ✓ Stadelman, W.J., (2000). Eggs and eggs products. In: Francis, F.J. (Ed), *Encyclopedia of Food Science and technology*, second ed. John Wiley and sons, New York, pp.593-599.
- ✓ Subramaniapillai, N., Kader, M., & Narayanan, A. (2014). Preparation of Biodiesel from Waste Frying Oil Using a Green and Renewable Solid Catalyst Derived from Egg Shell. *AIChE Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol.34, No.1, pp.248-254.

- ✓ Tariq, M., Ali, S. & Khalid, N. 2012. Activity of homogeneous and heterogeneous catalysts, spectroscopic and chromatographic characterization of biodiesel: A review. *J Renew Sustain Ener*, 16,6303-6316.
- ✓ UNEP,s.f. Renewable energy. <https://www.unep.org/explore-topics/energy/what-we-do/renewable-energy>
- ✓ Unión Nacional de avicultores. (2022, septiembre 09). Recuperado de <https://una.org.mx/mexico-promedio-de-consumo-anual-345-huevos-por-habitante/>
- ✓ Universidad de Murcia UM, (2023). Biomasa. <https://www.um.es/web/campussostenible/ambiental/energia/energias-renovables/biomasa>
- ✓ Vargas, Y., & Pérez, L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, Vol. 14, (1) 2018, 59-72. [file:///C:/Users/hpw10/Downloads/faccienbasic,+Revista+FCB+Vol+14+\(1\)+2018-59-72%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/hpw10/Downloads/faccienbasic,+Revista+FCB+Vol+14+(1)+2018-59-72%20(2).pdf)
- ✓ Varnero., M (2011) Manual de biogás <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- ✓ Vera, A. (2014). Obtención de aceite de semilla de chia (salvia hispanica) y su transformación a biocombustible (Tesis). Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.
- ✓ Viriya-Empikul, N., Krasae P., Nualpaeng, W., Yoosuk, B., & Faungnawakij, K. Biodiesel production over Ca-based solid catalysts derived from industrial wastes. *Fuel* 2012;92(1):239–44.
- ✓ Wei Z, Xu C, Li B. Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production. *Bioresour Technol* 2009;100(11):2883–5.
- ✓ Y. Li, Y. Jiang & J. Gao (2015) Heterogeneous Catalyst Derived from Waste Shells for Biodiesel Production, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 37:6, 598-605.
- ✓ Yie, H., Abdullah, M., & Cirilo, H. (2015). The potential of waste cooking oil-based biodiesel using heterogeneous catalyst derived from various calcined eggshells coupled with an emulsification technique: A review on the emission reduction and engine performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) 589–603

- ✓ Ziku, W., Chunli, T., & Baoxing, L. (2008). Application of waste eggs as low-cost solid catalyst for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 100 (2009), pp.2883-2885.

8.- ANEXOS.

8.1 Equipo para efectuar la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y aspecto del cascarón molido



Figura 19. Equipo utilizado para efectuar la Microscopía Electrónica de Barrido



Figura 20.-Aspecto del cascarón de huevo molido

8.2 Proceso para reutilización de la cáscara de huevo tratada térmicamente

- Se separa el CaO de los productos de transesterificación, se lava con metanol para eliminar residuos (Fig. 21.), finalmente se calcinará nuevamente en la mufla a una temperatura de 900 °C por 4 horas. (Ziku, 2008)



Figura 21.-Recuperación de CaO