



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



**“SÍNTESIS DE CATALIZADORES NiMo SOPORTADOS EN CARBÓN ACTIVADO  
PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE  
DE PALMA”**

**TRABAJO RECEPTACIONAL BAJO LA MODALIDAD DE  
TESIS**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**ESTRELLA GUADALUPE ARIZPE DIAZ**

**DIRECTOR(A):**

**DRA. ALIDA ELIZABETH CRUZ PÉREZ**

**CO-DIRECTOR(A):**

**DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ**

**NOVIEMBRE 2024**

---

---

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la ciudad de Cunduacán, Tabasco, el día 17 del mes octubre del año 2024, el que suscribe **Estrella Guadalupe Arizpe Díaz** alumna del programa de **Licenciatura en Ingeniería Química** con número de matrícula **172D22014**, adscrita a la **División Académica de Ingeniería y Arquitectura**, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor(a) (es) de la Tesis presentada para la obtención del título de **Licenciatura** y titulada **Síntesis de catalizadores NiMo soportados en carbón activado para la obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de palma** dirigida por la **Dra. Alida Elizabeth Cruz Pérez** y codirigida por la **Dra. Ebelia del Ángel Meraz**.

### DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 17 de octubre de 2024.



---

**Estrella Guadalupe Arizpe Díaz**



**DIRECCIÓN**

**MEMORANDO**

**PARA:** DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ  
**DIRECTORA DE LA DAIA.**  
**DE:** COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL.  
**FECHA:** 18 DE ABRIL DE 2024  
**ASUNTO:** ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL  
**CCP:** ARCHIVO.  
**MEM/CET/259/ID259/2024**

PRESENTE.

En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 83 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

**“ Síntesis de catalizadores NiMo soportados en carbón activado para la obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de palma ”**

Desarrollado por la C. ESTRELLA GUADALUPE ARIZPE DÍAZ de la Licenciatura en Ingeniería Química bajo la modalidad de “Tesis”, le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA

**DRA. MA. GUADALUPE RIVERA RUEDAS**

Revisor

**DRA. LIZETH ROJAS BLANCO**

Revisor

**DR. ERIK RAMÍREZ MORALES**

Revisor

**DRA. MAYRA AGUSTINA PANTOJA CASTRO**

Revisor

**DRA. MARCÍA EUGENIA OJEDA MORALES**

Revisor

**DRA. ALIDA ELIZABETH CRUZ PÉREZ**

Director de Trabajo Recepcional

**DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERÁZ**  
Co-Director de Trabajo Recepcional

## Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 17 de octubre de 2024.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **Síntesis de catalizadores NiMo soportados en carbón activado para la obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de palma.**

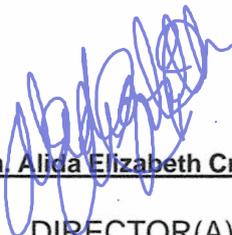
Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

### COLABRADORES



Estrella Guadalupe Arizpe Díaz

ALUMNO(A) O EGRESADO(A)



Dra. Alicia Elizabeth Cruz Pérez

DIRECTOR(A)



Dra. Ebelia del Ángel Meraz

CODIRECTOR(A)

### TESTIGOS



Lorena González Díaz



Anabel González Díaz



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2024  
Felipe Carrillo  
PUERTO  
ANÁLISIS DEL PROBLEMA,  
IDENTIFICACIÓN Y PROPUESTA  
DEL PLAN  
COMUNIDAD DE  
MÉXICO

## DIRECCIÓN

**OFICIO:** DAIA/DIR/CD/0563/2024  
**FECHA:** 11 de julio de 2024  
**ASUNTO:** Autorización de  
Impresión Definitiva

**C. ESTRELLA GUADALUPE ARIZPE DÍAZ**  
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN  
INGENIERÍA QUÍMICA  
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por la DRA. ALIDA ELIZABETH CRUZ PÉREZ y la DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERÁZ, titulado:

**"Síntesis de catalizadores NiMo soportados en carbón activado para la obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de palma"**

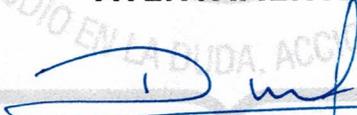
Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

*"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".*

Sin otro particular, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

**ATENTAMENTE**

  
**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
DIRECTORA



**DIRECCIÓN**

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA QUÍMICA-259  
DRA' DMFM/M' LHC

Miembro CUMEX desde 2008  
Consortio de  
Universidades  
Mexicanas  
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda  
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco  
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752  
direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx

# "SÍNTESIS DE CATALIZADORES NiMo SOPORTADOS EN CARBÓN ACTIVADO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE DE PALMA" TRABAJO

ORIGINALITY REPORT

## 19%

SIMILARITY INDEX

### PRIMARY SOURCES

|   |  |                 |
|---|--|-----------------|
| 1 | <a href="http://scielo.isciii.es">scielo.isciii.es</a><br>Internet                               | 326 words — 3%  |
| 2 | <a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a><br>Internet                                   | 173 words — 2%  |
| 3 | <a href="http://eprints.uanl.mx">eprints.uanl.mx</a><br>Internet                                 | 95 words — 1%   |
| 4 | <a href="http://tesis.ipn.mx">tesis.ipn.mx</a><br>Internet                                       | 58 words — 1%   |
| 5 | <a href="http://vdocuments.pub">vdocuments.pub</a><br>Internet                                   | 48 words — < 1% |
| 6 | <a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a><br>Internet                           | 48 words — < 1% |
| 7 | <a href="http://repositorioacademico.upc.edu.pe">repositorioacademico.upc.edu.pe</a><br>Internet | 46 words — < 1% |
| 8 | <a href="http://repository.uaeh.edu.mx">repository.uaeh.edu.mx</a><br>Internet                   | 45 words — < 1% |
| 9 | <a href="http://scielo.sld.cu">scielo.sld.cu</a><br>Internet                                     | 41 words — < 1% |



COORDINACIÓN  
DE ESTUDIOS  
TERMINALES

---

---

## DEDICATORIA

**Cree que puedes y casi lo habrás logrado.**

*Theodore Roosevelt*

A mi hermana María de los Ángeles, el principal pilar de mi vida, aquella persona que ha estado incondicionalmente a mi lado, quien me ha apoyado física, mental, emocional e incluso espiritualmente en toda mi trayectoria universitaria, a la que amo con todo mi ser.

A mis padres, quienes siempre confiaron y mantuvieron la esperanza en mí, quienes creen que podré sobrepasar cualquier obstáculo. A mi madre, que con su deliciosa comida me transmitió todo su amor haciéndome sentir todavía más alentada para no derrumbarme. A mi padre, que gracias él y sus historias de superación personal fue que no me rendí durante este duro pero hermoso camino.

Para mis tíos y abuelos, por apoyarme, quererme y guiarme por el camino del estudio, por no dejarme caer en los momentos más críticos de mi vida; son las personas a las que más admiro en este mundo.

A mi difunta mascota, Keisy, y a la que aún sigue conmigo, Keity, pues fueron ellas las que se quedaron a mi lado durante las incontables noches de trabajo, manteniendo, literalmente, mis pies y corazón calientitos, cuidándome.

A todos los profesores que no solo me enseñaron las bases de esta profesión, pues también me mostraron como ser una mejor persona.

A los compañeros con los que formé una gran amistad durante la carrera, por ser grandes personas de las que aprendí a convivir, madurar, a ser el soporte y apoyo de otra persona, que me ayudaron cuando lo necesité, no solo académicamente hablando, y quienes me enseñaron a tener una actitud positiva ante cualquier circunstancia, les deseo lo mejor y mucho éxito en sus vidas, gracias por todo.

---

---

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| ÍNDICE .....   | 1  |
| ÍNDICE DE TABLAS .....   | 4  |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....  | 5  |
| RESUMEN .....  | 7  |
| ABSTRACT .....   | 8  |
| CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO .....  | 10 |
| I.I INTRODUCCIÓN .....   | 10 |
| I.II FUNDAMENTO TEÓRICO .....  | 11 |
| I.II.1 Biocombustible .....  | 11 |
| I.II.2 Biodiesel .....   | 12 |
| I.II.3 Transesterificación .....   | 14 |
| I.II.4 Aceite de palma .....   | 16 |
| I.II.5 Normas sobre las propiedades del biodiesel .....                                  | 19 |
| I.III ANTECEDENTES .....   | 20 |
| I.III.1 Biodiesel producido por transesterificación catalítica .....                     | 20 |
| I.III.2 Catalizadores usados en la producción de biodiesel por transesterificación ..... | 21 |
| I.III.3 Carbón activado como soporte para catalizadores .....                            | 22 |
| I.IV PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....  | 25 |
| I.V JUSTIFICACIÓN .....  | 26 |
| I.VI OBJETIVOS .....   | 26 |
| I.IV.1 Objetivo general .....  | 26 |
| I.IV.2 Objetivos específicos .....   | 26 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....</b>                              | <b>28</b> |
| <b>II.I SÍNTESIS DE LOS CATALIZADORES Mo/CA Y NiMo/CA .....</b>   | <b>28</b> |
| <b>II.II CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA.....</b>                    | <b>29</b> |
| II.II.1 Difracción de Rayos X (DRX) .....                         | 29        |
| II.II.2 Propiedades texturales por Fisorción N <sub>2</sub> ..... | 30        |
| II.II.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM) .....            | 31        |
| <b>II.III EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD CATALÍTICA.....</b>          | <b>32</b> |
| II.III.1 Reacción de transesterificación .....                    | 32        |
| II.III.2 Cromatografía de gases .....                             | 34        |
| <b>II.IV CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DEL BODIESEL .....</b>      | <b>35</b> |
| II.IV.1 Densidad .....  | 35        |
| II.IV.2 Viscosidad .....  | 35        |
| II.IV.3 Poder calorífico .....                                    | 36        |
| <b>CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>               | <b>39</b> |
| <b>III.I CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA.....</b>                    | <b>39</b> |
| III.I.1 Difracción de rayos X (DRX) .....                         | 39        |
| III.I.2 Propiedades texturales por fisorción N <sub>2</sub> ..... | 40        |
| III.I.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB) .....            | 43        |
| III.II.1 Rendimiento de reacción de transesterificación .....     | 47        |
| III.II.2 Cromatografía de gases .....                             | 48        |
| <b>III.III CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DEL BODIESEL .....</b>    | <b>50</b> |
| III.III.1 Densidad.....   | 50        |
| III.III.2 Viscosidad.....   | 51        |
| III.III.3 Poder calorífico.....                                   | 53        |
| <b>CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES.....</b>                             | <b>55</b> |

---

---

|   |    |
|---|----|
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 56 |
| ANEXOS .....  | 65 |
| A.I CLASIFICACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN-DESORCIÓN ..... | 65 |
| A.II CICLO DE HISTÉRESIS .....                                  | 67 |

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1</b> Composición y propiedades del biodiesel y diésel (Elgharbawy y otros, 2021; Sakthivel y otros, 2018).....  | 13 |
| <b>Tabla 2</b> Ventajas y desventajas de la transesterificación catalítica (enzimática y no enzimática) y transesterificación no catalítica (supercrítica) (M.A. & S., 2017)..... | 15 |
| <b>Tabla 3</b> Composición del aceite de palma, palmiste y sus fracciones (Gesterio y otros, 2018).....   | 17 |
| <b>Tabla 4</b> Propiedades del biodiesel según las normativas ASTM D6751 y EN 14214 (Elgharbawy y otros, 2021; Sakthivel y otros, 2018) .....                                     | 19 |
| <b>Tabla 5</b> Ejemplos de catalizadores usados en la producción de biodiesel (Cabello y otros, 2017).....  | 21 |
| <b>Tabla 6</b> Nomenclatura de los materiales sintetizados.....   | 28 |
| <b>Tabla 7</b> Propiedades texturales de los carbones activados CA1 y CA2 y del reportado por Somyanonthanakun y colaboradores (60).....  | 40 |
| <b>Tabla 8</b> Composición porcentual de Mo y Ni de los catalizadores sintetizados .....  | 45 |
| <b>Tabla 9</b> Tiempo de retención de los componentes identificados por cromatografía de gases.....   | 48 |
| <b>Tabla 10</b> Densidad del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados calculado a 15°C .....   | 51 |
| <b>Tabla 11</b> Viscosidad cinemática del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados calculada a 40°C .....  | 52 |
| <b>Tabla 12</b> Poder calorífico del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados ....   | 53 |

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> Reacción de transesterificación (M.A. & S., 2017) .....  | 16 |
| <b>Figura 2</b> Fruta y semilla de palma aceitera (SAGARPA, 2017) .....  | 16 |
| <b>Figura 3</b> Gráfico del consumo-producción internacional de aceite de palma (SAGARPA, 2017) .....  | 18 |
| <b>Figura 4</b> Difractómetro de Rayos-X (Servicio Geológico Mexicano, 2017).....  | 30 |
| <b>Figura 5</b> Equipo AUTOSORB-iQ-XR-2 para fisisorción N <sub>2</sub> (Universidad de Alicante, 2022) .....  | 30 |
| <b>Figura 6</b> Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, FEI Quanta 250 FEG (Rosas Saito, 2017) .....                                   | 31 |
| <b>Figura 7</b> Reacción de transesterificación (M.A. & S., 2017) .....  | 32 |
| <b>Figura 8</b> Parte del equipo montado para la reacción de transesterificación .....   | 33 |
| <b>Figura 9</b> Equipo montado para la reacción de transesterificación .....   | 33 |
| <b>Figura 10</b> Producto de la reacción de transesterificación .....  | 33 |
| <b>Figura 11</b> Separación de fases: izquierda, aceite sin reacción y biodiesel; derecha, biodiesel y glicerol .....                                  | 33 |
| <b>Figura 12</b> Biodiesel obtenido, embotellado y etiquetado según su origen.....   | 33 |
| <b>Figura 13</b> Cromatógrafo de gases Thermo Scientific TRAC 1310.....  | 34 |
| <b>Figura 14</b> Densímetro Anton Paar DMA 4500 M .....  | 35 |
| <b>Figura 15</b> Viscosímetro Anton Paar SVM 4001 .....  | 36 |
| <b>Figura 16</b> Equipo para medir calorimetría marca KL modelo LRY-900-1 .....  | 36 |
| <b>Figura 17</b> Material necesario usado para medir la calorimetría del biodiesel obtenido  | 37 |
| <b>Figura 18</b> Difractogramas de los catalizadores sintetizados: Mo/CA1, Mo/CA2, NiMo/CA1 y NiMo/CA2; y de MoO <sub>3</sub> (ISCD 01-089-7112) ..... | 39 |
| <b>Figura 19</b> Isotherma de adsorción-desorción de N <sub>2</sub> del soporte CA1 .....  | 41 |
| <b>Figura 20</b> Isotherma de adsorción-desorción de N <sub>2</sub> del soporte CA2.....   | 42 |
| <b>Figura 21</b> Micrografías MEB representativas de los catalizadores sintetizados .....  | 43 |
| <b>Figura 22</b> Espectros EDS del análisis elemental de los catalizadores sintetizados .....  | 44 |
| <b>Figura 23</b> Mapeo EDS de los catalizadores A) Mo/CA1 y B) Mo/CA2 a 100 µm.....  | 45 |
| <b>Figura 24</b> Mapeo EDS de los catalizadores A) NiMo/CA1 y B) NiMo/CA2 a 100 µm ...   | 46 |

---



---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 25</b> Reacción de transesterificación (M.A. & S., 2017) .....  | 47 |
| <b>Figura 26</b> Rendimiento obtenido con los catalizadores Mo y NiMo en la transesterificación del aceite de palma .....   | 48 |
| <b>Figura 27</b> Cromatograma CG representativo del biodiesel obtenido .....  | 49 |
| <b>Figura 28</b> Gráfico de la densidad del biodiesel obtenido en función de la temperatura ajustada linealmente .....      | 50 |
| <b>Figura 29</b> Gráfica de la viscosidad cinemática del biodiesel en función de la temperatura con ajuste polinomial ..... | 52 |
| <b>Figura 30</b> Representación esquemática de los seis tipos de isotermas de adsorción (Sing y otros, 1985) .....          | 66 |
| <b>Figura 31</b> Representación esquemática de los tipos de histéresis (Sing y otros, 1985) .....                           | 67 |

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

---

---

## RESUMEN

Una de las vías para poder disminuir la dependencia que se tiene actualmente de los combustibles fósiles es la generación de combustibles sostenibles a través de procesos ambientalmente más amigables, como la transesterificación. En este proceso se usan aceites de origen vegetal o animal que reaccionan con un alcohol de cadena corta en presencia de un catalizador, que generalmente es heterogéneo por la relativa facilidad de separación del catalizador y la eliminación de desechos.

En esta Tesis se evaluó el efecto de níquel (Ni) y molibdeno (Mo) en la transesterificación de aceite de palma con metanol para la obtención de biodiesel, usando carbón activado (CA) como soporte de los catalizadores. Se sintetizaron catalizadores de Mo, así como de NiMo, usando carbón activado obtenido de bagazo de caña activados con  $\text{HNO}_3$  y posteriormente por pirólisis a  $550^\circ\text{C}$  y  $650^\circ\text{C}$ , se emplearon ambos carbones como soporte. Los catalizadores de Mo se sintetizaron con un contenido de 15% p/p, mientras que los catalizadores NiMo se sintetizaron con un contenido de 15% p/p de Mo y 3% p/p de Ni. Los soportes y los catalizadores se caracterizaron fisicoquímicamente mediante técnicas de fisisorción de  $\text{N}_2$ , difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. El rendimiento de reacción se evaluó después de la reacción de transesterificación con tres tiempos de reacción: dos, tres y cuatro horas a  $60^\circ\text{C}$ . Se tomaron muestras cada 60 minutos y se analizaron su densidad, viscosidad y poder calorífico como propiedades fisicoquímicas.

El catalizador con mayor rendimiento en la transesterificación del aceite de palma correspondió al catalizador NiMo soportado en el carbón activado a  $550^\circ\text{C}$  durante un tiempo de reacción de dos horas y éste fue de 48%. Los resultados de la difracción de rayos X mostraron una baja dispersión de los metales en el soporte, lo que originó pocos sitios activos catalíticos, debido principalmente a la abaja área superficial de los carbones activados, lo cual disminuyó la actividad de los catalizadores y por ende el rendimiento y la calidad del biodiesel obtenido. Esto último se pudo observar en sus propiedades fisicoquímicas, cuyos valores fueron menores a lo indicado por la ASTM D6175.

*Catalizadores, carbón activado, biodiesel, transesterificación. aceite de palma.*

---

---

## ABSTRACT

One of the ways to reduce the current dependence on fossil fuels is the generation of sustainable fuels through more environmentally friendly processes, such as transesterification. In this process, oils of vegetable or animal origin react with a short-chain alcohol in the presence of a catalyst, which is generally heterogeneous due to the relative ease of catalyst separation and waste removal.

In this thesis, the effect of nickel (Ni) and molybdenum (Mo) on the transesterification of palm oil with methanol for biodiesel production was evaluated, using activated carbon (AC) as the support for the catalysts. Mo catalysts, as well as NiMo catalysts, were synthesized using activated carbon derived from sugarcane bagasse activated with  $\text{HNO}_3$  and subsequently pyrolyzed at  $550^\circ\text{C}$  and  $650^\circ\text{C}$ ; both carbons were employed as supports. The Mo catalysts were synthesized with a 15% w/w content, while the NiMo catalysts were synthesized with a 15% w/w content of Mo and 3% w/w of Ni. The supports and catalysts were characterized physicochemically using techniques such as  $\text{N}_2$  physisorption, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy. The reaction yield was evaluated after the transesterification reaction with three reaction times: two, three, and four hours at  $60^\circ\text{C}$ . Samples were taken every 60 minutes and their density, viscosity, and heating value were analyzed as physicochemical properties.

The catalyst with the highest yield in the transesterification of palm oil was the NiMo catalyst supported on activated carbon at  $550^\circ\text{C}$  for a reaction time of two hours, yielding 48%. X-ray diffraction results showed a low dispersion of the metals on the support, resulting in few active catalytic sites due to the low surface area of the activated carbons, which decreased the activity of the catalysts and consequently reduced the yield and quality of the biodiesel produced. This was evident in its physicochemical properties, whose values were lower than those specified by ASTM D6175.

*Catalyst, activated carbon, biodiesel, transesterification, palm oil.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

**CAPÍTULO I**  
**MARCO TEÓRICO**

---

---

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

### I.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, el uso de combustibles fósiles ha provocado una escasez de energía y grandes emisiones de efecto invernadero, lo que es un tema de gran relevancia para la humanidad, dado que involucra preocupaciones económicas, políticas y, por supuesto, ambientales (Horacio Catalán, 2021). Para poder reducir la dependencia que se ha producido de dichos combustibles a lo largo del tiempo, se ha optado por la generación de combustibles sostenibles, renovables y más limpios, como el biodiesel.

La producción de biodiesel se da a través de un proceso de transesterificación, que es la reacción de un aceite no comestible con un alcohol, de cadena corta por su bajo costo y disponibilidad (G. y otros, 2019), en presencia o no de un catalizador. En este proceso, los triacilglicéridos de la materia prima se transforman en ésteres alquilo y glicerol como subproducto (Bardhan y otros, 2022; Vilas Bôas & Mendes, 2022).

La reacción de transesterificación puede ser catalítica o no catalítica. Debido a que la no catalítica es demasiado lenta, se requiere de la implementación de un catalizador eficiente que, basados en diferentes investigaciones, ya sea por la relativa facilidad de separación del catalizador y la eliminación de desechos, son generalmente heterogéneos (Maleki y otros, 2022; Nasreen y otros, 2018).

Por su bajo precio, los metales como cobalto (Co), molibdeno (Mo), hierro (Fe) y níquel (Ni) pueden ser usados como catalizadores alternativos (Hongloi y otros, 2019), aunque también pueden usarse tungsteno (W), platino (Pt), paladio (Pd) y rutenio (Ru), pero son más caros (Kumar y otros, 2019). Dado que la combinación de Mo o W y Co o Ni en los catalizadores aumenta la actividad catalítica, se han hecho diversas investigaciones para la obtención de biodiesel usando catalizadores como NiW, NiMo, NiMoW con diversos soportes, como Zr-SBA-15, alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), así como carbón activado, dado que su superficie es inerte y por la distribución de sus poros (Balboa Palomino, 2018; Vázquez Garrido y otros, 2021; Iwanow M. y otros, 2020).

---

---

## I.II FUNDAMENTO TEÓRICO

### I.II.1 Biocombustible

Los biocombustibles pueden ser producidos a través de diferentes procesos y de diferente materia prima (productos de la agricultura o de la digestión anaeróbica), excluyendo los procesos geológicos como la producción de combustibles fósiles (Datta y otros, 2019).

Existen diferentes tipos de biocombustibles, clasificados dependiendo la materia prima requerida, principalmente, nombrados como de: *primera generación*, *segunda generación*, *tercera generación* y *cuarta generación*.

Los biocombustibles de primera generación son producidos principalmente por la acción de microorganismos y enzimas al fermentarse el azúcar, almidón o aceite vegetal, cultivos oleaginosos e incluso, aunque en menor cantidad, grasas animales. Ejemplos de éstos son etanol, propanol y butanol, producidos a base de caña de azúcar, remolacha azucarera, sorgo, maíz, trigo, cebada, aceite de girasol o aceite de canola. En la actualidad, la producción de estos biocombustibles genera preocupación debido a que amenaza el suministro de alimentos y a la biodiversidad por su constante requerimiento de tierra cultivable (Datta y otros, 2019; Dahman y otros, 2019; Moodley, 2021).

Los de segunda generación también usan materia prima renovable, aunque con una producción más sostenible, dado que dicha materia prima es material lignocelulósico de la biomasa no comestible de las plantas, es decir, lo que no es requerido en la alimentación humana, como desechos agrícolas, desechos orgánicos, sauces, pasto varilla, alpiste, madera, etc. El etanol de lignocelulosa, el diésel BTL (biomasa-to-liquid), el biobutanol y el gas natural biosintético (Bio-SNG) son ejemplos de biocombustibles de segunda generación. Una de las características de este biocombustible es que no se produce de manera comercial actualmente (Datta y otros, 2019; Alalwan y otros, 2019).

Los biocombustibles de tercera generación se producen tomando como materia prima macroalgas o microalgas, dependiendo del tamaño y morfología del alga que se

---

---

seleccione, aunque las más prometedoras para producción de biodiesel son las microalgas. Las algas producen una mayor cantidad de energía con respecto a los cultivos terrestres y solo necesitan CO<sub>2</sub>, nutrientes, agua y luz solar para crecer; sin embargo, su producción enfrenta dificultades durante la mezcla de algas que, si se hace de forma incorrecta, puede modificar el crecimiento de la biomasa (Datta y otros, 2019; Alalwan y otros, 2019; Dahman y otros, 2019).

El biocombustible de cuarta generación no presenta ningún conflicto entre los alimentos y la energía, como la producida por los de primera y segunda generación. Se generan a partir de microorganismos modificados genéticamente, como microalgas, levaduras, hongos y cianobacterias, así como de procesos como la pirólisis y gasificación, que aún se encuentran en desarrollo. Sin embargo, el alto costo inicial para el cultivo de microalgas es una desventaja de la producción de este tipo de biocombustible (Adbullah y otros, 2019; Alalwan y otros, 2019).

### **I.II.2 Biodiesel**

El biodiesel se compone de ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga generado a partir de aceites vegetales renovables o grasas animales, comestibles, no comestibles y usados, producido por un proceso químico llamado transesterificación usando metanol y un catalizador, según la ASTM International (Vilas Bôas & Mendes, 2022; Singh y otros, 2020).

Como se mencionó anteriormente, las fuentes de obtención de materia prima pueden ser vegetales comestibles, como los aceites de soja, cacahuete, girasol, aceituna, linaza de palma, coco, maní, salvado de arroz, o fuentes vegetales no comestibles, como los aceites de colza, jatropha, jojoba, tabaco, ricino, de semilla de albaricoque, aceite de pescado, la moringa olifera, el dáttil del desierto, aceite de cocina usado, en el caso de biodiesel de primera generación (Rizwanul Fattah y otros, 2020; Singh y otros, 2020; Elgharbawy y otros, 2021; Alalwan y otros, 2019). Además de metanol también pueden ser usados etanol, butanol, isopropanol y otros alcoholes, aunque generalmente se usando los dos primero debido a su bajo costo. El biodiesel de segunda generación

puede usar como materia prima cultivos energéticos, al igual que el de primera generación, restos agrícolas y residuos de madera, grasas animales y manteca de cerdo. El principal problema con este tipo de biodiesel es que aún no se han encontrado tecnologías para el aprovechamiento de los residuos de su producción. El biodiesel de tercera generación se genera con base en microalgas autótrofas y heterótrofas, con un rendimiento diferente dependiendo del tipo de especie de la microalga elegida (Alalwan y otros, 2019). El tipo de biodiesel obtenido depende de la materia prima elegida por su disponibilidad, la posición geográfica (buscando un lugar cálido) y la tradición agrícola del lugar (Datta y otros, 2019).

Además de la transesterificación, el biodiesel puede producirse a través de procesos como el hidrotratamiento, la desoxigenación, la mezcla directa de un aceite vegetal con diésel y pirólisis de microemulsiones de aceite vegetal; como ejemplo de producción de biodiesel se tiene al trabajo realizado por Hongloi et. al (2019) en el que usaron ácido palmítico como materia prima, dodecano como solvente y Ni/ZrO<sub>2</sub> y Ni/H-ZSM-5 como catalizadores para producir biodiesel a través de un proceso de desoxigenación con una conversión del 98.33% y 86.17%, respectivamente (Hongloi y otros, 2019; Alalwan y otros, 2019).

Las características fisicoquímicas del biodiesel son determinadas, principalmente, por los ésteres metílicos de ácidos grasos con respecto a su proporción, longitud de cadena de carbonos y grado de insaturación (Freire Ordóñez & Medrano Barboza, 2019). Una comparación de estas características entre el diésel y biodiesel se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Composición y propiedades del biodiesel y diésel (Elgharbawy y otros, 2021; Sakthivel y otros, 2018).

| Propiedad              | Unidades | Combustible diésel<br>ASTM D975                  | Biodiesel<br>ASTM D6571                  |
|------------------------|----------|--|--|
| Composición            |          | Hydrocarburo (C <sub>10</sub> -C <sub>21</sub> ) | FAMA (C <sub>12</sub> -C <sub>22</sub> ) |
| Contenido de oxígeno   | %        | 0  | 11                                       |
| Contenido de hidrógeno | %        | 13   | 12                                       |

| Propiedad                       | Unidades           | Combustible diésel | Biodiesel  |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|------------|
|                                 |                    | ASTM D975          | ASTM D6571 |
| Densidad (15 °C)                | kg/m <sup>3</sup>  | 820 - 860          | 860 - 900  |
| Viscosidad cinemática (40°C)    | mm <sup>2</sup> /s | 2 – 4.5            | 1.9 - 6    |
| Punto de inflamabilidad         | °C                 | 60 - 80            | 100 - 170  |
| Contenido de azufre (grado 10)  | ppm                | 10 max             | -          |
| Contenido de azufre (grado 15)  | ppm                | -                  | 150 max    |
| Contenido de azufre (grado 50)  | ppm                | 50 max             | -          |
| Contenido de azufre (grado 500) | ppm                | 500 max            | 500 max    |
| Valor calorífico                | MJ/kg              | 45                 | 37.3       |
| Número de cetano                | -                  | 46                 | 47 min     |

### I.II.3 Transesterificación

La transesterificación es uno de los procesos utilizados para la producción de biodiesel. Es una reacción de equilibrio en el que los triacilglicéridos son transformados con metanol o etanol en tres ésteres metílicos separados y glicerol liberado en la mezcla; es una reacción generalmente lenta, por lo que se requiere de un catalizador básico homogéneo (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, carbonatos, alcóxidos) por razones económicas. Sin embargo, los problemas generados por este tipo de catalizadores, como su difícil eliminación después de la reacción, gran producción de aguas residuales y la saponificación han provocado su reemplazo por catalizadores sólidos heterogéneos (Tongxin y otros, 2020; Castellar Ortega y otros, 2014). Este proceso puede ser catalítico o no catalítico (G. y otros, 2019). La Tabla 2 muestra las ventajas y desventajas de los tipos de transesterificación mencionadas anteriormente de manera detallada.

Tabla 2 Ventajas y desventajas de la transesterificación catalítica (enzimática y no enzimática) y transesterificación no catalítica (supercrítica) (M.A. & S., 2017).

| Tipo de transesterificación       | Ventajas  | Desventajas   |
|-----------------------------------|---|---|
| Catálisis química                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La condición de reacción se puede controlar bien</li> <li>- Producción a gran escala</li> <li>- El costo de producción barato</li> <li>- El metanol producido en el proceso se puede reciclar</li> <li>- Alta conversión de la producción</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La temperatura de reacción es relativamente alta y el proceso es complejo</li> <li>- El proceso de eliminación posterior es complejo</li> <li>- El proceso necesita mucha energía</li> <li>- Necesita una instalación para el reciclaje de metanol</li> <li>- Las aguas residuales contaminan el medio ambiente</li> </ul> |
| Catálisis enzimática              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Condición de reacción moderada</li> <li>- La pequeña cantidad de metanol requerida en la reacción</li> <li>- No tener contaminación al medio ambiente</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitación de la enzima en la conversión de cadena corta de ácidos grasos</li> <li>- Los productos químicos que existen en el proceso de producción son venenosos para las enzimas</li> </ul>  |
| Técnicas de fluidos supercríticos | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de controlar</li> <li>- Es seguro y rápido</li> <li>- Amigable con el medio ambiente</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La alta temperatura y la alta presión en la condición de reacción conducen a un alto costo de producción y desperdicio de energía</li> </ul>   |

En este caso, el proceso de transesterificación catalizada por un catalizador heterogéneo se observa en la Figura 1, cuya síntesis se menciona en la sección anterior.

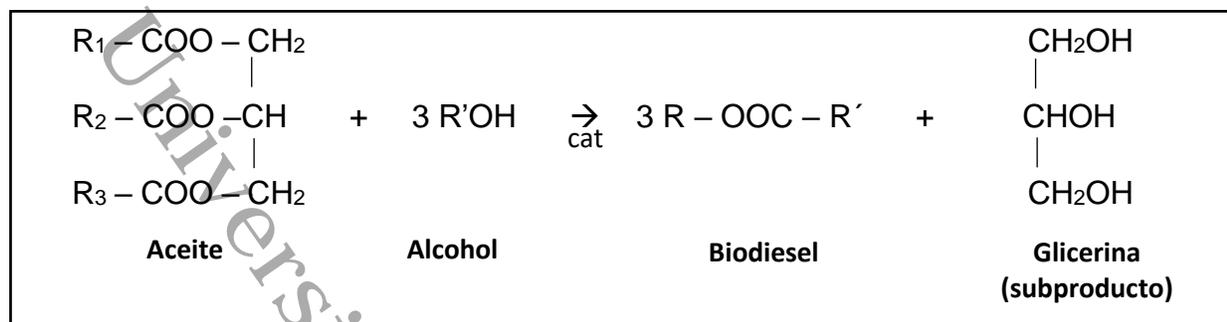


Figura 1 Reacción de transesterificación (M.A. & S., 2017)

#### I.II.4 Aceite de palma

El aceite de palma se deriva de las palmas de aceite, científicamente conocidas como *Elaeis guineensis*, predominante en África y Asia, que consta de dos especies de *Arecaceae* en la familia de las palmeras. El fruto de la palma aceitera, que se muestra en la Figura 2, tarda de cinco a seis meses en crecer desde la polinización hasta la madurez. Se compone por ácidos grasos saturados e insaturados casi en la misma proporción. Este aceite es apto para el consumo humano (Teuku Meurah y otros, 2019; Gesterio y otros, 2018).



Figura 2 Fruta y semilla de palma aceitera (SAGARPA, 2017)

Una de las características de este aceite es que es de un color rojo anaranjado brillante, debido a su alto contenido de caroteno. Posee una gran resistencia a la oxidación y también soporta la exposición a altas temperaturas durante un tiempo considerablemente largo. Contiene ácido palmítico, que es un tipo de ácido que se produce en el cuerpo humano, el ácido oleico monoinsaturado, el ácido linoleico poliinsaturado y el ácido esteárico, así como fracciones de otros ácidos grasos. La Tabla 3 indica la composición de los ácidos grasos de aceite de palma, palmiste y sus fracciones.

Tabla 3 Composición del aceite de palma, palmiste y sus fracciones (Gesterio y otros, 2018)

| Ácidos grasos              | AP    | APE   | OP    | OPE   | EPE   | EP    | SOP   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Caproico C6:0              | 0.00  | 0.76  | 0.00  | 0.68  | 0.19  | 0.00  | 0.00  |
| Caprílico C8:0             | 0.00  | 4.09  | 0.00  | 4.50  | 2.08  | 0.00  | 0.00  |
| Cáprico C10:0              | 0.00  | 3.61  | 0.00  | 3.52  | 2.73  | 0.00  | 0.00  |
| Láurico C12:0              | 0.45  | 47.53 | 0.28  | 42.42 | 54.07 | 0.30  | 0.30  |
| Mirístico C14:0            | 1.12  | 15.21 | 0.94  | 13.21 | 21.78 | 1.49  | 1.00  |
| Palmítico C16:0            | 38.84 | 7.84  | 38.41 | 8.22  | 8.08  | 60.46 | 34.62 |
| Estearico C20:0            | 4.25  | 1.90  | 4.01  | 2.30  | 1.94  | 4.91  | 3.66  |
| Araquídico C20:0           | 0.04  | 0.10  | 0.28  | 0.24  | 0.24  | 0.25  | 0.20  |
| Total AGS %                | 44.70 | 81.04 | 43.92 | 75.10 | 91.14 | 67.39 | 39.79 |
| Palmitoleico C16:1         | 4.25  | 1.90  | 4.01  | 2.30  | 1.94  | 0.10  | 0.25  |
| Oleico C18:1               | 35.79 | 14.73 | 40.43 | 19.08 | 5.86  | 25.52 | 46.41 |
| Eicosanoico C20:1          | 0.18  | 0.10  | 0.19  | 0.10  | 0.05  | 0.20  | 0.10  |
| Erúcico C22:1              | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| Total AGM %                | 40.22 | 16.73 | 44.63 | 21.48 | 7.84  | 25.82 | 46.76 |
| Linoleico C18:2            | 14.77 | 2.14  | 11.07 | 3.28  | 0.97  | 6.44  | 12.79 |
| $\alpha$ -linolénico C18:3 | 0.22  | 0.10  | 0.28  | 0.15  | 0.05  | 0.25  | 0.60  |
| Total AGP %                | 14.99 | 2.23  | 11.36 | 3.42  | 1.02  | 6.69  | 13.40 |

|             |       |       |       |       |      |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Total AGI % | 56.21 | 18.96 | 55.98 | 24.90 | 8.86 | 32.51 | 60.16 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|

AP: Aceite de palma; APE: Aceite de palmiste; OP: Oleína de palma; OPE: Oleína de palmiste; EPE: Estearina de palmiste; EP: Estearina de palma; SOP: Superoleína de palma; AGS: Ácidos grasos saturados; AGM: Ácidos grasos monoinsaturados; AGP: Ácidos grasos poliinsaturados; AGI: Ácidos grasos insaturados.

El refinado del aceite de palma consiste en el desgomado o separación de la goma, desacidificación, blanqueo y desodorización, generalmente durante un periodo corto de tiempo, después de ser separado de los árboles. La cantidad de aceite obtenido depende de la variante de la palmera y la edad del árbol seleccionado; generalmente, se obtiene entre un 25 y 28% de aceite de un racimo de palma (Teuku Meurah y otros, 2019; Nainggolan & Sofwan Sinaga, 2021).

Este aceite es usado en diversos productos industriales como aceites comestibles, mantequillas, mantecas, panificación, helados, detergentes, pinturas, cosméticos, lubricantes, biodiesel, etc. La industria alimenticia usa el aceite de palma, palmiste y sus fracciones en relación con la consistencia y relleno que le da cada uno de los aceites a un alimento.

En México, se han realizado estimaciones con datos del SIAP y SIAVI, sobre el consumo y producción de aceite de palma a nivel internacional hasta el año 2030, como lo señala la Figura 3.

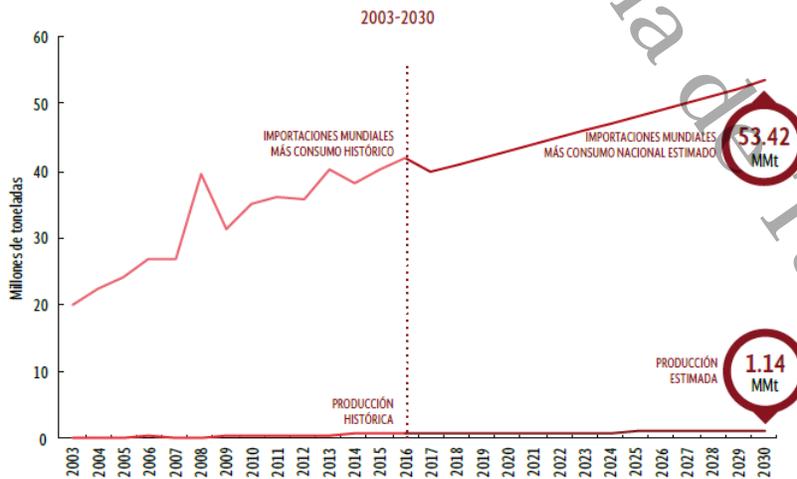


Figura 3 Gráfico del consumo-producción internacional de aceite de palma (SAGARPA, 2017)

### I.II.5 Normas sobre las propiedades del biodiesel

El biodiesel tiene una serie de estándares que rigen sus propiedades. A través de estos estándares se determina si una muestra de biodiesel producido es apropiada para su uso como biocombustible.

La Tabla 4 muestra una comparación de las propiedades que el biodiesel debe poseer, según las normativas de la ASTM (American Society for Testing and Materials) y Europa: ASTM D6571 y EN14214, respectivamente.

Tabla 4 Propiedades del biodiesel según las normativas ASTM D6751 y EN 14214 (Elgharbawy y otros, 2021; Sakthivel y otros, 2018)

| Propiedad                    | Unidades           | ASTM D6571 | EN 14214  |
|------------------------------|--------------------|------------|-----------|
| Densidad (15 °C)             | kg/m <sup>3</sup>  | 860 - 900  | 860 – 900 |
| Viscosidad cinemática (40°C) | mm <sup>2</sup> /s | 1.9 - 6    | 3.5 - 5   |
| Valor calorífico             | MJ/kg              | 37.3       | -         |
| Número de cetano             | -                  | 47 min     | 51 min    |
| Punto de inflamabilidad      | °C                 | 100 - 170  | 101 min   |
| Punto de enturbiamiento      | °C                 | -12 a -3   | -         |
| Punto de escurrimiento       | °C                 | -16 a -15  | -         |
| Punto de ebullición          | °C                 | 100 - 615  | -         |
| Número ácido                 | mg KOH /g          | 0.5 max    | 0.5 max   |
| Ácido graso libre            | %                  | 0.42 max   | 0.5 max   |
| Contenido de cenizas         | % m                | 0.02 max   | 0.02 max  |
| Azufre (grado 10)            | ppm                | -          | -         |

|                          |     |           |           |
|--------------------------|-----|-----------|-----------|
| Azufre (grado 15)        | ppm | 150 max   | -         |
| Azufre (grado 50)        | ppm | -         | -         |
| Azufre (grado 500)       | ppm | 500 max   | -         |
| Fósforo                  | % m | 0.001 max | 0.001 max |
| Glicerina                | % m | 0.24      | 0.25      |
| Estabilidad de oxidación |     | -         | 3 h min   |

### I.III ANTECEDENTES

#### I.II.1 Biodiesel producido por transesterificación catalítica

A lo largo del tiempo se han realizado diferentes investigaciones, tanto de campo como de simulación para la obtención de biocombustibles o biodiesel a través de diferentes métodos, usando diferentes tipos de catalizadores.

Marquínez y colaboradores produjeron biodiesel usando aceite de coco, metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) e hidróxido de sodio como catalizador a través de transesterificación, con lo que lograron un 92.31% de rendimiento (Marquínez Marquínez y otros, 2020). Por otro lado, Freire y Medrano, emplearon una planta piloto y la simulación usando aceite *Jatropha curcas*, metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) e hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) en una reacción de transesterificación en el que obtuvieron biodiesel y glicerol como subproducto, una conversión aproximada de 82-85%; además, realizaron una optimización del proceso modificando la temperatura de reacción y la relación molar de metanol-aceite, con lo que lograron un incremento de eficiencia de hasta el 91% (Freire Ordóñez & Medrano Barboza, 2019).

Otro autor realizó una comparación entre el biodiesel obtenido usando dos alcoholes por separado, tomando como materia prima aceite extraído con  $\text{CO}_2$  supercrítico de semilla

de mango, etanol e isopropanol, así como hidróxido de sodio (NaOH) como catalizador, en la que obtuvo un rendimiento de reacción del 87.94% y 68.45% usando isopropanol y metanol, respectivamente (Guzman Julio, 2019).

### I.II.2 Catalizadores usados en la producción de biodiesel por transesterificación

Los catalizadores usados en este proceso pueden ser homogéneos o heterogéneos, según su fase, y ácidos y básicos según su capacidad química. La Tabla 5 muestra algunos ejemplos de los catalizadores usados en la producción de biodiesel.

Tabla 5 Ejemplos de catalizadores usados en la producción de biodiesel (Cabello y otros, 2017)

| Tipo de catalizador |         | Ejemplos  |
|---------------------|---------|---|
| <b>Homogéneos</b>   | Ácidos  | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>  |
|                     | Básicos | KOH, NaOH   |
| <b>Heterogéneos</b> | Ácidos  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resinas de intercambio iónico como Amberlyst-15, Ambeerlyst-35, Nafion SAC-13.</li> <li>- ZrO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> impregnado con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> impregnado con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SBA-15-SO<sub>3</sub>H</li> <li>- Zeolita ZSM-5, zeolita tipo Y756, zeolita tipo Beta</li> <li>- Catalizadores a base de carbono sulfatado</li> <li>- Heteropoliácidos</li> </ul> |
|                     | Básicos | Zeolitas básicas y óxidos de metales alcalinotérreos, como CaO.   |
| <b>Enzimáticos</b>  | -       | Lipasas, Condida, Penicillium, Pseudomonas  |

Varios catalizadores han sido desarrollados y probados para el proceso de transesterificación y el craqueo de triglicéridos en un intento de mejorar las propiedades de los biocombustibles producidos con esas técnicas. La mayor parte de esos catalizadores mejoran el rendimiento de la conversión y reducen el tiempo de reacción. El uso de ciertos óxidos metálicos como MgO y Nb<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ha demostrado menores

---

---

rendimientos para el craqueo secundario y/o la reacción de transesterificación de aceites vegetales. Varios sólidos ácidos, como Titania sulfatada, poliestireno sulfonado, resinas Amberlyst<sup>®</sup>, Nafion, heteropoliácidos heterogéneos y óxidos de Nb también se han probado como catalizadores para la esterificación de ácidos grasos y la transesterificación de triglicéridos. Por otro lado, óxido de cadmio y ferrita de estaño muestran excelente actividad para producir ésteres metílicos de ácidos grasos (S. Brum y otros, 2022)

Otros autores realizaron una revisión sobre diferentes catalizadores usados en la producción de biodiesel a través de la transesterificación, como son NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KOH, KBr/Cao, nanocompuesto de óxido de zinc dopado con cobre, entre otros, con los que se han obtenido entre el 80% y el 98.6% de conversión (Singh y otros, 2020); también investigaron el uso de KF/KOH-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y CaO/KOH-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> como catalizadores para la producción de biodiesel, con una conversión del 96.8% y 92.2%, respectivamente (Farrokheh y otros, 2020); ZnO dopado con manganeso con una conversión del 97% (Baskar y otros, 2017) y ZnO dopado con cobalto con una conversión del 98.03% de biodiesel (Borah y otros, 2018).

### **I.II.3 Carbón activado como soporte para catalizadores**

Se puede definir al carbón activado como un carbón que se caracteriza por su capacidad de adsorción por sus pequeños poros. Este puede ser obtenido de diversas fuentes, como de los residuos de agricultura como paja, cáscara de arroz, bagazo, bambú, residuos de algodón, cáscaras de nuez, huesos de fruta, cáscaras de coco, residuos de café, mazorcas de maíz, residuos de palma aceitera, entre otros.

Se presenta como una opción conveniente como soporte de catalizadores metálicos por sus ventajas: su superficie es inerte, en especial en condiciones ácidas y básicas elevadas, la distribución de tamaño de poro (micro y mesoporos) y que sus propiedades químicas en su superficie pueden ajustarse dependiendo de la aplicación que se desee para él. Además, presentan resistencia a la formación de coque, que es uno de los principales agentes que desactivan a los catalizadores, y una actividad alta hidrogenante

---

---

(Iwanow M. y otros, 2020; Robles Andrade y otros, 2006). El carbón activado también se ha producido a partir de varios tipos de madera; por ejemplo, tamarindo, nogal y álamo.

Ejemplos de su uso como soportes para catalizadores se encuentra el trabajo realizado por Ruangudomsakul y colaboradores, en el que obtuvieron carbón activado a partir de madera de plomo por horno Iwasaki y horno tubular, lo que otorgó diferentes propiedades a los carbones activados obtenidos. La aplicación de CA como material de soporte podría mejorar la formación de fase pura de  $\text{Ni}_2\text{P}$ , que fue el catalizador utilizado; en este trabajo, también pusieron a prueba el rendimiento del catalizador  $\text{NiP/CA}$  en la producción de biodiesel por hidrodeshidrogenación, concluyendo que el CA como soporte para este tipo de proceso es muy bueno (Ruangudomsakul y otros, 2021).

Investigadores generaron carbón activado a partir de cáscara de palmiste a través de pirólisis al vacío con microondas, y lo usaron como soporte de un catalizador de Ni para la conversión de metano en productos gaseosos (monóxido de carbono e hidrógeno), la cual fue de hasta un 43%, que es alto, por lo que concluyeron que el carbón activado como soporte es un material prometedor (Liew y otros, 2018).

Otro trabajo involucra al carbón activado como soporte de un catalizador Mn-Ce-Fe, en la reducción catalítica selectiva de NO en el que se obtuvo una conversión de NO mayor al 90% a una temperatura de  $125^\circ\text{C}$ , lo que es un muy buen resultado, confirmando que el carbón activado es una buena opción como soporte de catalizadores (Yang y otros, 2020).

Tapia y colaboradores produjeron biodiesel mediante el hidrotreatmento de aceite de Jathropa, usando catalizadores NiMo soportados en carbón activado; dicho catalizador mostró un rendimiento del 99.7% en la producción de biodiesel, aunque comparado con el rendimiento similar de un catalizador NiMo soportado en alúmina, éste no presenta en efecto significativo en la reacción de hidrotreatmento (Tapia y otros, 2017).

Se han realizado investigaciones sobre los posibles catalizadores y soportes de los mismos que proporcionen mejores resultados en la producción de biodiesel por transesterificación y uno de dichos soportes es el carbón activado.

---

---

Ejemplos de estas investigaciones son las realizadas por Narowska y colaboradores, en la que recopilaron información sobre el uso del catalizador KOH/CA en diferentes cantidades y su porcentaje de rendimiento, que va desde el 53.03% al 96.5% en la generación de biodiesel mediante transesterificación utilizando de aceite de maíz y metanol como alcohol (Narowska y otros, 2019).

Por otro lado, se generó biodiesel por transesterificación de una mezcla de aceites no comestibles usando un catalizador de litio soportado en carbón activado (LiOH/CA) en el que obtuvieron un rendimiento mayor al 91% en condiciones de reacción relativamente suaves, obteniendo un biodiesel de alta calidad según especificaciones ASTM y EN (Ayoob & Fadhil, 2019).

Gonzáles y colaborador obtuvieron carbón activado a partir de bagazo de caña, y elaboraron monolitos de carbón activado con la finalidad de reducir los contaminantes presentes en aguas residuales, obteniendo buenos resultados para los monolitos activados con  $H_3PO_4$  en la caracterización fisicoquímica y en la evaluación en la adsorción de contaminantes, en la que se obtuvieron valores que se encuentran dentro de los rangos máximos permisibles que indican las Normas Oficiales Mexicanas (González Jiménez & Morales Hernández, 2019).

---

---

## I.IV PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El requerimiento de combustible para generar calor, electricidad o movimiento ha incrementado con el paso del tiempo. Los combustibles fósiles son los más demandados, a pesar de ser los que más provocan grandes emisiones de contaminantes, cuya producción requiere de materias primas no renovables que, a mediano o largo plazo, se agotarán; por esto, se considera que este tipo de combustibles preocupa económica, política y ambientalmente al planeta.

Con este problema en mente, el hombre ha tomado la decisión de buscar alternativas de combustibles que sean amigables con el ambiente, tomando como base recursos renovables o de desecho, como aceites de coco, cacahuate, soja, colza, palma, aceite de cocina usado, etc. Dentro de estos combustibles amigables se encuentra el biodiesel producido por transesterificación.

Para este proceso, se requiere de ciertos catalizadores para agilizar la reacción; los catalizadores químicos representan una buena elección debido a su rápida recuperación, en comparación con los heterogéneos; el requerimiento de menor energía (para mantener altas presiones y temperaturas) si se les compara con los fluidos supercríticos y menor envenenamiento que los enzimáticos. El carbón activado modificado se usa como soporte alternativo de catalizadores en la transesterificación; presenta estabilidad térmica, porosidad y naturaleza química superficial adecuadas para el proceso, además de que puede recuperarse y reutilizarse, ya que elimina la formación de jabones y aumenta la pureza del glicerol.

En este proyecto se evaluó la actividad de los catalizadores de NiMo soportados en carbón activado de bagazo de caña en la obtención de biodiesel por medio de la transesterificación del aceite de palma.

---

---

## I.V JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de tesis se justifica en virtud de la importancia de búsqueda de catalizadores que sean más activos y que cubran la necesidad de disminuir la carga ambiental y racionalizar los recursos energéticos durante su producción y aplicación, en este caso, para la obtención de biodiesel a través de transesterificación de aceite de palma. Además de esto, se busca utilizar un soporte que sea reutilizable y que no fomente la formación de jabones, como lo es el carbón activado. Los catalizadores NiMo soportados en carbón activado son una gran alternativa debido a su elevada área superficial específica, resistencia a medios ácidos y básicos y recuperación de fase activa.

## I.VI OBJETIVOS

### I.IV.1 Objetivo general

Evaluar la actividad de los catalizadores NiMo soportados en carbón activado de bagazo de caña (NiMo/CA) en la reacción de transesterificación del aceite de palma

### I.IV.2 Objetivos específicos

- 1) Sintetizar los catalizadores NiMo soportados en carbón activado con las propiedades texturales y morfológicas adecuadas para transesterificación
- 1) Evaluar el efecto del carbón activado sobre la distribución de las especies de Ni y Mo en fase óxido en la superficie de los catalizadores
- 2) Determinar las condiciones óptimas para la reacción de transesterificación del aceite de palma con catalizadores NiMo/CA

---

---

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

**CAPÍTULO II**  
**METODOLOGÍA**

---

---

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo de tesis constó de cinco etapas: Síntesis de materia prima, caracterización fisicoquímica de los catalizadores, reacción de transesterificación, evaluación catalítica y caracterización fisicoquímica del producto obtenido.

### II.I SÍNTESIS DE LOS CATALIZADORES Mo/CA Y NiMo/CA

El soporte empleado fue carbón activado proveniente bagazo de caña, éste se sintetizó previamente por el método de activación química con HNO<sub>3</sub> 3.5 M durante 24 horas y posteriormente por pirólisis a 550 y 650 °C en el trabajo reportado por González y Morales (González Jiménez & Morales Hernández, 2019). En esta Tesis se emplearon ambos carbones activados como soportes y se nombraron CA1 y CA2, al calcinado a 550°C y 650°C, respectivamente.

Los carbones activados se impregnaron con soluciones acuosas de heptamolibdato de amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O (J.T. Baker, 81%) y nitrato de níquel (Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) (Sigma-Aldrich, ≥97%). Éstos se prepararon por co-impregnación húmeda con un contenido de 15 % p/p de Mo y tomando en cuenta una relación molar  $\frac{Ni}{Ni+Mo} = 0.3$ , aproximadamente el 3% p/p. Los sólidos obtenidos se secaron a 120°C durante 12 horas y se calcinaron a 400°C durante 4 horas. La nomenclatura que se empleó para identificar a los materiales sintetizados se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Nomenclatura de los materiales sintetizados

| Catalizador | Contenido de Mo | Contenido de Ni |
|-------------|-----------------|-----------------|
| Mo/CA1      | 15 %            | -               |
| Mo/CA2      | 15 %            | -               |
| NiMo/CA1    | 15 %            | 3 %             |
| NiMo/CA2    | 15%             | 3 %             |

---

---

## II.II CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

La caracterización fisicoquímica implica el estudio de la estructura morfológica, textura y química superficial de diferentes materiales. En esta sección se mencionan las técnicas de caracterización de los catalizadores sintetizados en el presente trabajo de tesis.

### II.II.1 Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) proporciona información sobre la composición química para el análisis elemental y para el análisis de fase (estructura cristalográfica), para las mediciones de tensión y para análisis de textura de los materiales y las películas delgadas.

Esta técnica se basa en la interferencia constructiva de rayos X monocromáticos y una muestra. Los rayos X se generan utilizando un tubo de rayos catódicos, se filtran para generar radiación monocromática, se coliman para concentrar la radiación y se dirigen hacia la muestra. La interacción de los rayos incidentes con la muestra produce interferencia constructiva (y un rayo difractado) cuando las condiciones cumplen la ley de Bragg, que relaciona la longitud de onda de la radiación electromagnética con el ángulo de difracción y el espaciado de la red en una muestra cristalina, mostrada en la ecuación 1:

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $n$  es un número entero,  $\lambda$  es la longitud de onda característica de los haces de rayos X que inciden sobre la muestra cristalizada (Å),  $d$  es el espacio interplanar entre las filas de átomos definido por medio de los índices de Miller (Å) y  $\theta$  es el ángulo de los haces de rayos X (Nasrollahzadeh y otros, 2019). Las muestras se caracterizaron en un equipo Bruker modelo D8 Advance.

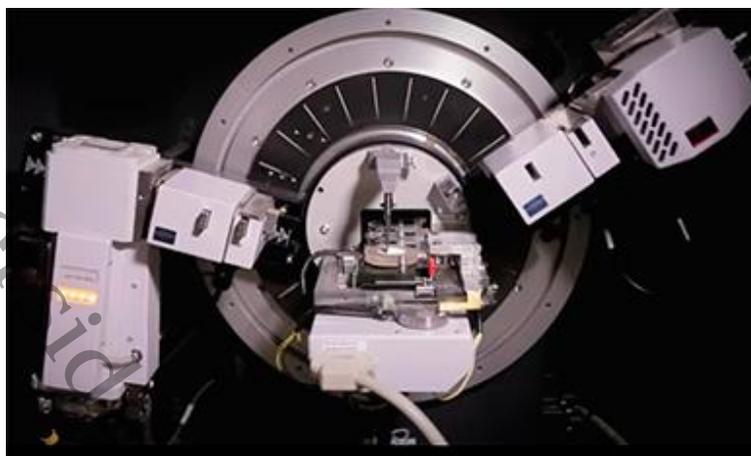


Figura 4 Difractómetro de Rayos-X (Servicio Geológico Mexicano, 2017)

### II.II.2 Propiedades texturales por Fisisorción N<sub>2</sub>

La fisisorción de una fase de fluido puro ocurre cuando las fuerzas de atracción intermoleculares entre el adsorbente y las moléculas de fluido puro (soluto) son mayores que las que existen entre las moléculas de soluto mismas (Erkey & Türk, 2021). Esta técnica proporcionará información sobre las propiedades texturales de los sólidos sintetizados. En esta tesis se empleó un equipo AUTOSORB-iQ-XR-2.



Figura 5 Equipo AUTOSORB-iQ-XR-2 para fisisorción N<sub>2</sub> (Universidad de Alicante, 2022)

---

---

### II.II.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) o análisis SEM es una de las técnicas de microscopía electrónica de alta resolución que proporciona información (imágenes de alta resolución) sobre una amplia gama de nanomateriales al escanear su superficie con un haz de electrones de alta energía en un patrón de barrido de trama en una escala muy fina, controlando su tamaño, la distribución del tamaño, su formación y su morfología (TWI, 2022; Ganjali & Vahdatkhah, 2018; Yan, 2019). El haz de electrones primario, que se produce en condiciones de alto vacío, se escanea a través de la superficie de una muestra; cuando los electrones golpean la muestra, una variación de la señal produce una imagen de la superficie, o su composición elemental junto con rayos X de dispersión de energía (EDX) (Yan, 2019).

La Figura 6 muestra uno de los equipos usados para la microscopía electrónica de barrido, para la caracterización de las muestras se empleó un equipo FEI Quanta 250 FEG.



Figura 6 Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, FEI Quanta 250 FEG (Rosas Saito, 2017)

## II.III EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD CATALÍTICA

La evaluación catalítica se realizó a través del proceso de transesterificación que, como ya se mencionó en la sección de marco teórico, es el proceso por el que un aceite se transforma en biodiesel en presencia de un alcohol de cadena corta y un catalizador.

### II.III.1 Reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación, en este trabajo, es la reacción del éster presente en el aceite de palma con metanol en presencia de los catalizadores Mo o NiMo sintetizados previamente, para producir biodiesel y glicerol como subproducto. La Figura 7 muestra de manera general dicha reacción.

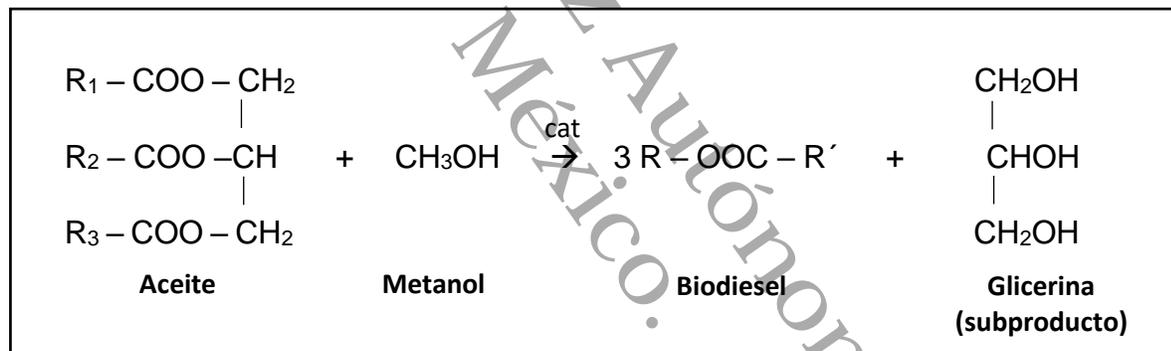


Figura 7 Reacción de transesterificación (M.A. & S., 2017)

La reacción se llevó a cabo con las siguientes condiciones: se emplearon metanol (Meyer,  $\geq 99.8\%$ ) y aceite de palma crudo (Abreiko, grado cosmético) en la mezcla de reacción con una relación 6:1 y el catalizador en una proporción de 0.5 % p/p con respecto a la cantidad de aceite. La mezcla se mantuvo a reflujo a  $60^\circ\text{C}$ , 1 atm de presión, con tiempos de 2, 3 y 4 horas de reacción.

Posterior a la reacción, el producto se mantuvo en reposo durante 24 horas para la separación completa de las fases, es decir, el biodiesel y la glicerina obtenidos.

Las Figuras 8 y 9 muestran el equipo usado para la reacción de transesterificación.



Figura 8 Parte del equipo montado para la reacción de transesterificación



Figura 9 Equipo montado para la reacción de transesterificación

Las Figuras 10 a 12 muestran el proceso de separación de fases del producto obtenido de la transesterificación, así como el biodiesel ya separado y enfrascado.



Figura 10 Producto de la reacción de transesterificación



Figura 11 Separación de fases: izquierda, aceite sin reacción y biodiesel; derecha, biodiesel y glicerol



Figura 12 Biodiesel obtenido, embotellado y etiquetado según su origen

---

---

### II.III.2 Cromatografía de gases

La cromatografía de gases separa y detecta los componentes químicos de una mezcla de sustancias volátiles o semivolátiles, identificando la presencia o ausencia de dichos componentes (Aydogan, 2020).

En esta técnica existen dos fases: *estacionaria*, que consiste de columnas empacadas y *móvil*, que es un gas inerte como helio, argón o nitrógeno que arrastra la mezcla de sustancias a través de la fase estacionaria. La separación de los compuestos en la mezcla se basa en las diferencias en la fuerza con la cual éstos interactúan con la fase estacionaria (Saynes Santillán & Ramírez Bribiesca, 2018).

La caracterización de las muestras se llevó a cabo en un equipo Thermo Scientific TRAC 1310, mostrado en la Figura 13.



Figura 13 Cromatógrafo de gases Thermo Scientific TRAC 1310

---

---

## II.IV CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BIODIESEL

El análisis de las propiedades fisicoquímicas del biodiesel se llevó a cabo por medio de la evaluación de su densidad, viscosidad y poder calorífico.

### II.IV.1 Densidad

La densidad es una de las propiedades físicas más importantes y fáciles de medir de la materia. Es usada para caracterizar y estimar la composición de muchos tipos de mezclas. Es importante en un combustible debido a su implicación en la combustión. Según los estándares ASTM D6751 y EN14214, la densidad puede estar entre  $820 \text{ kg/m}^3$  y  $845 \text{ kg/m}^3$  y  $860 \text{ kg/m}^3$  y  $900 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente para biodiesel estándar (García Muentes y otros, 2018).

La densidad del biodiesel se midió en un densímetro Anton Paar DMA 4500 M, mostrado en la Figura 14.



Figura 14 Densímetro Anton Paar DMA 4500 M

### II.IV.2 Viscosidad

Se conoce como viscosidad cinemática a la resistencia de un líquido a fluir y es otra de las características importantes de un combustible. En el biodiesel, de acuerdo con los estándares ASTM D6751 y EN14214, la viscosidad podría estar entre  $1.9$  y  $6 \text{ mm}^2/\text{s}$  y  $3.5$ - $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ , respectivamente (García Muentes y otros, 2018).

---

---

El cálculo de viscosidad se midió con un viscosímetro Anton Paar SVM 4001, mostrado en la Figura 15.



Figura 15 Viscosímetro Anton Paar SVM 4001

### II.IV.3 Poder calorífico

Esta propiedad mide la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o metro cúbico, de combustible al oxidarse en forma completa, es decir, durante una reacción de combustión.

El poder calorífico del biodiesel se midió con el equipo de calorimetría marca KL modelo LRY-900-1, mostrado en la Figura 16.



Figura 16 Equipo para medir calorimetría marca KL modelo LRY-900-1

---

---

La Figura 17 muestra los materiales necesarios para medir la calorimetría, en el equipo anterior, del biodiesel obtenido de la transesterificación.

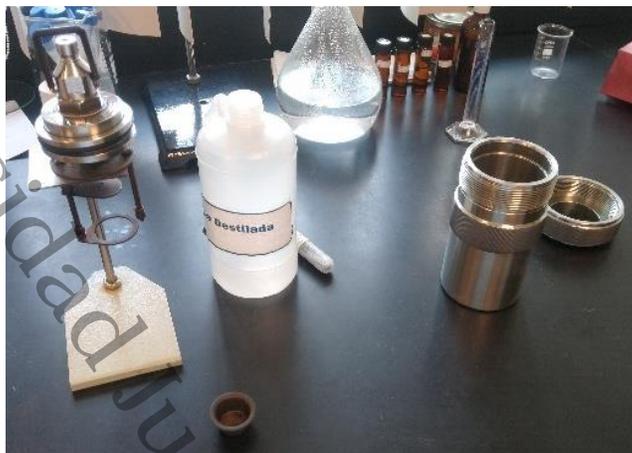


Figura 17 Material necesario usado para medir la calorimetría del biodiesel obtenido

---

---

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

**CAPÍTULO III**  
**RESULTADOS Y DISCUSIONES**

## CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### III.I CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

La caracterización físicoquímica en esta sección se refiere a la de los catalizadores sintetizados, en la que se muestra y describe su morfología, textura y química superficial.

#### III.I.1 Difracción de rayos X (DRX)

La Figura 18 muestra el análisis por difracción de rayos X de los catalizadores sintetizados: Mo/CA1, Mo/CA2, NiMo/CA1 y NiMo/CA2, así como una comparación con MoO<sub>3</sub> (ISCD 0-089-7112) con lo obtenido en este trabajo.

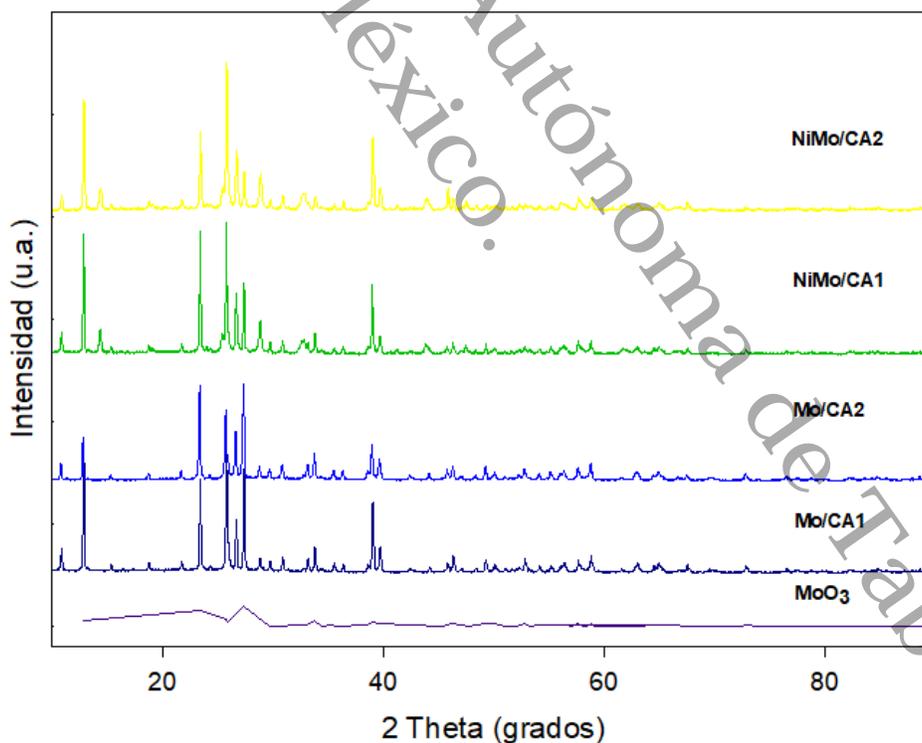


Figura 18 Difractogramas de los catalizadores sintetizados: Mo/CA1, Mo/CA2, NiMo/CA1 y NiMo/CA2; y de MoO<sub>3</sub> (ISCD 01-089-7112)

El difractograma muestra la presencia de un carbón amorfo típico, de acuerdo con las señales en  $2\theta = 27.72^\circ$ ,  $33.68^\circ$ ,  $38.88^\circ$  y  $45.76^\circ$ , y dos picos asimétricos correspondientes en  $2\theta = 13.58^\circ$  y  $26.46^\circ$ , que se asignan al grafito (ICSD 75-0444) (T y otros, 2013). También se observan señales en  $2\theta = 23.20^\circ$ ,  $27.15^\circ$ ,  $45.76^\circ$  y  $57.58^\circ$ , que se asocian con la presencia de  $\text{MoO}_3$  en fase ortorrómbica (ICSD 01-089-7112); por otro lado, los picos en  $2\theta = 26^\circ$  y  $44^\circ$ , (002) y (100) respectivamente, indicaron la presencia de  $\text{MoO}_3/\text{NiMoO}_4$ , que pudo formarse durante la preparación del catalizador y no es un buen promotor (Prajapati & Nishith, 2018). También se observan que los picos para los cuatro catalizadores son fuertes y poco anchos en su mayoría, lo que muestra un tamaño de partícula grande y una baja dispersión de los metales (Kohli y otros, 2020), lo cual provoca un bloqueo significativo de los poros del soporte de carbón activado (Foroozandeh y otros, 2023), de modo que la dispersión de los metales (Ni y Mo) y, por ende, la actividad catalítica se ven afectadas de forma negativa.

### III.I.2 Propiedades texturales por fisisorción $\text{N}_2$

La Tabla 7 muestra el área superficial, diámetro de poro y volumen de poro obtenidos del análisis de fisisorción  $\text{N}_2$  para los soportes de carbón activado utilizado en este trabajo, comparados con el carbón activado de bagazo de caña usado en el trabajo de Somyanonthanakun y colaboradores (Somyanonthanakun y otros, 2023).

Tabla 7 Propiedades texturales de los carbones activados CA1 y CA2 y del reportado por Somyanonthanakun y colaboradores (60).

| Sólido                                 | $A_{\text{BET}} (m^2/g)$  | Diámetro de poro (nm) | Volumen de poro ( $cm^3/g$ )    |
|--|---------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| CA1                                    | $1.9 * 10^2$              | 5.6                   | $2.6 * 10^{-2}$                 |
| CA2                                    | $3.0 * 10^2$              | 4.7                   | $7.4 * 10^{-2}$                 |
| CA<br>(Somyanonthanakun y otros, 2023) | $5.1 * 10^2 - 6.7 * 10^2$ | 4.2 - 5.4             | $5.4 * 10^{-2} - 9.2 * 10^{-2}$ |

El área superficial de los carbones activados usados en este trabajo es inferior al área superficial del carbón activado registrado en trabajo de Somyanonthanakun y colaboradores (Somyanonthanakun y otros, 2023), todos obtenidos a partir de bagazo de caña. Esto se debe a las diferencias en la materia prima y al método de elaboración; sin embargo, los valores obtenidos en los carbones CA1 y CA2 indican que éstos son adecuados para que funcionen como soportes de catalizadores heterogéneos en la producción de biodiésel por transesterificación de aceites. Por otro lado, el volumen de poro tanto de CA1 como de CA2 es muy parecido al del carbón activado de Somyanonthanakun y colaboradores (Somyanonthanakun y otros, 2023), lo que indica que son sólidos mesoporosos, lo cual también beneficia su uso como soportes de catalizadores heterogéneos.

Las Figuras 19 y 20 muestran gráficos de las isothermas generadas por la fisisorción de  $N_2$  en CA1 y CA2 respectivamente, en las que se muestran los volúmenes y presiones relativas en las que ocurrió la adsorción y desorción del nitrógeno en la superficie de los materiales. En ambas se puede observar que la curva no cierra al final de la desorción, como sería idealmente, esto se debe probablemente a la presencia de una cantidad considerable de microporos con diámetros menores a 2 nm, lo cual dificulta su medición en ciertos equipos de fisisorción de  $N_2$ .

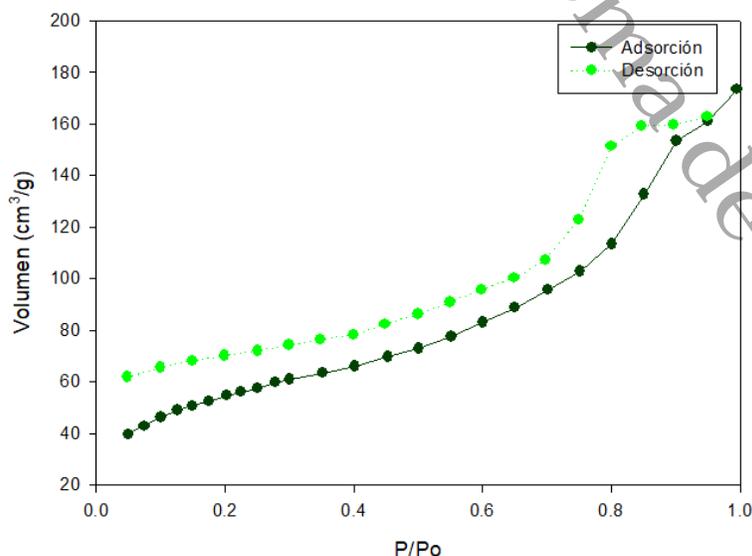


Figura 19 Isotherma de adsorción-desorción de  $N_2$  del soporte CA1

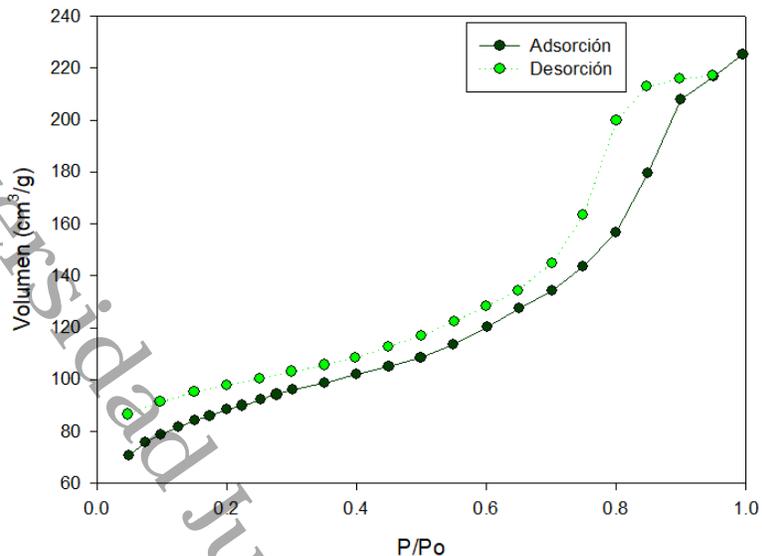


Figura 20 Isoterma de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> del soporte CA2

Sin embargo, se puede observar que, de acuerdo con la clasificación de las isothermas e histéresis dada por la IUPAC, ambas isothermas son tipo IV con formas similares, característica de sólidos mesoporosos (cuyos diámetros de poro se encuentran entre 2 – 50 nm) y la condensación capilar (ver Anexo AI). La histéresis que presentan es del tipo H1 (ver Anexo AII), lo que indica una distribución de poros muy estrechos, probablemente espacios entre placas o partículas esféricas con un tamaño y distribución aproximadamente uniformes (Cabello Mendoza, 2019). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Somyanonthanakun y colaboradores para el carbón activado obtenido del bagazo de caña (Somyanonthanakun y otros, 2023). La clasificación de las isothermas de adsorción - desorción de los sólidos porosos se incluye en el Anexo I.

### III.1.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

En la Figura 21 se muestran las micrografías electrónicas de barrido de los catalizadores sintetizados. En general, los catalizadores y soportes mostraron morfologías similares, lo cual indica que los carbones activados son estables durante el proceso de la síntesis de los catalizadores, ya que no se modificaron significativamente sus características morfológicas.

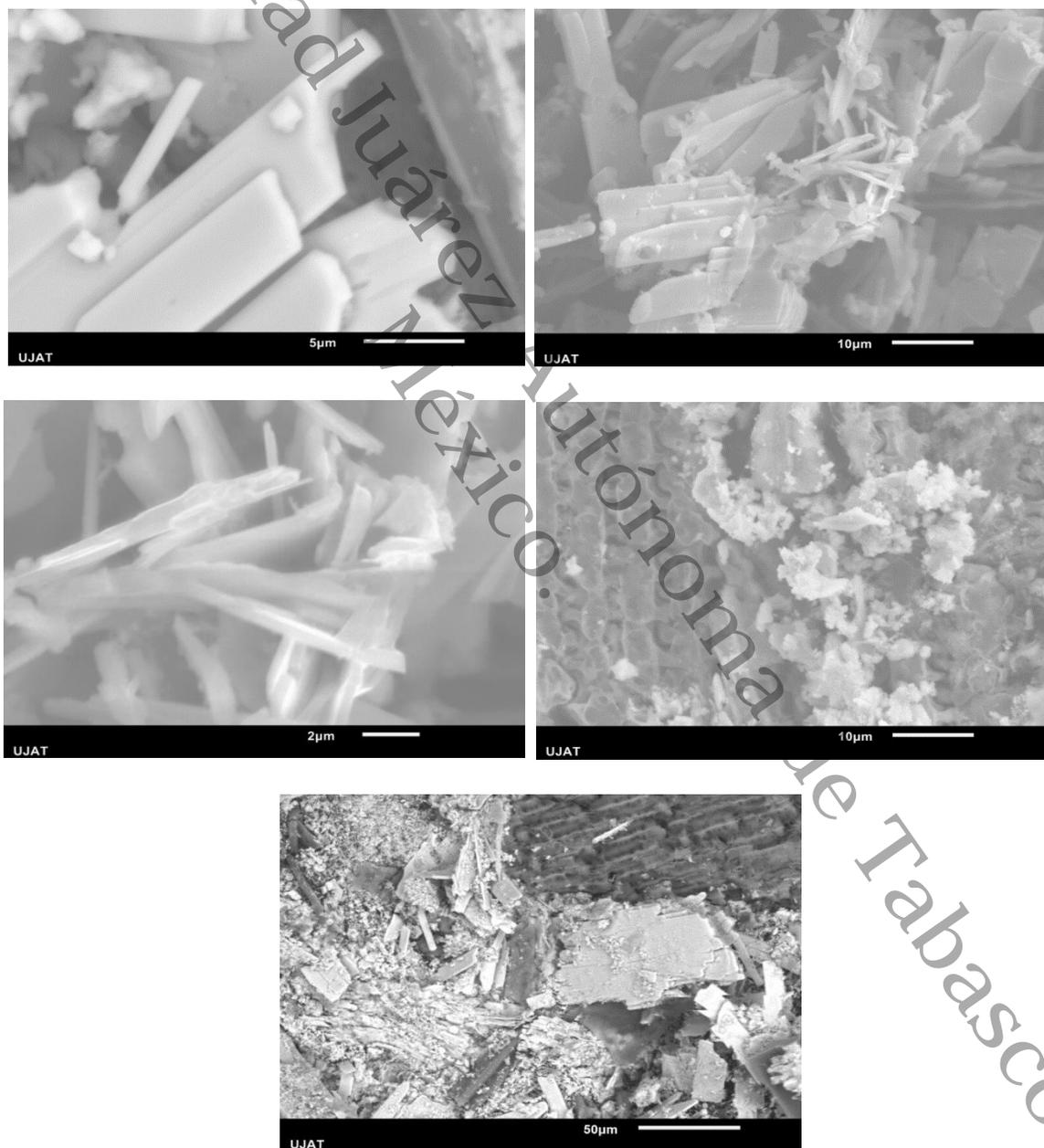


Figura 21 Micrografías MEB representativas de los catalizadores sintetizados

La morfología de los catalizadores sintetizados se caracteriza por la presencia de fibras unidas por la presencia de hemicelulosa y lignina (56). Se observa la presencia de fibras alargadas características del carbón activado de bagazo de caña (T y otros, 2013; da Cunha Goncalves y otros, 2016). También se observa una disposición amorfa de placas de carbono con espacios entre ellas, éstos pueden ser micro o mesoporos responsables de la baja área superficial obtenida.

La Figura 22 y la Tabla 8 muestran la composición en masa y molar porcentual promedio de Mo y Ni en cada uno de los catalizadores sintetizados, éstos indican la presencia de Mo y Ni en la superficie de los catalizadores. Sin embargo, esta técnica, al ser un análisis puntual, no permite determinar la uniformidad de la dispersión del Ni y Mo.

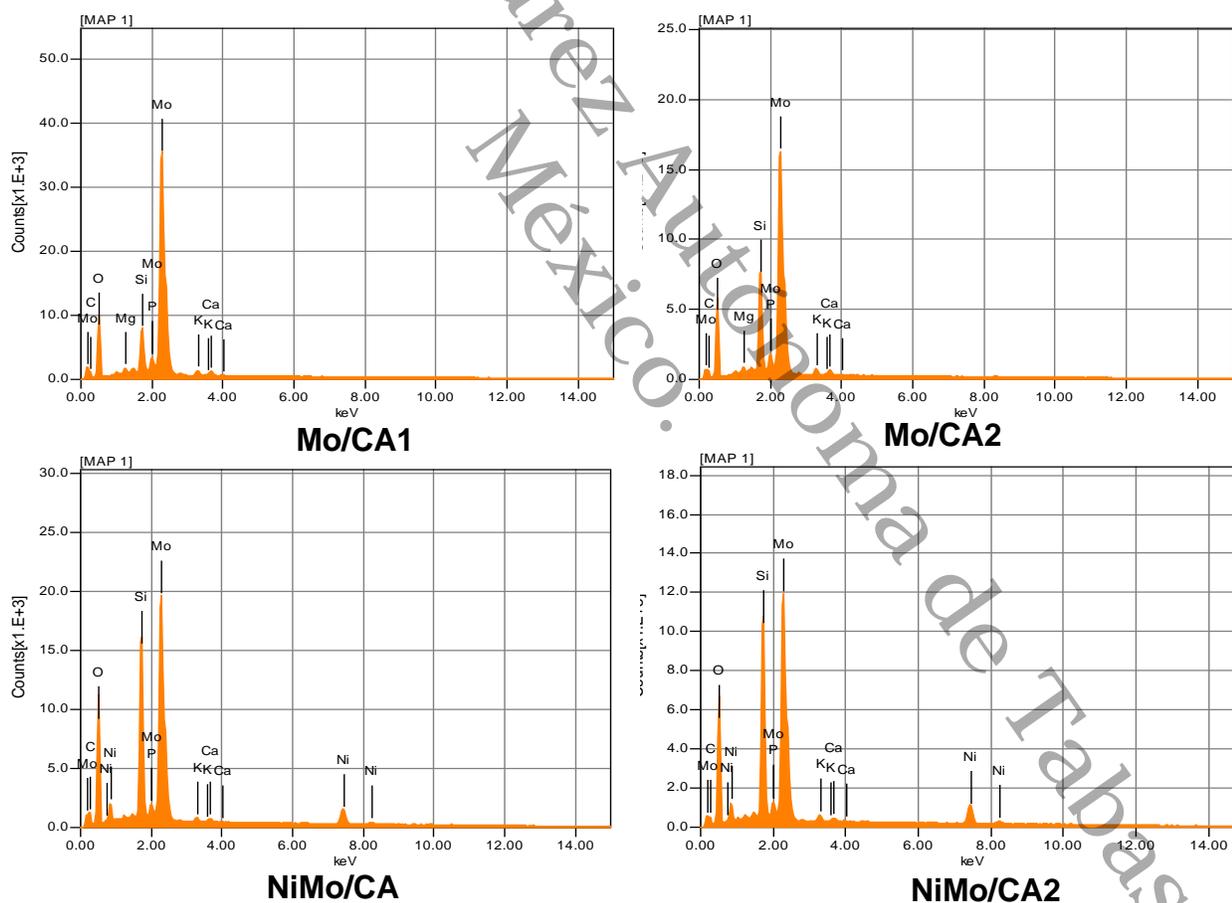


Figura 22 Espectros EDS del análisis elemental de los catalizadores sintetizados

Tabla 8 Composición porcentual de Mo y Ni de los catalizadores sintetizados

| Catalizador | %m Mo  | %m Ni | %mol Mo | %mol Ni |
|-------------|--------|-------|---------|---------|
| Mo/CA1      | 53.476 | -     | 17.14   | -       |
| Mo/CA2      | 49.813 | -     | 15.146  | -       |
| NiMo/CA1    | 41.270 | 6.426 | 11.926  | 3.05    |
| NiMo/CA2    | 43.423 | 6.676 | 13.34   | 3.35    |

Los mapeos por EDS representativos de los catalizadores Mo sintetizados se muestran en la Figura 23, se puede observar la presencia no uniforme de Mo en la superficie, es probable que se encuentre acumulado en mayor cantidad en determinadas zonas, lo cual satura los poros y disminuye su actividad catalítica.

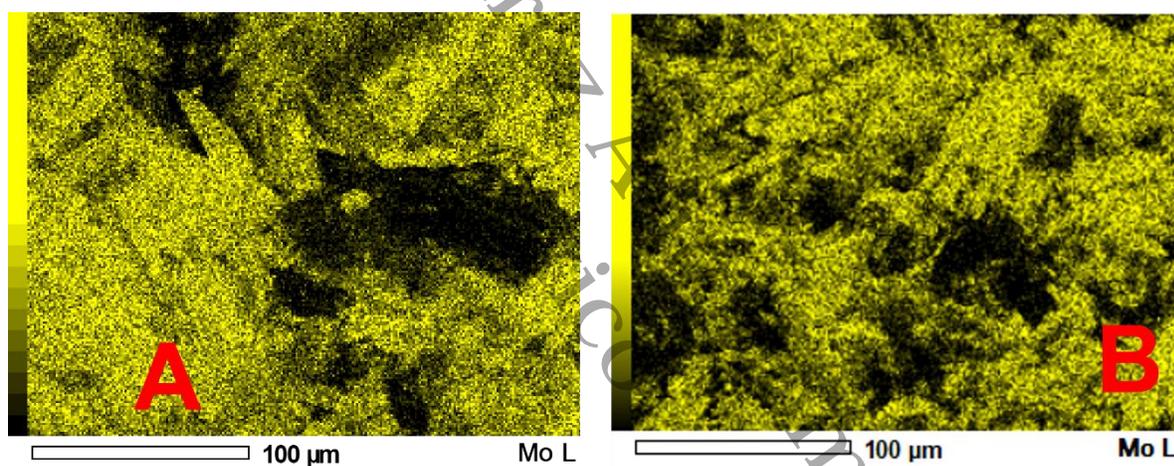


Figura 23 Mapeo EDS de los catalizadores A) Mo/CA1 y B) Mo/CA2 a 100 µm

Los mapeos por EDS de los catalizadores NiMo sintetizados (Figura 24), mostraron la presencia de Ni y Mo en la superficie, su distribución es no uniforme, sin embargo, el catalizador NiMo/CA1 muestra una mejor dispersión de las especies.

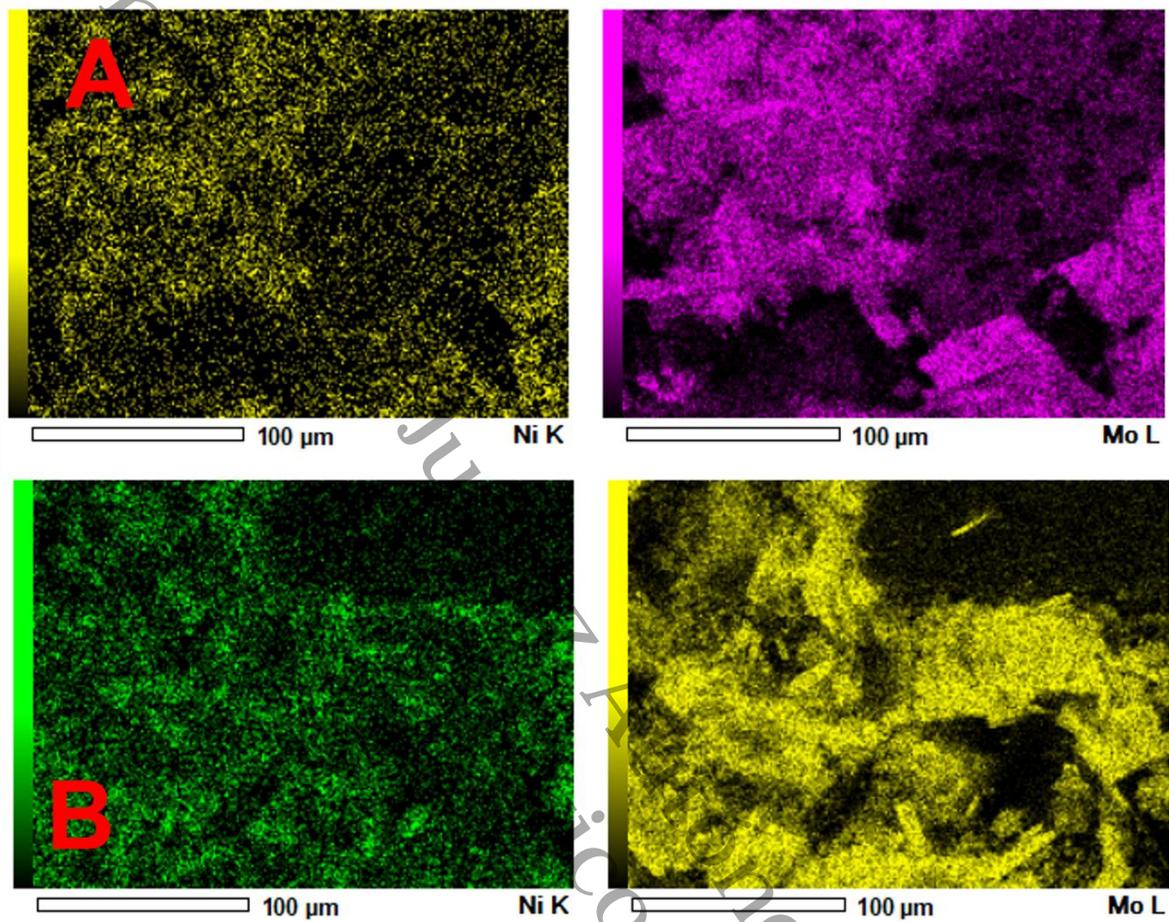


Figura 24 Mapeo EDS de los catalizadores A) NiMo/CA1 y B) NiMo/CA2 a 100 μm

## III.II EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD CATALÍTICA

### III.II.1 Rendimiento de reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación catalizada por un catalizador heterogéneo se muestra en la Figura 25.

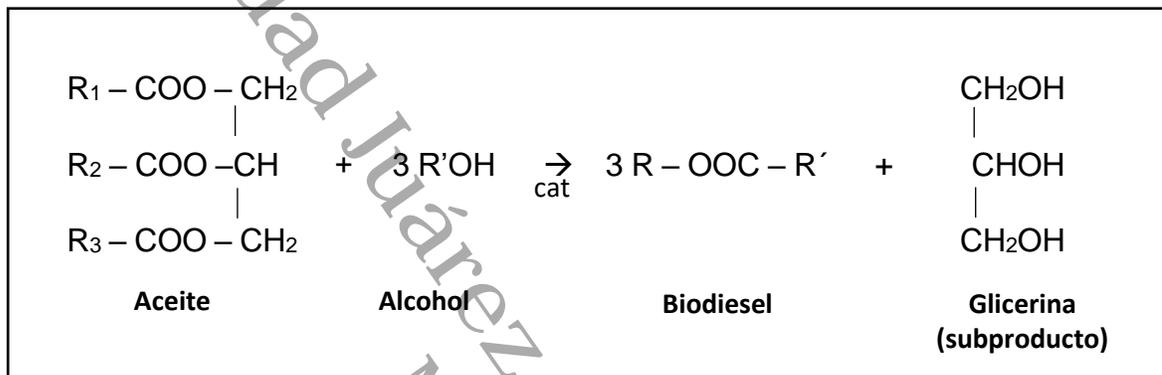


Figura 25 Reacción de transesterificación (M.A. & S., 2017)

Para calcular el rendimiento de la reacción, primero se requiere calcular la masa final de biodiesel ( $m_{FB100}$ ), asumiendo un 100% de conversión:

$$m_{FB100} = \frac{(m_{\text{aceite de palma}} + m_{\text{metanol}})(PM_{Mo} + 4)}{PM_{Mo}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $PM_{Mo} = 849.1929 \frac{g}{mol}$ , y las masas de aceite de palma ( $m_{\text{aceite de palma}}$ ) y metanol ( $m_{\text{metanol}}$ ) que se emplearon durante la reacción de transesterificación.

Con lo anterior, ya puede calcularse el rendimiento porcentual de la reacción, a través de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{(m_{\text{biodiesel}})(100)}{m_{FB100}} \quad \text{Ecuación 3}$$

La Figura 26 indica los rendimientos porcentuales de la reacción por cada catalizador y tiempo de reacción efectuados.

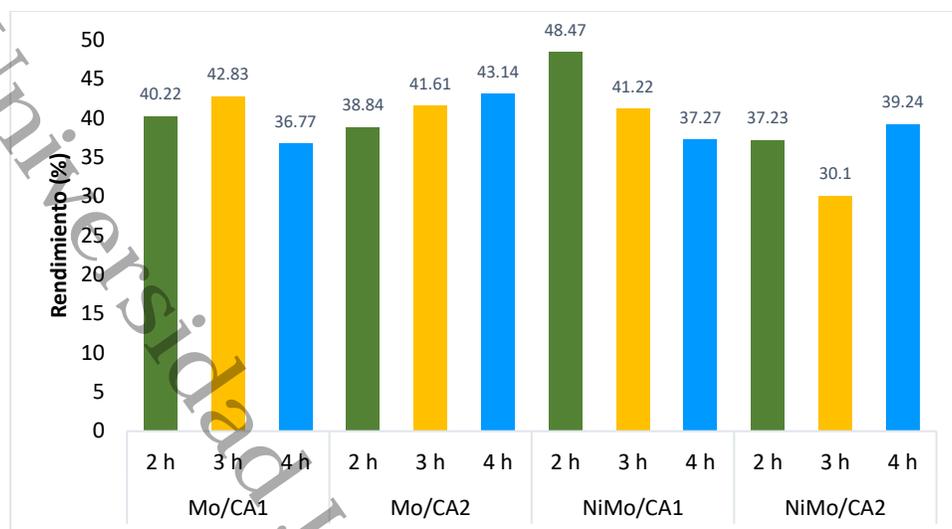


Figura 26 Rendimiento obtenido con los catalizadores Mo y NiMo en la transesterificación del aceite de palma

De acuerdo con los resultados mostrados, se puede deducir que el mayor porcentaje de rendimiento, 48.47%, fue el obtenido por el catalizador NiMo/CA1 después de dos horas de reacción. Esto puede deberse al efecto promotor del Ni y por la mejor dispersión del Mo superficial. Sin embargo, al contrario del NiMo/CA2, presenta un proceso de desactivación con el transcurso del tiempo, probablemente debido a un bloqueo de poros.

### III.II.2 Cromatografía de gases

La Tabla 9 muestra los tiempos de retención del método cromatográfico para la determinación de los metil-ésteres presentes en las muestras del biodiesel obtenido.

Tabla 9. Tiempo de retención de los componentes identificados por cromatografía de gases

| Componente               | Tiempo de retención |
|--------------------------|---------------------|
| Palmitato de metilo      | 6.875               |
| Esterorato de metilo     | 7.305               |
| Metil elaidato           | 9.308               |
| Oleatode metilo          | 9.405               |
| Linolealaidato de metilo | 9.992               |

La Figura 27 muestra un cromatograma representativo de las muestras de biodiesel obtenido, en éste se pueden observar señales asociadas con la presencia de los ésteres mencionados en la Tabla 9. En general, el patrón fue similar en todas las muestras obtenidas con los cuatro catalizadores sintetizados, lo cual indica que la naturaleza de los catalizadores no afecta la composición del biodiesel obtenido.

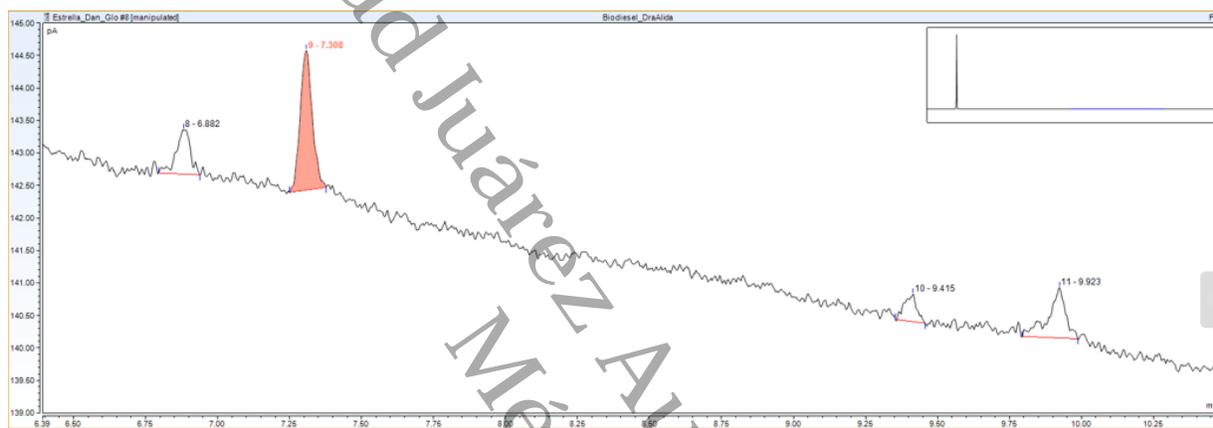


Figura 27 Cromatograma CG representativo del biodiesel obtenido

### III.III CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BIODIESEL

#### III.III.1 Densidad

La densidad de las muestras de biodiesel fue medida en función de la temperatura, de 20°C a 90°C con intervalos de ésta de 10°C, tomando en cuenta que las muestras medidas fueron las que obtuvieron mayor rendimiento por catalizador usado. La Figura 28 muestra los datos ajustados linealmente y las ecuaciones generadas de dicho ajuste, con lo que se podrá predecir la densidad a cualquier temperatura.

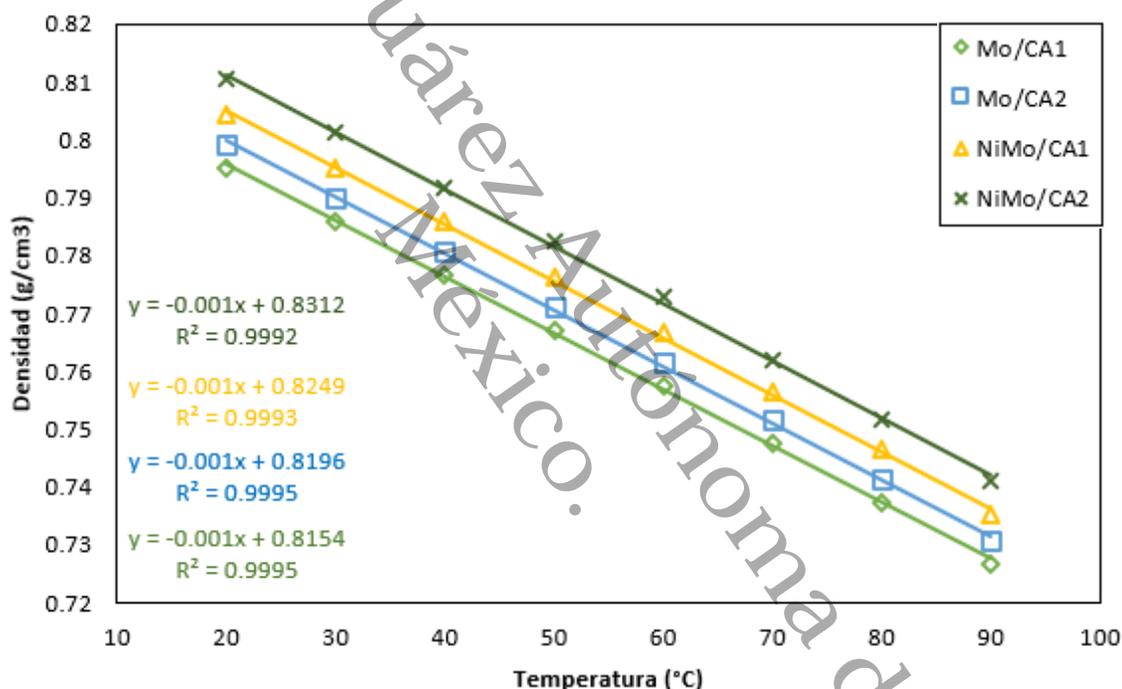


Figura 28 Gráfico de la densidad del biodiesel obtenido en función de la temperatura ajustada linealmente

Dado que los valores del coeficiente de correlación de los cuatro ajustes lineales son mayores que 0.999, se considera que no es necesario hacer ajustes polinomiales, de modo que las ecuaciones obtenidas son apropiadas para el cálculo de densidades de biodiesel a la temperatura que se desee. La tabla 10 muestra la densidad del biodiesel calculada a 15°C dependiendo del catalizador usado, con el fin de compararlo con las normativas ASTM D6571 y EN 14214.

Tabla 10 Densidad del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados calculado a 15°C

| Catalizador usado | Tiempo de reacción (h) | Densidad calculada a 15°C (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------------|------------------------|--|
| Mo/CA1            | 3                      | 0.8004   |
| Mo/CA2            | 4                      | 0.8045   |
| NiMo/CA1          | 2                      | 0.8099   |
| NiMo/CA2          | 4                      | 0.8162   |

La ASTM D6571 indica que la densidad del biodiesel debe de ser de 0.880 g/cm<sup>3</sup>, mientras que la normativa EN 14214 indica que se debe encontrar entre 0.860 y 0.900 g/cm<sup>3</sup>. Aunque la densidad más alta registrada es del biodiesel obtenido usando NiMo/CA2, las densidades calculadas se encuentran por debajo de lo indicada por ambas normativas.

### III.III.2 Viscosidad

La viscosidad cinemática de las muestras de biodiesel fue medida en función de la temperatura, de 20°C a 50°C (excepto las muestras de NiMo/CA1 y NiMo/CA2, que llegan a 40°C), con intervalos de 10°C, tomando en cuenta que las muestras medidas fueron las que obtuvieron mayor rendimiento por catalizador usado.

Se hicieron ajustes polinomiales a los datos: El ajuste hecho para las muestras de biodiesel usando Mo/CA1 y Mo/CA2 fueron de segundo grado, ya que un ajuste lineal mostraba un coeficiente de correlación menor que 0.999; los ajustes de las muestras de biodiesel usando NiMo/CA1 y NiMo/CA2 fueron de tercer grado, dado que los ajustes lineal y polinomial de segundo grado mostraban un coeficiente de correlación menor que 0.999. La Figura 29 muestra los datos con ajuste polinomial y las ecuaciones generadas de dicho ajuste, con lo que se podrá predecir la viscosidad cinemática a cualquier temperatura.

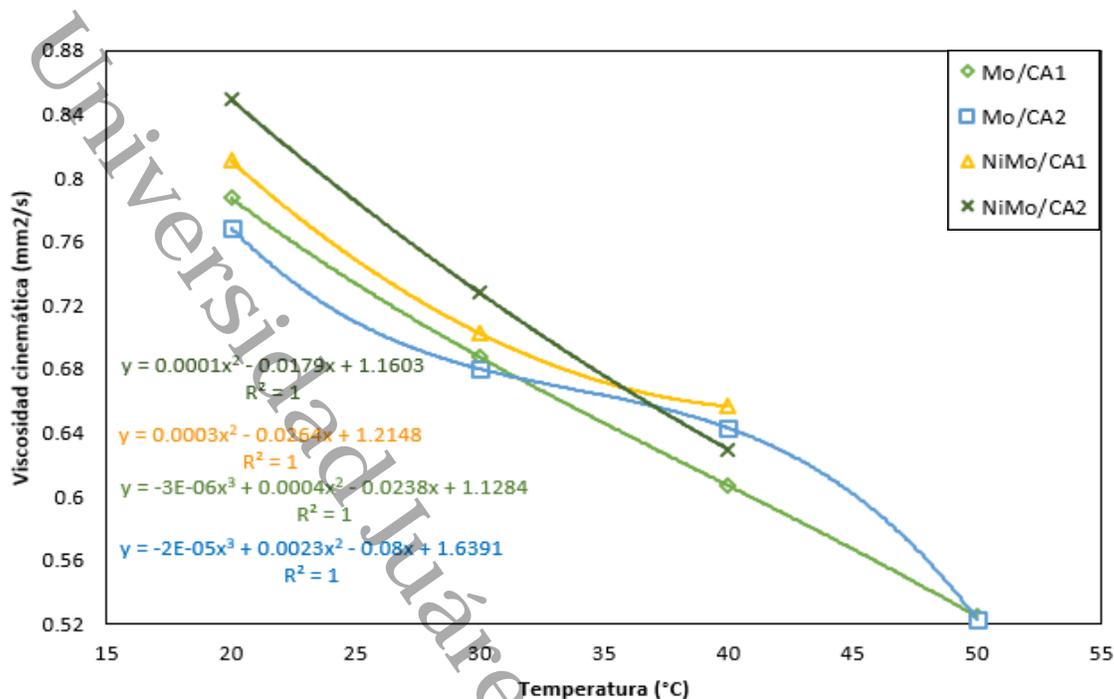


Figura 29 Gráfica de la viscosidad cinemática del biodiesel en función de la temperatura con ajuste polinomial

La Tabla 11 muestra la viscosidad cinemática del biodiesel a 40°C por cada catalizador utilizado, con el fin de compararla con los parámetros establecidos por la ASTM D6571 y la EN 14214.

Tabla 11 Viscosidad cinemática del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados calculada a 40°C

| Catalizador usado | Tiempo de reacción (h) | Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s) |
|-------------------|------------------------|--|
| Mo/C1             | 3                      | 0.6170                                     |
| Mo/CA2            | 4                      | 0.6432                                     |
| NiMo/CA1          | 2                      | 0.6568                                     |
| NiMo/CA2          | 4                      | 0.6248                                     |

Las normativas para el biodiesel establecen que la viscosidad cinemática debe encontrarse entre 1.9-6.0 mm<sup>2</sup>/s (ASTM D6571) o 3.5-5.0 mm<sup>2</sup>/s (EN 14214), por lo tanto,

---

---

según los datos de la Tabla 11, las viscosidades cinemáticas obtenidas están muy por debajo de lo establecido.

### III.III.3 Poder calorífico

Se analizó el poder calorífico de cuatro muestras de biodiesel obtenido, tomando en cuenta a las muestras que tuvieron el mayor porcentaje de reacción por catalizador utilizado. La Tabla 12 muestra los valores de poder calorífico obtenidos; el mayor dato registrado fue el del biodiesel obtenido usando el catalizador Mo/CA1 después de tres horas de reacción.

Tabla 12 Poder calorífico del biodiesel obtenido con los catalizadores sintetizados

| Catalizador usado | Tiempo de reacción (h) | Poder calorífico (J/g) |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| Mo/CA1            | 3                      | 19 975.51              |
| Mo/CA2            | 4                      | 19 402.95              |
| NiMo/CA1          | 2                      | 11 605.95              |
| NiMo/CA2          | 4                      | 18 295.85              |

Cómo se ha mencionado anteriormente, la composición de ácidos grasos de los aceites usados como materia prima influyen mucho en las propiedades del biodiesel producido. En el caso de este biocombustible, la cadena de carbonos se encuentra en un rango de C12-C22. Los parámetros establecidos de poder calorífico por la ASTM para el diesel (ASTM D975) y biodiesel (ASTM D6571) son 45 000 J/g y 37 300 J/g, respectivamente, lo que indica que el poder calorífico del diesel es mayor un 12% que el del biodiesel, otorgándole un mejor desempeño del motor.

---

---

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

**CAPÍTULO IV**  
**CONCLUSIONES**

---

---

## CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

Los carbones activados obtenidos a partir del bagazo de caña son materiales que pueden emplearse como soportes para el proceso de transesterificación de aceite de palma para la producción de biodiesel, ya que presentan propiedades texturales como área superficial y diámetro de poro adecuadas para este proceso. Sin embargo, su baja porosidad, comparada con la de otros carbones activados, dificulta la dispersión de las especies de Ni y Mo, y puede sufrir desactivación por bloqueo de poros, lo cual conduce a una baja actividad catalítica.

El biodiesel obtenido por la transesterificación de aceite de palma presentó propiedades fisicoquímicas similares empleando los catalizadores Mo y NiMo sintetizados, aunque por debajo de los límites establecidos en la normatividad. Esto podría mejorarse modificando las técnicas de preparación de los carbones activados, así como el contenido de Mo y Ni de los catalizadores.

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Adbullah, B., Faua'ad, S. A., Muhammad, S., Zhara, S., Shahrul, I., Anuar Kassim, K., Nik Mahmood, A., & A. Aziz, M. M. (Febrero de 2019). Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, CVII, 37-50.
- Alalwan, H. A., Alminshid, A. H., & Aljaafari, H. A. (Marzo de 2019). Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus*, XXVIII.
- Aydogan, C. (2020). Chapter 12 - Liquid chromatography-high resolution mass spectrometry for the analysis of bioactive natural products. En C. Aydogan, & Attatur-Rahman (Ed.), *Studies in Natural Products Chemistry* (Vol. 66, págs. 331-353). Bingöl: Elsevier.
- Ayoob, A. K., & Fadhil, A. B. (Diciembre de 2019). Biodiesel production through transesterification of a mixture of non-edible oils over lithium supported on activated carbon derived from scrap tires. *Energy Conversion And Management*, CCI, 112-149.
- Balboa Palomino, A. (2018). *Síntesis y caracterización de catalizadores NiMo/Zr-SBA-15: Efecto de la relación Zr/Si sobre las propiedades del SBA-15*. Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tamaulipas.
- Bardhan, P., Deka, A., Bhattacharya, S. S., Mandal, M., & Katakai, R. (2022). Chapter 18 - Economical aspect in biomass to biofuel production. En P. Bardhan, A. Deka, S. S. Bhattacharya, M. Mandal, R. Katakai, S. Yusup, & N. A. Rashidi (Edits.), *Value-chain of biofuel. Fundamentals, Technology, and Standardization* (págs. 395-427). Elsevier.
- Baskar, G., Gurugulladevi, A., Nishanthini, T., Aiswarya, R., & Tamilarasan. (Abril de 2017). Optimization and kinetics of biodiesel production from Mahua oil using manganese doped zinc oxide nanocatalyst. *Renewable Energy*, CII, 641-646.

- 
- 
- Borah, M. J., Devi, A., Borah, R., & Deka, D. (Octubre de 2018). Synthesis and application of Co doped ZnO as heterogeneous nanocatalyst for biodiesel production from non-edible oil. *Renewable energy*, CXXXIII, 512-519.
- Cabello Mendoza, L. P. (2019). *Investigación y desarrollo de óxido de calcio como material sorbente de CO<sub>2</sub>, proveniente de la cáscara de huevo, de tamaño nanométrico, dopado con TiO<sub>2</sub>, PET y carbón activado*. Tesis doctoral, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Querétaro.
- Cabello, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2017). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, LXXIV(577).
- Castellar Ortega, G. C., Angulo Mercado, E. R., & Cardozo Arrieta, B. M. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospect*, XII(2), 90-104.
- da Cunha Goncalves, G., Curvelo Pereira, N., & Teresinha Veit, M. (2016). Production of bio-oil and activated carbon from sugarcane bagasse and molasses. *Biomass and Bioenergy*(85), 178-186.
- Dahman, Y., Syed, K., Begum, S., Roy, P., & Mohtasebi, B. (2019). 14 - Biofuels: Their characteristics and analysis. En D. Verma, E. Fortunati, S. Jain, & X. Zhang (Edits.), *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy* (págs. 277-325). Woodhead Publishing in Composites Science and Engineering.
- Datta, A., Hossain, A., & Roy, S. (2019). An Overview on Biofuels and Their Advantages and Disadvantages. *Asuan Journal of Chemistry*, XXXI(8), 1851-1858.
- Elgharbawy, A. S., Sadik, W. A., Sadek, O. M., & Kasaby, M. A. (Enero de 2021). A review on biodiesel feedstock and production technologies. *Journal of the Chilean Chemical Society*, LXI(1).
- Erkey, C., & Türk, M. (2021). Chapter 6. Thermodynamics and kinetics of adsorption of metal complexes on surfaces from supercritical solutions. *Supercritical Fluid Science and Technology*, 8, 73-127.

- 
- 
- Farrokheh, A., Tahvildari, K., & Nozari, M. (Septiembre de 2020). Comparison of Biodiesel Production Using the Oil of *Chlorella Vulgaris* Micro-algae by Electrolysis and Reflux Methods using CaO/KOH-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and KF/KOH-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> as Magnetic Nano catalysts. *Waste and Biomass Valorization*, XII, 3315-3329.
- Foroozandeh, A., Hatefirad, P., Safaei Mahmoudabadi, Z., & Tavasoli, A. (2023). Catalytic Activity of Synthetized Nimo Catalysts on Walnut Shell Activated Carbon for Heavy Naphtha Hydrotreating. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, XLIII(1).
- Freire Ordóñez, C., & Medrano Barboza, J. (Diciembre de 2019). Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa de producción, mediante simulación. *Perspectivas*, I(16).
- G., B., g., Kalavathy, R., A., & I., A. S. (2019). 7 Advances in bio-oil extravtion from nonedible oil seeds and algal biomass. En K. Azad, & K. Azad (Ed.), *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment* (págs. 187-210).
- Ganjali, M., & Vahdatkhah, P. (2018). Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures. En A. Barhoum, A. S. Makhoulf, A. Barhoum, & A. S. Makhoulf (Edits.), *Chapter 19 - Synthesis of metal nanoparticles using laser ablation technique* (págs. 575-596). Elsevier.
- García Muentes, S. A., Lafargue Pérez, F., Labrada Vázquez, B., Diaz Velázquez, M., & Sanches del Campo Lafita, A. E. (Abril de 2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, XXX(1).
- Gesterio, E., Galera Gordo, J., & González Gross, M. (Junio de 2018). Aceite de palma y salud cardiovascular: consideraciones para valorar la literatura. *Nutrición Hospitalaria*, XXXV(5).
- González Jiménez, S., & Morales Hernández, S. (2019). *Monolitos de carbón activado elaborados a partir de bagazo de caña para el tratamiento y análisis de aguas*

- 
- 
- residuales. Tesis, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Cunduacán, Tabasco.
- Guzman Julio, L. (Diciembre de 2019). *Síntesis de biodiesel a partir de aceite extraído con CO<sub>2</sub> supercrítico de semilla de mango (Magnifera indica)*. Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Química, Bogotá.
- Hongloi, N., Prapainainar, P., Seubsai, A., Sudsakorn, K., & Prapainainar, C. (Junio de 2019). Nickel catalyst with different supports for green diesel production. *Energy*(382), 306-320.
- Horacio Catalán, A. (Marzo de 2021). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gas de efecto invernadero en México. *Revista Latinoamericana de Economía, LII*(204).
- Iwanow, M., Gärtner, T., Sieber, V., & König, B. (Junio de 2020). Activated carbon as catalyst support: precursors, preparation, modification and characterization. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*(16), 1188-1202.
- Iwanow, M., Gärtner, T., Sieber, V., & König, B. (2020). Activated carbon as catalyst support: precursors, preparation, modification and characterization. *Beilsteins Journal of Organic Chemistry, 16*, 1188-1202.
- Kohli, K., Prajapati, R., Maity, S. K., & Kumar Sharma, B. (Septiembre de 2020). Effect of Silica, Activated Carbon and Alumina Supports on NiMo Catalysts for Residue Upgrading. *Energies, XIII*(4967), 1-16.
- Kumar, P., K. Maity, S., & Shee, D. (2019). Role of NiMo alloy and Ni species in the performance of NiMo/Alumina catalysts for hydrodeoxygenation of stearic acid: A kinetic study. *ACS Omega*(4), 2833-2843.
- Leofanti, g., Padovan, M., Tozzola, G., & Venturelli, B. (1998). Surface area and pore texture of catalysts. *Catalysis Today, XLI*(207).
- Liew, R. K., Chong, M. Y., Uyi Osazuwa, O., Nam, W. L., Phang, X. Y., Su, M. H., Cheng, C. K., Chong, C. T., & Lam, S. S. (Marzo de 2018). Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell: a comparative

- 
- 
- study of chemical versus physical activation. *Research on Chemical Intermediates*, XLIV, 3849-3865.
- M.A., Q., & S., A. (2017). Chapter Four - Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS): Future prospects of carbon-negative technologies. En Q. M.A., A. S., M. G. Rasul, A. Kalam Azad, & S. C. Sharma (Edits.), *Clean Energy for Sustainable Development* (págs. 91-140). Academic Press.
- Maleki, B., Ashraf Taleh, S., & Mansouri, M. (Junio de 2022). Comparison of catalyst types performance in the generation of sustainable biodiesel via transesterification of various oil sources: a review study. *Materials Today Sustainability*, XVIII.
- Marquínez Marquínez, A. N., Loo Molina, N. S., Guamán Marquínez, C. W., Vélez Vélez, J. A., Solórzano Párraga, K. M., Rodríguez Cobeña, J. K., & Riera, M. A. (Junio de 2020). Obtención de biodiesel a partir de aceite de coco (*Cocos nucifera* L.). *RIC*, VI(1).
- Moodley, P. (2021). 1 - Sustainable biofuels: opportunities and challenges. En P. Moodley, C. Trois, A. Joshi, B. Kanthaliya, J. Arora, J. A. Pérez Pimenta, E. Ríos del Toro, C. Alvarado Escamilla, A. C. Eloka Eboke, S. Maroa, S. Achinas, e. al, & R. C. Ray (Ed.), *Sustainable Biofuels* (págs. 1-20). Academic Press.
- Nainggolan, M., & Sofwan Sinaga, A. G. (Marzo de 2021). Characteristics of fatty acid composition and minor constituents of red palm oil olein and palm kernel oil combination. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, XII(1), 22-26.
- Narowska, B., Kulazynski, M., Lukaszewicz, M., & Burchacka, E. (Mayo de 2019). Use of activated carbon as catalyst supports for biodiesel production. *Renewable Energy*, CXXXV, 176-185.
- Nasreen, S., Nafees, M., Ali Qureshi, L., Shahbaz Asad, M., Sadiq, A., & Ali, S. D. (2018). Chapter 6 Review of Catalytic Transesterification Methods for Biodiesel

- 
- 
- Production. En K. Biernat (Ed.), *Biofuels - State of Development* (págs. 93-119). IntechOpen.
- Nasrollahzadeh, M., Atarod, M., Sajjadi, M., Sajadi, S. M., & Issaabadi, Z. (2019). Chapter 6. Plant-Mediated Green Synthesis of Nanostructures: Mechanisms, Characterization, and Applications. En *Interface Science and Technology* (págs. 199-322). Elsevier.
- Prajapati, Y. N., & Nishith, V. (2018). Hydrodesulfurization of Thiophene on Activated Carbon Fiber Supported NiMo Catalysts. *Energy Fuels*, XXXII, 2183-2196.
- Rizwanul Fattah, I. M., Ong, H. C., Mahlia, T. M., Mofijur, M., Silitonga, A. S., Ashrafur Rahman, S. M., & Ahmad, A. (Junio de 2020). State of the art of catalysts for biodiesel production. *Frontiers in Energy Research*, VIII(101).
- Robles Andrade, S., Silva Rodrigo, R., García Alamilla, R., Ramos Galván, R., Carrizales Martínez, G., Sandoval Robles, G., & Castillo Mares, A. (2006). Carbón activado modificado como soporte para catalizadores prototipo de HDS. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(3), 279-284.
- Rosas Saito, G. H. (2017). *Instituto de Ecología, A. C.* Retrieved Enero de 2023, from Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clpuster Científico y Tecnológico BioMimic. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic>
- Ruangudomsakul, M., Osakoo, N., Keawkumay, C., Kongmanklang, C., Butburee, T., Kiatphuengporn, S., Faungnawakij, K., Chanlek, N., Wittayakun, J., & Khemthong, P. (Mayo de 2021). Influential properties of activated carbon on dispersion of nickel phosphides and catalytic performance in hydrodeoxygenation of palm oil. *Catalyst Today*, CCCLXVII, 153-164.
- S. Brum, S., L. Quirino, R., O. Daher, L., K. Iha, O., M. Ehlert, E., C. Rubim, J., & Z. Suarez, P. A. (2022). Synthesis, Characterization and Use of Alumina Doped with

- 
- 
- TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> to Produce Biofuels from Soybean Oil by Thermal Cracking, Transesterification and Hydroesterification. *Journal Brazilian Chemical Society*, XXXIII(8), 916-926.
- SAGARPA. (2017). *Planeación agrícola nacional. 2017-2030. Aceite de palma mexicana*. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, Subsecretaría de Agricultura, México.
- Sakthivel, R., Ramesh, K., Purnachandran, R., & Mohamed Shameer, P. (2018). A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, LXXXII, 2970-2992.
- Saynes Santillán, V., & Ramírez Bribiesca, E. (Febrero de 2018). El uso de la cromatografía de gases en investigaciones de emisiones de gases de efecto invernadero del sector pecuario. *Agroproductividad*, XI(2), 81-88.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Retrieved Enero de 2023, from Difracción de rayos X. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html>
- Sing, K. S., Everett, D. H., Haul, R. A., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquérol, & Siemieniowska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *International Union of Pure and Applied Chemistry*, LVII(603).
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S., Sharma, S., Kumar Sharma, P., & Jhalani, A. (Febrero de 2020). A review on feedstocks, production processes, and yield for different generation of biodiesel. *Fuel*, CCLXII.
- Somyanonthanakun, W., Greszta, A., Roberts, A. J., & Thongmee, S. (2023). Sugarcane Bagasse-Derived Activated Carbon as a Potential Material for Lead Ions Removal from Aqueous Solution and Supercapacitor Energy Storage Application. *Sustainability*, VII(15).

- 
- 
- T, A., L, V., & G, S. (2013). Studies on structural morphological, electrical and electrochemical of activated carbon prepared from sugarcane bagasse. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*(19), 1470-1476.
- Tapia, J., Acelas, N. Y., López, D., & Moreno, A. (2017). NiMo-sulfide supported on activated carbon to produce renewable diesel. *Journal of the Faculty of Sciences*, 1(22).
- Teuku Meurah, I. M., Norayiqin, I., Nazia, H., Arridina, S. S., & Adb, H. S. (Abril de 2019). Palm oil and its wastes as bioenergy sources: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, XXVI, 14849-14866.
- Tongxin, Q., Shengli, N., Xiangyu, Z., Kuihua, H., & Chunmei, L. (Agosto de 2020). Preparation of calcium modified Zn-Ce/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterogeneous catalyst for biodiesel production through transesterification of palm oil methanol optimized by response surface methodology. *Fuel*, CCLXXXIV, 1-13.
- TWI. (2022). Retrieved 12 de Octubre de 2022, from Scanning electron microscopy (SEM) analysis and imaging. <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/failure-analysis-and-repair/microscopy/scanning-electron-microscopy-sem-analysis-and-imaging>
- Universidad de Alicante. (2022). Retrieved Enero de 2023, from Servicios Técnicos de Investigación. Análisis de la textura porosa de sólidos. <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis-termico/analisis-de-la-textura-porosa-de-solidos.html>
- Vázquez Garrido, I., López Benítez, A., Guevara Lara, A., & Berhault, G. (Noviembre de 2021). Synthesis of NiMo catalysts supported on Mn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for obtaining green diesel from waste soybean oil. *Catalyst Today*, 327-340.
- Vilas Bôas, R. N., & Mendes, M. F. (Enero de 2022). A review of biodiesel production from non-edible raw materials using the transesterification process with a focus on influence of feedstock composition and free fatty acids. *Journal Chilean Chemical Society*, LVII(1), 5433-5444.

---

---

Yan, Y. (2019). 7 - Tribology and tribocorrosion testing and analysis of metallic biomaterials. En A. Amerintanzi, M. Chandrasekaran, B. Cheng, C. Cuí, A. Dehghanghadikolaei, M. Elahinia, U. Gbureck, T. Hanawa, H. Hasebe, H. Hermawan, S. Hiromoto, H. Ibrahim, M. Ito, Y. Yan, M. Niinomi, & M. Niinomi (Ed.), *Metals for Biomedical Devices* (págs. 213-234). Woodhead Publishing Series in Biomaterials.

Yang, J., Ren, S., Zhang, T., Su, Z., Long, H., Kong, M., & Yao, L. (Enero de 2020). Iron doped effects on active sites formation over activated carbon supported Mn-Ce oxide catalysts for low-temperature SCR of NO. *Chemical Engineering Journal*, CCCLXXIX.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

---

---

## ANEXOS

### A.I CLASIFICACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN-DESORCIÓN

Las medidas de adsorción de gases se utilizan ampliamente para la caracterización de una amplia variedad de sólidos porosos, como óxidos, carbones, zeolitas o polímeros orgánicos.

A medida que disminuye el tamaño del poro aumenta el potencial de adsorción. En el caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán adsorbiendo formando una monocapa, y a medida que aumenta la cantidad adsorbida, el adsorbato se ordena en capas sucesivas (llenado en multicapas).

La cantidad de gas adsorbido a una temperatura dada para distintas presiones relativas de gas se conoce como isoterma de adsorción. De acuerdo a la IUPAC, se distingue la clasificación de seis diferentes tipos de isotermas (Leofanti y otros, 1998):

- La isoterma tipo I se caracteriza porque la adsorción se produce a presiones relativamente bajas. Característica de los sólidos microporosos.
- La isoterma tipo II es característica de sólidos macroporosos o no porosos, tales como negros de carbón.
- La isoterma tipo III ocurre cuando la interacción adsorbato-adsorbente es baja. Ejemplo: adsorción de agua en negros de carbón grafitizados.
- La isoterma tipo IV es característica de sólidos mesoporosos. Presenta un incremento de la cantidad adsorbida importante a presiones relativas intermedias, y ocurre mediante un mecanismo de llenado en multicapas.
- La isoterma tipo V, al igual que la isoterma tipo III, es característica de interacciones adsorbato-adsorbente débiles, pero se diferencia de la anterior en que el tramo final no es asintótico.

- La isoterma tipo VI es poco frecuente. Este tipo de adsorción en escalones ocurre sólo para sólidos con una superficie no porosa muy uniforme. Ejemplo: adsorción de gases nobles en carbón grafitizado.

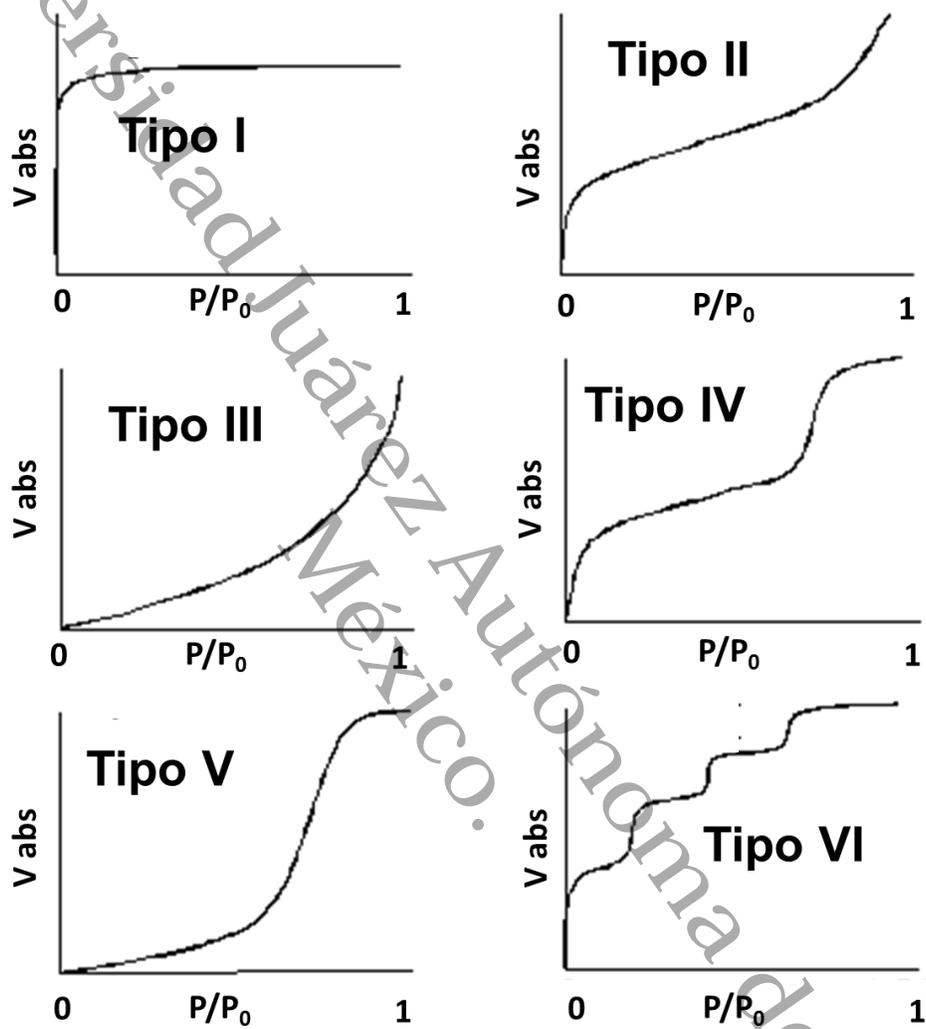


Figura 30 Representación esquemática de los seis tipos de isothermas de adsorción (Sing y otros, 1985)

## A.II CICLO DE HISTÉRESIS

La histéresis que aparece en el intervalo de multicapa de las isothermas de fisisorción se asocia normalmente con la condensación capilar en la estructura de mesoporos. A continuación, se muestran los tipos de ciclos de histéresis (Leofanti y otros, 1998):

- **Tipo H1 y H2:** Son características de los sólidos conformados por conglomerados y partículas cortadas por canales cilíndricos. El tamaño y forma son uniformes en el tipo H1 y no uniformes en el tipo H2. En el caso de los poros con forma de botella, la histéresis es atribuida usualmente a la diferencia de tamaño de la boca y el cuerpo del poro y en el caso de los cilindros se le atribuye al diferente comportamiento en la adsorción y desorción. En el caso de los poros con forma de botella, la condensación se lleva a cabo en cada sección a una presión relativa de acuerdo a la ley de Kelvin (el líquido formado abajas presiones en la boca del poro provee el vapor para la adsorción y condensación a lo largo del poro). Los mesoporos son por lo general de este tipo.

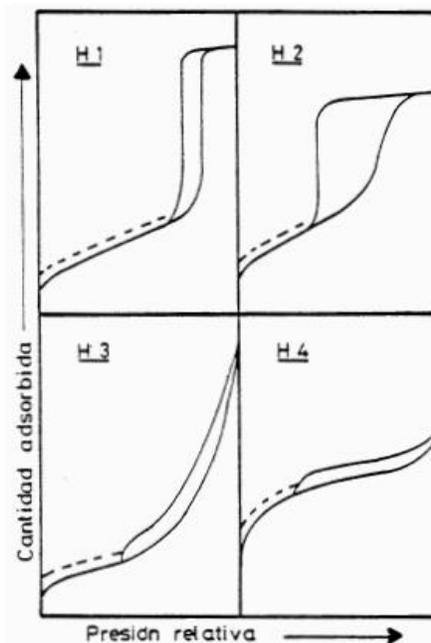


Figura 31 Representación esquemática de los tipos de histéresis (Sing y otros, 1985)

- **Tipo H3 y H4:** Son características de los sólidos con poros en forma de placas. El tamaño y forma son uniformes en el tipo H4 y no uniformes en el tipo H3. En poros formados por platos paralelos el menisco es plano durante la adsorción y cilíndrico durante la desorción, por lo tanto, la condensación se lleva a cabo a cualquier presión relativa. El carbón activado y las zeolitas presentan este tipo de histéresis.
- **No histéresis:** Es el caso de los cilindros ciegos y en forma de cuña o cono. La presión relativa a la que cierra la gráfica de histéresis es siempre de 0.42 independientemente del adsorbente y de la distribución del tamaño de poro y está relacionada con las propiedades del adsorbato líquido.

---

---

## GLOSARIO

**Ajuste lineal:** También llamada regresión lineal, ayuda en proceso de comprensión y predicción del comportamiento de datos experimentales, financieros y biológicos.

**Ajuste polinomial:** Extensión de la regresión lineal que añade predictores adicionales, que se obtienen al elevar cada uno de los predictores originales a una potencia.

**Colimar:** Obtener o concentrar un haz de rayos paralelos a partir de un foco luminoso.

**Densidad:** La densidad es una de las propiedades físicas más importantes y fáciles de medir de la materia; es la cantidad de masa contenida dentro de un volumen determinado.

**Difractograma:** Es el resultado arrojado de un análisis de Difracción de Rayos X (DRX). Determina la estructura cristalina y la composición de un material; está formado por reflexiones (picos) que corresponden a las distintas dimensiones nanométricas entre familias de planos de átomos.

**Glicerol:** Compuesto alcohólico orgánico ( $C_3H_8O_3$ ), líquido, incoloro, inodoro, presente en grasa y aceite vegetales y animales; en este trabajo es un subproducto de la reacción de transesterificación.

**Histéresis:** Tendencia de un material a conservar una de sus propiedades en ausencia del estímulo que la ha generado.

**Isoterma:** Representa la relación entre el adsorbato en la fase circundante y el adsorbato adsorbido en la superficie del adsorbente en equilibrio a temperatura constante.

**Lignocelulósico:** Materia prima más abundante disponible en el planeta para la producción de biocombustibles, principalmente bioetanol. Se compone de polímeros de carbohidratos y un polímero aromático

**Macroporo:** Material con un tamaño de poro mayor a 50 nm.

**Mesoporo:** Material con un tamaño de poro entre 2 nm y 50 nm.

---

---

**Microporo:** Material con un tamaño de poro menor a 2 nm.

**Pirólisis:** Proceso termoquímico que ocurre en ausencia de oxígeno; tiene tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y la obtención y separación de los productos.

**Poder calorífico:** Cantidad de calor generada por un kilogramo o metro cúbico de combustible al oxidarse de forma completa, es decir, durante la reacción de combustión.

**Promotor:** Sustancia no activa o poco activa que se añade en pequeñas cantidades durante la preparación del catalizador para cambiar sus características.

**Rendimiento de reacción:** Cantidad de producto producido por una reacción química. Hay tres tipos de rendimiento: teórico, real o experimental y porcentual.

**Sostenible:** Que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente.

**Transesterificación:** Reacción de equilibrio en el que los triacilglicéridos son transformados con metanol o etanol en tres ésteres metílicos separados (biodiesel) y glicerol liberado en la mezcla.

**Viscosidad:** Característica importante de un combustible, es la resistencia del líquido a fluir.

---

---

## ABREVIATURAS, SIGLAS, FÓRMULAS QUÍMICAS

**% p/p:** Porcentaje en peso/peso

**AP:** Aceite de palma (*Abreviatura usada en tabla 3*)

**APE:** Aceite de palmiste (*Abreviatura usada en tabla 3*)

**ASTM D6751:** Norma de la American Society for Testing and Materials para biodiesel puro

**ASTM D975:** Norma de la American Society for Testing and Materials para el diésel

**CA:** Nombre asignado para el Carbón Activado en el presente trabajo

**CA1:** Nombre asignado para el Carbón Activado calcinado a 550°C

**CA2:** Nombre asignado para el Carbón Activado calcinado a 650°C

**Co:** Cobalto

**EN14214:** Norma publicada por el Comité Europeo de Normalización que describe los requisitos y métodos de prueba para biodiesel

**EP:** Estearina de palma (*Abreviatura usada en tabla 3*)

**EPE:** Estearina de palmiste (*Abreviatura usada en tabla 3*)

**Fe:** Hierro

**Mo:** Molibdeno

**Mo/CA1:** Nombre asignado al catalizador de molibdeno soportado en el Carbón Activado calcinado a 550°C

**Mo/CA2:** Nombre asignado al catalizador de molibdeno soportado en el Carbón Activado calcinado a 650°C

**Ni:** Níquel

---

---

**NiMo/CA1:** Nombre asignado al catalizador de níquel-molibdeno soportado en el Carbón Activado calcinado a 550°C

**NiMo/CA2:** Nombre asignado al catalizador de níquel-molibdeno soportado en el Carbón Activado calcinado a 650°C

**OP:** Oleína de palma (*Abreviatura usada en tabla 3*)

**OPE:** Oleína de palmiste (*Abreviatura usada en tabla 3*)

**Pd:** Paladio

**Pt:** Platino

**Ru:** Rutenio

**SOP:** Superoleína de palma (*Abreviatura usada en tabla 3*)

**W:** Wolframio

**Zr:** Zirconio

---

---

## ALOJAMIENTO DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

|   |  |
|---|--|
| <b>Título de Tesis:</b>                     | Síntesis de catalizadores NiMo soportados en carbón activado para la obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de palma   |
| <b>Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:</b> | Estrella Guadalupe Arizpe Diaz   |
| <b>ORCID:</b>                               | <a href="https://orcid.org/0009-0005-0602-2037">https://orcid.org/0009-0005-0602-2037</a>  |
| <b>Resumen de la Tesis:</b>                 | <p>Una de las vías para poder disminuir la dependencia que se tiene actualmente de los combustibles fósiles es la generación de combustibles sostenibles a través de procesos ambientalmente más amigables, como la transesterificación. En este proceso se usan aceites de origen vegetal o animal que reaccionan con un alcohol de cadena corta en presencia de un catalizador, que generalmente es heterogéneo por la relativa facilidad de separación del catalizador y la eliminación de desechos.</p> <p>En esta Tesis se evaluó el efecto de níquel (Ni) y molibdeno (Mo) en la transesterificación de aceite de palma con metanol para la obtención de biodiesel, usando carbón activado (CA) como soporte de los catalizadores. Se sintetizaron catalizadores de Mo, así como de NiMo, usando carbón activado obtenido de bagazo de caña activados con HNO<sub>3</sub> y posteriormente por pirólisis a 550°C y 650 °C, se emplearon ambos carbones como soporte. Los catalizadores de Mo se sintetizaron con un contenido de 15% p/p, mientras que los catalizadores NiMo se sintetizaron con un contenido de 15% p/p de Mo y 3% p/p de Ni. Los soportes y los catalizadores se caracterizaron fisicoquímicamente mediante técnicas de fisisorción de N<sub>2</sub>, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. El rendimiento de reacción se evaluó después de la reacción de transesterificación con tres tiempos de reacción: dos, tres y cuatro horas a 60°C. Se tomaron muestras cada 60 minutos y se analizaron su densidad, viscosidad y poder calorífico como propiedades fisicoquímicas.</p> |

|  |   |
|--|---|
|  | <p>El catalizador con mayor rendimiento en la transesterificación del aceite de palma correspondió al catalizador NiMo soportado en el carbón activado a 550°C durante un tiempo de reacción de dos horas y éste fue de 48%. Los resultados de la difracción de rayos X mostraron una baja dispersión de los metales en el soporte, lo que originó pocos sitios activos catalíticos, debido principalmente a la abaja área superficial de los carbones activados, lo cual disminuyó la actividad de los catalizadores y por ende el rendimiento y la calidad del biodiesel obtenido. Esto último se pudo observar en sus propiedades fisicoquímicas, cuyos valores fueron menores a lo indicado por la ASTM D6175.</p>  |
| <p><b>Palabras claves de la Tesis:</b></p> | <p>Catalizadores, carbón activado, biodiesel, transesterificación, aceite de palma</p>  |
| <p><b>Referencias citadas:</b></p>         | <p>Adbullah, B., Faua'ad, S. A., Muhammad, S., Zhara, S., Shahrul, I., Anuar Kassim, K., Nik Mahmood, A., &amp; A. Aziz, M. M. (Febrero de 2019). Fourth generation biofuel: Areview on risks and mtigation strategies. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>, CVII, 37-50.</p> <p>Alalwan, H. A., Alminshid, A. H., &amp; Aljaafari, H. A. (Marzo de 2019). Promising evolution of biofuel generations. Subject review. <i>Renewable Energy Focus</i>, XXVIII.</p> <p>Aydogan, C. (2020). Chapter 12 - Liquid chromatography-high resolution mass spectrometry for the analysis of bioactive natural products. En C. Aydogan, &amp; Atta-ur-Rahman (Ed.), <i>Studies in Natural Products Chemistry</i> (Vol. 66, págs. 331-353). Bingöl: Elsevier.</p> <p>Ayoob, A. K., &amp; Fadhil, A. B. (Diciembre de 2019). Biodiesel production through transesterification of a mixture of non-edible oils over lithium supported on activated carbon derived from scrap tires. <i>Energy Conversion And Management</i>, CCI, 112-149.</p> <p>Balboa Palomino, A. (2018). <i>Síntesis y caracterización de catalizadores NiMo/Zr-SBA-15: Efecto de la relación Zr/Si sobre las propiedades del SBA-15</i>. Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tamaulipas.</p> |

Bardhan, P., Deka, A., Bhattacharya, S. S., Mandal, M., & Kataki, R. (2022). Chapter 18 - Economical aspect in biomass to biofuel production. En P. Bardhan, A. Deka, S. S. Bhattacharya, M. Mandal, R. Kataki, S. Yusup, & N. A. Rashidi (Edits.), *Value-chain of biofuel. Fundamentals, Technology, and Standardization* (págs. 395-427). Elsevier.

Baskar, G., Gurugulladevi, A., Nishanthini, T., Aiswarya, R., & Tamilarasan. (Abril de 2017). Optimization and kinetics of biodiesel production from Mahua oil using manganese doped zinc oxide nanocatalyst. *Renewable Energy, CII*, 641-646.

Borah, M. J., Devi, A., Borah, R., & Deka, D. (Octubre de 2018). Synthesis and application of Co doped ZnO as heterogeneous nanocatalyst for biodiesel production from non-edible oil. *Renewable energy, CXXXIII*, 512-519.

Cabello Mendoza, L. P. (2019). *Investigación y desarrollo de óxido de calcio como material sorbente de CO<sub>2</sub>, proveniente de la cáscara de huevo, de tamaño nanométrico, dopado con TiO<sub>2</sub>, PET y carbón activado*. Tesis doctoral, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Querétaro.

Cabello, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2017). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry, LXXIV*(577).

Castellar Ortega, G. C., Angulo Mercado, E. R., & Cardozo Arrieta, B. M. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospect, XII*(2), 90-104.

da Cunha Goncalves, G., Curvelo Pereira, N., & Teresinha Veit, M. (2016). Production of bio-oil and activated carbon from sugarcane bagasse and molasses. *Biomass and Bioenergy*(85), 178-186.

Dahman, Y., Syed, K., Begum, S., Roy, P., & Mohtasebi, B. (2019). 14 - Biofuels: Their characteristics and analysis. En D. Verma, E. Fortunati, S. Jain, & X. Zhang (Edits.), *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy* (págs. 277-325). Woodhead Publishing in Composites Science and Engineering.

Datta, A., Hossain, A., & Roy, S. (2019). An Overview on Biofuels and Their Advantages and Disadvantages. *Asuan Journal of Chemistry, XXXI*(8), 1851-1858.

- Elgharbawy, A. S., Sadik, W. A., Sadek, O. M., & Kasaby, M. A. (Enero de 2021). A review on biodiesel feedstock and production technologies. *Journal of the Chilean Chemical Society*, LXI(1).
- Erkey, C., & Türk, M. (2021). Chapter 6. Thermodynamics and kinetics of adsorption of metal complexes on surfaces from supercritical solutions. *Supercritical Fluid Science and Technology*, 8, 73-127.
- Farrokheh, A., Tahvildari, K., & Nozari, M. (Septiembre de 2020). Comparison of Biodiesel Production Using the Oil of Cholella Vulgaris Micro-algae by Electrolysis and Reflux Methods using CaO/KOH-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and KF/KOH-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> as Magnetic Nano catalysts. *Waste and Biomass Valorization*, XII, 3315-3329.
- Foroozandeh, A., Hatefirad, P., Safaei Mahmoudabadi, Z., & Tavasoli, A. (2023). Catalytic Activity of Synthesized Nimo Catalysts on Walnut Shell Activated Carbon for Heavy Naphtha Hydrotreating. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, XLIII(1).
- Freire Ordóñez, C., & Medrano Barboza, J. (Diciembre de 2019). Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa de producción, mediante simulación. *Perspectivas*, I(16).
- G., B., g., Kalavathy, R., A., & I., A. S. (2019). 7 Advances in bio-oil extravtion from nonedible oil seeds and algal biomass. En K. Azad, & K. Azad (Ed.), *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment* (págs. 187-210).
- Ganjali, M., & Vahdatkhah, P. (2018). Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures. En A. Barhoum, A. S. Makhlof, A. Barhoum, & A. S. Makhlof (Edits.), *Chapter 19 - Synthesis of metal nanoparticles using laser ablation technique* (págs. 575-596). Elsevier.
- García Muentes, S. A., Lafargue Pérez, F., Labrada Vázquez, B., Diaz Velázquez, M., & Sanches del Campo Lafita, A. E. (Abril de 2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la Jatropha curcas L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, XXX(1).
- Gesterio, E., Galera Gordo, J., & González Gross, M. (Junio de 2018). Aceite de palma y salud cardiovascular: consideraciones para valorar la literatura. *Nutrición Hospitalaria*, XXXV(5).
- González Jiménez, S., & Morales Hernández, S. (2019). *Monolitos de carbón activado elaborados a partir de bagazo de caña para el tratamiento y*

|  |   |
|--|---|
|  | <p><i>análisis de aguas residuales</i>. Tesis, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Cunduacán, Tabasco.</p> <p>Guzman Julio, L. (Diciembre de 2019). <i>Síntesis de biodiesel a partir de aceite extraído con CO<sub>2</sub> supercrítico de semilla de mango (Magnifera indica)</i>. Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Química, Bogotá.</p> <p>Hongloi, N., Prapainainar, P., Seubsai, A., Sudsakorn, K., &amp; Prapainainar, C. (Junio de 2019). Nickel catalyst with different supports for green diesel production. <i>Energy</i>(382), 306-320.</p> <p>Horacio Catalán, A. (Marzo de 2021). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gas de efecto invernadero en México. <i>Revista Latinoamericana de Economía</i>, LII(204).</p> <p>Iwanow, M., Gärtner, T., Sieber, V., &amp; König, B. (Junio de 2020). Activated carbon as catalyst support: precursors, preparation, modification and characterization. <i>Beilstein Journal of Organic Chemistry</i>(16), 1188-1202.</p> <p>Iwanow, M., Gärtner, T., Sieber, V., &amp; König, B. (2020). Activated carbon as catalyst support: precursors, preparation, modification and characterization. <i>Beilsteins Journal of Organic Chemistry</i>, 16, 1188-1202.</p> <p>Kohli, K., Prajapati, R., Maity, S. K., &amp; Kumar Sharma, B. (Septiembre de 2020). Effect of Silica, Activated Carbon and Alumina Supports on NiMo Catalysts for Residue Upgrading. <i>Energies</i>, XIII(4967), 1-16.</p> <p>Kumar, P., K. Maity, S., &amp; Shee, D. (2019). Role of NiMo alloy and Ni species in the performance of NiMo/Alumina catalysts for hydrodeoxygenation of stearic acid: A kinetic study. <i>ACS Omega</i>(4), 2833-2843.</p> <p>Leofanti, g., Padovan, M., Tozzola, G., &amp; Venturelli, B. (1998). Surface area and pore texture of catalysts. <i>Catalysis Today</i>, XLI(207).</p> <p>Liew, R. K., Chong, M. Y., Uyi Osazuwa, O., Nam, W. L., Phang, X. Y., Su, M. H., Cheng, C. K., Chong, C. T., &amp; Lam, S. S. (Marzo de 2018). Production of activated carbon as catalyst support by microwave pyrolysis of palm kernel shell: a comparative study of chemical versus physical activation. <i>Research on Chemical Intermediates</i>, XLIV, 3849-3865.</p> <p>M.A., Q., &amp; S., A. (2017). Chapter Four - Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS): Future prospects of carbon-negative technologies. En Q. M.A.,</p> |
|--|---|

|  |  |
|--|--|
|  | <p>A. S., M. G. Rasul, A. Kalam Azad, &amp; S. C. Sharma (Edits.), <i>Clean Energy for Sustainable Development</i> (págs. 91-140). Academic Press.</p> <p>Maleki, B., Ashraf Talesh, S., &amp; Mansouri, M. (Junio de 2022). Comparison of catalyst types performance in the generation of sustainable biodiesel via transesterification of various oil sources: a review study. <i>Materials Today Sustainability, XVIII</i>.</p> <p>Marquínez Marquínez, A. N., Loor Molina, N. S., Guamán Marquínez, C. W., Vélez Vélez, J. A., Solórzano Párraga, K. M., Rodríguez Cobeña, J. K., &amp; Riera, M. A. (Junio de 2020). Obtención de biodiesel a partir de aceite de coco (Cocos nucifera L.). <i>RIC, VI</i>(1).</p> <p>Moodley, P. (2021). 1 - Sustainable biofuels: opportunities and challenges. En P. Moodley, C. Trois, A. Joshi, B. Kanthaliya, J. Arora, J. A. Pérez Pimienta, E. Ríos del Toro, C. Alvarado Escamilla, A. C. Eloka Eboka, S. Maroa, S. Achinas, e. al, &amp; R. C. Ray (Ed.), <i>Sustainable Biofuels</i> (págs. 1-20). Academic Press.</p> <p>Nainggolan, M., &amp; Sofwan Sinaga, A. G. (Marzo de 2021). Characteristics of fatty acid composition and minor constituents of red palm oil olein and palm kernel oil combination. <i>Journal of Advanced Pharmaceutical Technology &amp; Research, XII</i>(1), 22-26.</p> <p>Narowska, B., Kulazynski, M., Lukaszewicz, M., &amp; Burchacka, E. (Mayo de 2019). Use of activated carbon as catalyst supports for biodiesel production. <i>Renewable Energy, CXXXV</i>, 176-185.</p> <p>Nasreen, S., Nafees, M., Ali Qureshi, L., Shahbaz Asad, M., Sadiq, A., &amp; Ali, S. D. (2018). Chapter 6 Review of Catalytic Transesterification Methods for Biodiesel Production. En K. Biernat (Ed.), <i>Biofuels - State of Development</i> (págs. 93-119). IntechOpen.</p> <p>Nasrollahzadeh, M., Atarod, M., Sajjadi, M., Sajadi, S. M., &amp; Issaabadi, Z. (2019). Chapter 6. Plant-Mediated Green Synthesis of Nanostructures: Mechanisms, Characterization, and Applications. En <i>Interface Science and Technology</i> (págs. 199-322). Elsevier.</p> <p>Prajapati, Y. N., &amp; Nishith, V. (2018). Hydrodesulfurization of Thiophene on Activated Carbon Fiber Supported NiMo Catalysts. <i>Energy Fuels, XXXII</i>, 2183-2196.</p> |
|--|--|

|  |  |
|--|--|
|  | <p>Rizwanul Fattah, I. M., Ong, H. C., Mahlia, T. M., Mofijur, M., Silitonga, A. S., Ashrafur Rahman, S. M., &amp; Ahmad, A. (Junio de 2020). State of the art of catalysts for biodiesel production. <i>Frontiers in Energy Research</i>, VIII(101).</p> <p>Robles Andrade, S., Silva Rodrigo, R., García Alamilla, R., Ramos Galván, R., Carrizales Martínez, G., Sandoval Robles, G., &amp; Castillo Mares, A. (2006). Carbón activado modificado como soporte para catalizadores prototipo de HDS. <i>Revista Mexicana de Ingeniería Química</i>, 5(3), 279-284.</p> <p>Rosas Saito, G. H. (2017). <i>Instituto de Ecología, A. C.</i> Retrieved Enero de 2023, from Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clpuster Científico y Tecnológico BioMimic. <a href="https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic">https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic</a></p> <p>Ruangudomsakul, M., Osakoo, N., Keawkumay, C., Kongmanklang, C., Butburee, T., Kiatphuengporn, S., Faungnawakij, K., Chanlek, N., Wittayakun, J., &amp; Khemthong, P. (Mayo de 2021). Influential properties of activated carbon on dispersion of nickel phosphides and catalytic performance in hydrodeoxygenation of palm oil. <i>Catalyst Today</i>, CCCLXVII, 153-164.</p> <p>S. Brum, S., L. Quirino, R., O. Daher, L., K. Iha, O., M. Ehlert, E., C. Rubim, J., &amp; Z. Suarez, P. A. (2022). Synthesis, Characterization and Use of Alumina Doped with TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> to Produce Biofuels from Soybean Oil by Thermal Cracking, Transesterification and Hydroesterification. <i>Journal Brazilian Chemical Society</i>, XXXIII(8), 916-926.</p> <p>SAGARPA. (2017). <i>Planeación agrícola nacional. 2017-2030. Aceite de palma mexicana</i>. Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, Subsecretaría de Agricultura, México.</p> <p>Sakthivel, R., Ramesh, K., Purnachandran, R., &amp; Mohamed Shameer, P. (2018). A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>, LXXXII, 2970-2992.</p> <p>Saynes Santillán, V., &amp; Ramírez Bribiesca, E. (Febrero de 2018). El uso de la cromatografía de gases en investigaciones de emisiones de gases de efecto invernadero del sector pecuario. <i>Agroproductividad</i>, XI(2), 81-88.</p> |
|--|--|

Servicio Geológico Mexicano. (2017). Retrieved Enero de 2023, from Difracción de rayos X. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html>

Sing, K. S., Everett, D. H., Haul, R. A., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquérol, & Siemieniowska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *International Union of Pure and Applied Chemistry*, LVII(603).

Singh, D., Sharma, D., Soni, S., Sharma, S., Kumar Sharma, P., & Jhalani, A. (Febrero de 2020). A review on feedstocks, production processes, and yield for different generation of biodiesel. *Fuel*, CCLXII.

Somyanonthanakun, W., Greszta, A., Roberts, A. J., & Thongmee, S. (2023). Sugarcane Bagasse-Derived Activated Carbon as a Potential Material for Lead Ions Removal from Aqueous Solution and Supercapacitor Energy Storage Application. *Sustainability*, VII(15).

T, A., L, V., & G, S. (2013). Studies on structural morphological, electrical and electrochemical of activated carbon prepared from sugarcane bagasse. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*(19), 1470-1476.

Tapia, J., Acelas, N. Y., López, D., & Moreno, A. (2017). NiMo-sulfide supported on activated carbon to produce renewable diesel. *Journal of the Faculty of Sciences*, 1(22).

Teuku Meurah, I. M., Norayiquin, I., Nazia, H., Arridina, S. S., & Adb, H. S. (Abril de 2019). Palm oil and its wastes as bioenergy sources: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, XXVI, 14849-14866.

Tongxin, Q., Shengli, N., Xiangyu, Z., Kuihua, H., & Chunmei, L. (Agosto de 2020). Preparation of calcium modified Zn-Ce/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterogeneous catalyst for biodiesel production through transesterification of palm oil methanol optimized by response surface methodology. *Fuel*, CCLXXXIV, 1-13.

TWI. (2022). Retrieved 12 de Octubre de 2022, from Scanning electron microscopy (SEM) analysis and imaging. <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/failure-analysis-and-repair/microscopy/scanning-electron-microscopy-sem-analysis-and-imaging>

Universidad de Alicante. (2022). Retrieved Enero de 2023, from Servicios Técnicos de Investigación. Análisis de la textura porosa de sólidos.

|  |  |
|--|--|
|  | <p><a href="https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis-termico/analisis-de-la-textura-porosa-de-solidos.html">https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis-termico/analisis-de-la-textura-porosa-de-solidos.html</a></p> <p>Vázquez Garrido, I., López Benítez, A., Guevara Lara, A., &amp; Berhault, G. (Noviembre de 2021). Synthesis of NiMo catalysts supported on Mn-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for obtaining green diesel from waste soybean oil. <i>Catalyst Today</i>, 327-340.</p> <p>Vilas Bôas, R. N., &amp; Mendes, M. F. (Enero de 2022). A review of biodiesel production from non-edible raw materials using the transesterification process with a focus on influence of feedstock composition and free fatty acids. <i>Journal Chilean Chemical Society</i>, LVII(1), 5433-5444.</p> <p>Yan, Y. (2019). 7 - Tribology and tribocorrosion testing and analysis of metallic biomaterials. En A. Amerintanzi, M. Chandrasekaran, B. Cheng, C. Cuí, A. Dehghanghadikolaei, M. Elahinia, U. Gbureck, T. Hanawa, H. Hasebe, H. Hermawan, S. Hiromoto, H. Ibrahim, M. Ito, Y. Yan, M. Niinomi, &amp; M. Niinomi (Ed.), <i>Metals for Biomedical Devices</i> (págs. 213-234). Woodhead Publishing Series in Biomaterials.</p> <p>Yang, J., Ren, S., Zhang, T., Su, Z., Long, H., Kong, M., &amp; Yao, L. (Enero de 2020). Iron doped effects on active sites formation over activated carbon supported Mn-Ce oxide catalysts for low-temperature SCR of NO. <i>Chemical Engineering Journal</i>, CCCLXXIX.</p> |
|--|--|