



**UJAT**

UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



# JEEOS

## JOURNAL OF ENERGY ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

# 2025



Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 01-2016-050908471400-203. ISSN: 2448-8186



Vol. 9 Núm. 3 (2025)



## **DIRECTORIO**

**L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO**

Rector

**DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ**  
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

**DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA**  
Secretario de Servicios Académicos

**LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO**  
Encargado del Despacho de la Secretaría de Servicios  
Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.<http://www.1atindex.unam.mx/>

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 9, No. 3, Año 2025, es una publicación continúa editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: [jeeos@ujat.mx](mailto:jeeos@ujat.mx). Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-050908471400-203, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 17 de diciembre de 2025.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores  
**EDITORA EN JEFE**

MSI. Alva del Rocío Pulido Téllez  
**GESTORA**

M.A. Pauly González Mayo    Dra. Antonia del Rocío López Guemez  
**ASISTENTE EDITORIAL Y MAQUETADO**

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano    MAEE. Mary Cruz Valenzuela Jiménez  
**ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO**

MC Sulma Guadalupe Gómez Jiménez    MC Sirleni Ordóñez Frías  
**ASISTENTE DE TRADUCCION**

**EDITORES ASOCIADOS POR ÁREA**

Dra. Angélica del Carmen Lizardo Pérez

M en C en Arq. Margarita del Carmen Noguera Miceli

Dra. Haydee Pérez Castro

Dr. Luis Manuel López Manrique

Dra. Karla María Aguilar Castro

Dr. Edgar Vicente Macias Melo

Dr. José de los Santos López Lázaro

Dra. Lizeth Rojas Blanco

Dr. Erik Ramírez Morales

M. C. Cristina Ponce Parra

Dr. Reymundo Ramírez Betancour

Dr. Emmanuel Munguía Balvanera

Dr. René Sebastián Mora Ortiz

## COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, Facultad de Ingeniería, **Universidad Autónoma de Yucatán**

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana- Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luís Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

## Índice Vol. 9 Núm. 3 (2025)

|                                                                                                                                                                                                          |              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>APROVECHAMIENTO DE LOS ESCOMBROS DE CERÁMICA COMO AGREGADO FINO EN MEZCLAS DE MORTERO</b>                                                                                                             | <b>1-14</b>  |
| De la Cruz-López L.F. <sup>1</sup> , Gómez-May E. <sup>1</sup> , Mora-Ortiz R.S. <sup>1*</sup> , Díaz-Alvarado S.A. <sup>1</sup> , Álvarez-Reyes J. <sup>2</sup>                                         |              |
| <b>ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE ABONOS ORGÁNICOS ELABORADOS CON RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PROCESADOS AERÓBICA Y ANAERÓBICAMENTE</b>                                                                          | <b>15-32</b> |
| San Juan- Martínez A. <sup>1*</sup> , Casanova-Pérez L. <sup>1</sup> , García-Alonso F. <sup>1</sup>                                                                                                     |              |
| <b>EFFECTO DE LA CONCHA DE OSTIÓN CALCINADA EN LA RESISTENCIA DEL MORTERO DE ALBAÑILERÍA</b>                                                                                                             | <b>33-46</b> |
| López-López J.M., Jiménez-Bautista J.R., Rodríguez-Martínez K.J., Mora-Ortiz R.S. <sup>*</sup> , Díaz-Alvarado S.A.                                                                                      |              |
| <b>DESAFÍOS NUMÉRICOS Y SOLUCIONES HIDRÁULICAS PRÁCTICAS A ESCALA LOCAL: CASO UNIDAD CHONTALPA, TABASCO, MEX.</b>                                                                                        | <b>47-62</b> |
| Pérez- De la Cruz A. <sup>1</sup> , Priego-Hernández G. <sup>1</sup> , Rivera-Trejo F. <sup>1*</sup>                                                                                                     |              |
| <b>ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA A PARTIR DE LODO RESIDUAL: PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO</b>                                                                                  | <b>63-78</b> |
| Contreras-Vázquez E. <sup>1</sup> , Vargas-Ibáñez L.T. <sup>2</sup> , Cano-Gómez J.J. <sup>1*</sup>                                                                                                      |              |
| <b>CUANTIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS EXTRAIDOS POR MACERACION DE SEMILLAS DE UN ÁRBOL SILVESTRE</b>                                                                                          | <b>79-92</b> |
| Juárez-Madrado E. <sup>1</sup> , Pantoja-Castro M. A. <sup>1*</sup> , García-Gómez J.O. <sup>2</sup> , Vázquez-Guerrero A. <sup>2</sup> , Del Ángel-Meraz E. <sup>1</sup> , Rojas-Blanco L. <sup>1</sup> |              |

## ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA A PARTIR DE LODO RESIDUAL: PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO

### LIFE CYCLE ANALYSIS OF BIO-JET FUEL PRODUCTION FROM SEWAGE SLUDGE: APPROACH AND DEVELOPMENT

Contreras-Vázquez E.<sup>1</sup>, Vargas-Ibáñez L.T.<sup>2</sup>, Cano-Gómez J.J.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P: 66455, México

<sup>2</sup>IFP Energies Nouvelles, 1-4 Av. Bois Préau, Rueil Malmaison, Paris, Francia.

\*jose.canogmz@uanl.edu.mx\*

#### Artículo Científico

Publicado: 17 de diciembre 2025

#### RESUMEN

La aviación contribuye globalmente con el 2% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Asociaciones de aviación han establecido compromisos para reducir las emisiones netas de CO<sub>2</sub> a cero para el 2050. El uso de biocombustibles como la bioturbosina sintetizada a partir de fuentes renovables ha despertado el interés de la comunidad científica para cumplir los compromisos. Este trabajo, tiene como objetivo plantear y desarrollar las primeras etapas del proceso de valorización de lodos de agua residual para la producción de bioturbosina mediante hidroprocesamiento (HEFA) empleando análisis de ciclo de vida (ACV). Se utilizó como unidad funcional la gestión de 1 kg de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales localizada en el estado de Nuevo León. El trabajo aporta los inventarios de ciclo de vida (ICV) necesarios para evaluar el perfil ambiental de dos escenarios; los cuales consideran el uso de dos catalizadores diferentes para la producción de bioturbosina: a) Ni/SAPO-11 y b) Cu/SAPO-11. A partir de

los ICV, se concluyó que el escenario a) mostró mayor demanda de insumos que el escenario b). Sin embargo, no hay una diferencia significativa entre los consumos energéticos consecuencia en la similitud entre las propiedades fisicoquímicas y de transferencia de calor de los insumos.

**Palabras clave:** Análisis de ciclo de vida; Bioturbosina; Impacto ambiental; lodos residuales.

#### ABSTRACT

Aviation contributes 2% of global CO<sub>2</sub> emissions. Aviation associations have committed to reducing net CO<sub>2</sub> emissions to zero by 2050. The use of biofuels, such as those synthesized from renewable sources, has sparked interest in the scientific community to meet these commitments. This work aims to propose and develop the initial stages of the wastewater sludge valorization process for biofuel production through hydroprocessing (HEFA) using life cycle assessments (LCAs). The functional unit used was the management of 1 kg of

sludge from a wastewater treatment plant located in the state of Nuevo León. The work provides the life cycle inventories (LCIs) necessary to assess the environmental profile of two scenarios, which consider the use of two different catalysts for biofuel production: a) Ni/SAPO-11 and b) Cu/SAPO-11. From the ICVs, it was concluded that scenario a) showed a higher demand for inputs than scenario b). However, there is no significant difference in the energy consumption, resulting in similarity between the physicochemical and heat transfer properties of the inputs.

**Keywords:** Bio-jet fuel; Environmental impact; Life cycle analysis; Waste sludge.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años, la aviación civil ha emitido al ambiente 2% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> [1]. Diversos organismos han predicho que, si se sigue la tendencia actual, el porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub> con el que contribuye la industria de la aviación civil podría aumentar hasta 3% para el 2050 [2]. Organizaciones internacionales de aviación, como la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (ATAI), han establecido metas como el “*Fly Net Zero*” enfocados en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por el sector [2].

El *Fly Net Zero* ha propuesto alternativas como las trampas de carbono y tecnología basada en el aprovechamiento de H<sub>2</sub>. Dentro de estas iniciativas, una de las

alternativas que ha cobrado mayor relevancia es el uso de combustibles sustentables para la aviación (CSA) [2]. Los CSA son combustibles que tienen potencial para ser usados en las turbinas de aviones civiles, los cuales son sintetizados a partir de biomasa [1]. Uno de los CSA que ha despertado el interés de la comunidad científica y el sector de la aviación civil es la bioturbosina (BT), según estimaciones de la ATAI su uso podría reducir hasta en un 80% las emisiones de CO<sub>2</sub> [2]. Tan solo en 2019, se produjeron 140 millones de toneladas de BT a nivel mundial [3].

Las principales materias primas utilizadas en la producción de BT son de origen vegetal, como el aceite de palma y el aceite de jatrofa [1,4,5]; estas materias primas son atractivas para la producción de BT ya que poseen una alta pureza y son renovables [1], sin embargo, su uso suele aumentar los costos de producción debido al cultivo y extracción de los frutos y flores de donde se obtiene el aceite vegetal [1]. El uso de residuos industriales como materia prima para la producción de biocombustibles ha cobrado mayor interés alrededor del mundo [6,7], su uso podría reducir los costos de producción y proponer una alternativa para la disposición final, disminuyendo así el volumen de residuos. Algunos trabajos han investigado el uso de residuos vegetales, animales e industriales para la producción de BT [8].

Uno de los residuos industriales con potencial uso como materia prima para la producción de BT es el lodo residual (LR) generado en las plantas de tratamiento de

aguas residuales (PTAR). Este lodo presenta una composición variable según el tipo de efluente de aguas tratadas, puede llegar a contener hasta 60% en peso de ácidos grasos libres que pueden ser aprovechados como materia prima en la producción de biocombustibles [9]. Generalmente, este desecho es dispuesto mediante métodos convencionales de disposición de residuos como la incineración o la confinación, representado hasta el 50% de los costos operativos de una PTAR convencional [9]. Además, el uso de LR como materia prima representa una alternativa ambiental y económicamente favorable frente a fuentes vegetales, al aprovechar un residuo disponible, reducir emisiones asociadas a su disposición y evitar el uso de recursos agrícolas, además de disminuir los costos de materia prima y promover un modelo de economía circular.

La BT es una mezcla de hidrocarburos con cadenas  $C_8$ - $C_{16}$  principalmente sintetizada mediante dos metodologías: *i)* Fischer-Tropsch (FT) e *ii)* Hidroprocesamiento (HEFA) [1]. El proceso de FT permite reaccionar el gas de síntesis ( $CO$  y  $H_2$ ) para la producción de hidrocarburos líquidos (alcanos y alquenos) en presencia de catalizadores a condiciones de temperatura desde los (200 a 350) °C y presiones de (10 a 40) bar. Estos combustibles contienen baja concentraciones de compuestos azufrados y aromáticos, por lo que se les considera como una alternativa verde, sin embargo, la baja eficiencia operativa (25%) y baja densidad energética

aumenta los costos de producción del biocombustible. Por su parte, HEFA hace uso de aceites vegetales y residuos como el aceite de cocina usado (ACU) como materia prima en los procesos de producción de BT. La BT sintetizada por HEFA ha mostrado una mayor densidad energética que su homólogo sintetizado mediante FT permitiendo su mezcla con turbosina fósil. El HEFA consiste en la remoción de las moléculas de oxígeno presentes en los ácidos grasos libres a condiciones de presión entre 2–4 MPa y temperaturas de 300 – 350 °C mediante las reacciones de descarbonilación y descarboxilación en presencia de catalizadores heterogéneos.

Si bien se ha reportado que el uso de BT como alternativa de la turbosina fósil en aeronaves civiles reduce las emisiones de GEI, factores como el método y ruta de síntesis, así como la materia prima empleada para la producción, afectan en mayor o menor medida la contribución al impacto ambiental que se asocia a la producción del nuevo biocombustible [10,11]. Por este motivo, es pertinente estimar el impacto ambiental asociado al proceso de producción de BT. El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología estandarizada (ISO 14040 y 14044) [12] que permite evaluar e interpretar el impacto ambiental de un proceso, producto o servicio considerando las diferentes etapas del ciclo del producto, por ejemplo, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final.

El objetivo de este trabajo es presentar las etapas iniciales para realizar una

evaluación de impacto ambiental del proceso de producción de BT mediante el HEFA catalítico, empleando lodos de agua residual como fuente de materia prima. En este trabajo se define el objetivo y el alcance del estudio, y se presenta el inventario necesario para llevar a cabo el ACV de la producción de BT a partir de lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de aguas ubicada en el estado de Nuevo León, México.

## ANTECEDENTES

### Rutas de síntesis de bioturbosina y materias primas para su producción.

Existen diferentes rutas de síntesis y diversidad de materias primas para la producción de BT. Liu et al. (2014) [5] sintetizaron BT a partir de aceite de palma mediante HEFA en presencia de catalizadores heterogéneos de Ni/SAPO-11 sintetizados mediante el método de impregnación, variando la carga en peso del metal soportado de 2% a 9%. Reactor tubular de alta presión fue utilizado bajo una atmósfera de  $H_2$  (4MPa) y temperatura de 200°C, obteniendo rendimientos del 70% en la producción de alcanos ( $C_5$ - $C_{18}$ ) a un tiempo de reacción de 5 h, mientras que a tiempos mayores (5-6 horas), los autores observaron que el rendimiento en la producción de alcanos e isómeros disminuyó hasta un 60% y 46%, respectivamente. Eller et al. (2016) [12], propusieron catalizadores de NiMo/ $Al_2O_3$  y Pt/SAPO-11 para llevar a cabo la producción de BT utilizando aceite de coco como materia prima en dos etapas (HEFA e isomerización). Los autores observaron que variando la temperatura desde 260 °C a 380 °C y manteniendo la

presión constante en 4 MPa de  $H_2$ , se alcanza un rendimiento máximo aproximado de 57% en la producción de BT. Por otro lado, Hanaoka et al. (2015) [13] utilizaron madera como materia prima para la síntesis de bioturbosina mediante FT, empleando catalizadores de Pt soportados sobre diferentes tipos de zeolitas. Los catalizadores fueron preparados mediante el método de impregnación utilizando zeolitas tipo b-zeolita (BEA), modernita (MOR) y Y-zeolita (FAU) como soporte de los catalizadores. La reacción de hidrocrackeo se llevó a cabo en una auto clave de acero inoxidable a 250 °C y 1 MPa de presión de  $H_2$ . Los autores mencionaron que los catalizadores soportados sobre zeolitas tipo BEA mostraron mayor rendimiento en la producción de BT (36.2%) comparado con los catalizadores que utilizaron zeolitas tipo FAU y MOR, con rendimientos de 2.4% y 4.1%, respectivamente.

Recientemente, Vedachalam et al. (2021) [14] propusieron utilizar HEFA para sintetizar BT a partir de cera residual, utilizando catalizadores de Pt soportados sobre materiales a base de Si y Al. La reacción se llevó a cabo a 330 °C y 5 MPa de presión de hidrógeno. Los autores reportaron que los procesos de hidrocrackeo e hidro isomerización de los hidrocarburos presentes en la cera residual se ven desfavorecidos a una baja relación de Al/Si, mientras que a mayor relación Al/Si, ambos procesos se ven favorecidos como consecuencia de la mayor cantidad de sitios ácidos en el soporte.

En la **Tabla 1** se muestra de manera sintética las principales condiciones para la producción de BT (catalizadores, materia prima, condiciones de operación y rendimientos) reportados por los trabajos

discutidos anteriormente. A nuestro conocimiento, en literatura no existen reportes acerca de la producción de BT a partir de lodos residuales.

**Tabla 1.** Resumen de Antecedentes: Síntesis de Bioturbosina Realizado por otros autores

| Autor                         | Materia prima   | Catalizador                                            | Condiciones                                | Rendimiento      |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------|
| Liu et al. (2014) [5]         | Aceite de palma | 2% Ni/SAPO-11                                          | 4 MPa de H <sub>2</sub><br>200 °C          | n-parafinas: 70% |
| Eller et al. (2016) [12]      | Aceite de coco  | NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>0.5% Pt/SAPO-11 | 4 MPa de H <sub>2</sub><br>260 °C - 380 °C | n-parafinas: 50% |
| Hanaoka et al. (2015) [13]    | Madera          | Pt/ b-zeolitas                                         | 1 MPa de H <sub>2</sub><br>250 °C          | n-parafinas: 36% |
| Vedachalam et al. (2021) [14] | Cera residual   | Pt/ Al-TUD-1 (10)                                      | 5 MPa de H <sub>2</sub><br>330 °C          | n-parafinas: 96% |

### Evaluación del impacto ambiental.

Diferentes materias primas como aceites vegetales y residuos han sido implementadas para la producción de biocombustibles; no obstante, su uso como fuente de carbono no garantiza que se disminuya el impacto ambiental comparado con los procesos fósiles convencionales. Por lo cual, distintos autores han utilizado la metodología de ACV para evaluar distintos indicadores ambientales que permitan elucidar el impacto ambiental de las diferentes metodologías de producción de BT. Agusdinata et al. (2011) [15], evaluaron el impacto ambiental de la producción de BT en los Estados Unidos. Analizaron cinco materias primas: aceite de camelia, aceite de alga, pasto de escoba, rastrojo de maíz y cultivos leñosos, empleando HEFA y FT como métodos de síntesis. Los autores seleccionaron para la producción de BT, 1 gal como unidad funcional delimitando como fronteras de estudio desde el cultivo de las materias primas hasta el

almacenaje del combustible. Los autores elaboraron el inventario del ACV en función de datos promedio dentro de la zona de estudio (Estados Unidos) considerando la producción de materia prima, rendimiento de crecimiento de los cultivos, demanda energética, entre otros. Suministro de la red eléctrica de Estados Unidos fue considerado, mientras que, para la recolección de las distintas materias primas, se tomó en cuenta una variación entre el 50 y 70%. Los factores de emisión del IPCC AR4 fueron usados para evaluar el indicador de cambio climático. Los autores encontraron que los escenarios donde se utilizó una materia prima con base oleica, como el aceite de camelia y aceite de alga, presentaron mayor contribución al impacto ambiental (78 g CO<sub>2</sub> eq/UF y 85 g CO<sub>2</sub> eq/UF, respectivamente) siendo la etapa de cultivo la que contribuyó con el 70% – 90% de las emisiones de gases de efecto invernadero totales.

Klein et al. (2018) [11], realizaron un análisis técnico-económico y de impacto ambiental de la producción de BT en una biorrefinería situada en Brasil. Los autores estudiaron diferentes rutas de producción: HEFA, FT y alcohol a turbosina (ATJ). Los autores analizaron ocho escenarios con distintos métodos de producción y materias primas como mezclas de aceites de primera generación (1G) (macuba, palma y soya) para los escenarios donde se utilizó HEFA como ruta de síntesis, mientras que para los escenarios de FT y ATJ, el bagazo y la paja de la caña de azúcar fueron seleccionados. El inventario del ACV fue elaborado a partir de los balances de masa y energía de los ocho escenarios propuestos mediante el simulador Aspen Plus 8.6. El estudio contemplo en sus alcances desde el cultivo hasta la combustión de la BT. Además, consideraron el uso de biorrefinerías para la producción de energía a partir de caña de azúcar y desechos para satisfacer la demanda energética de todo el proceso de producción. Los autores observaron que los escenarios donde se empleó HEFA presentan mayor consumo de insumos (0.34 y 0.4 Mt/año), respecto a los escenarios donde se emplean las rutas de producción de FT y ATJ. Por otro lado, los autores encontraron que, para los escenarios estudiados, la producción de BT presentó una menor contribución en los indicadores de cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles, comparados con la turbosina fósil. Así mismo, los escenarios de FT mostraron la menor contribución al indicador de cambio climático (9 gCO<sub>2</sub>eq/MJ) comparado con

los procesos de ATJ (20 gCO<sub>2</sub>eq/MJ) y HEFA (18 gCO<sub>2</sub>eq/MJ). Esta condición se atribuyó al uso de caña de azúcar y residuos de la caña de azúcar como materia prima.

De manera similar, Liu et al. (2021) [4], llevaron a cabo el análisis técnico-económico del proceso de producción de bioturbosina a partir de una mezcla de aceites vegetales de semillas de jatrofa y ricino en China, considerando 1 MJ de energía producida como unidad funcional. Las fronteras del sistema incluyeron desde la obtención del fruto hasta la combustión de la BT. Los autores construyeron el inventario en función de datos obtenidos con productores a través de una encuesta donde observaron que, en términos generales, la producción de aceite de jatrofa requiere de una mayor extensión de tierra (0.0013 - 0.0070 ha/UF), mayor demanda de energía eléctrica (0.62 - 1.05 kWh/UF) y de insumos como el diésel (0.3357-0.3387 l/UF) comparado con la producción del aceite de ricino (0.0010-0.0027 ha/UF, 0.4486 kWh/UF, 0.0051 l/UF). Los autores reportaron que el potencial de cambio climático y potencial de acidificación terrestre se redujeron un 36% y 85%, respectivamente, comparado con la turbosina fósil. Esta reducción en los indicadores se debe principalmente a la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero y sustancias ácidas durante el proceso de producción de bioturbosina, respectivamente.

Recientemente, Vela-García et al. (2021) [16] realizaron el ACV de la producción de BT a partir de residuos del cultivo de

biomasa lignocelulósica y aceite de albaricoque. Los autores simularon mediante Aspen Plus 11 el proceso de producción de turbosina empleando HEFA con el fin de calcular los requerimientos máxicos y energéticos, estableciendo como base de cálculo 4.68 t/h de aceite de albaricoque con un 90% de conversión hacía la formación de BT. Los autores consideraron 1 MJ de BT como unidad funcional y evaluaron dos indicadores ambientales (indicador de cambio climático y consumo de agua). Las fronteras del sistema consideraron desde el cultivo de la biomasa hasta la obtención del combustible. Los autores concluyeron que la contribución al indicador de cambio climático del proceso depende de la fuente de obtención y consumo del hidrógeno que se utiliza durante las reacciones de descarboxilación, obteniendo un valor

aproximado de 30 gCO<sub>2</sub>eq/UF y un consumo energético de 10 MJ/UF.

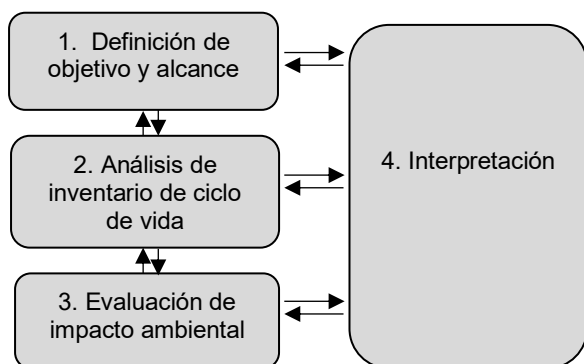
En la **Tabla 2**, se muestra el compilado de consideraciones (unidad funcional, límites de estudio, base de datos, metodología de evaluación e indicadores ambientales evaluados) de los autores que se mencionaron anteriormente. A la fecha, según nuestro conocimiento no se han encontrado reportes sobre la construcción de inventarios de ciclo de vida necesarios para la evaluación del perfil ambiental de proceso de producción de BT a partir de lodos residuales. Esta brecha motiva el presente trabajo, que busca la construcción de un inventario de ciclo de vida para la producción de BT mediante HEFA a partir de LR, utilizando catalizadores de Ni/SAPO-11 y Cu/SAPO-11.

**Tabla 2.** Resumen de Antecedentes: Análisis de Ciclo de Vida.

| Autor                          | Unidad funcional | Límites de estudio    | Método de evaluación | Indicadores ambientales                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------|------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agusdinata et al. (2011) [15]  | 1 gal de BT      | Cultivo a almacenaje  | IPCC AR4 2007        | Indicador de cambio climático                                                                                                                                                            |
| Klein et al. (2018) [11]       | 4Mt/ año         | Cultivo a combustión  | ReCiPe 2008          | Midpoint<br>Indicador de cambio climático<br>Indicador de toxicidad humana<br>Indicador de acidificación terrestre<br>Indicador de eutroficación                                         |
| Liu et al. (2021) [4]          | 1 MJ BT          | Cultivo a combustión  | CML 2001             | Indicador de cambio climático<br>Indicador de toxicidad humana<br>Indicador de formación de oxidantes fotoquímicos<br>Indicador de acidificación terrestre<br>Indicador de eutroficación |
| Vela-García et al. (2021) [16] | 1 MJ BT          | Cultivo a Combustible | No especificado      | Indicador de cambio climático                                                                                                                                                            |

## METODOLOGÍA

El ACV es una metodología iterativa estandarizada por las normas ISO 14040–14044 [17,18]. Se divide en cuatro etapas principales: 1.- Definición del objetivo y alcance, 2.- Inventario de análisis de ciclo de vida, 3.- Evaluación de impacto ambiental y 4.- Interpretación de resultados. En esta sección, se desarrollan las dos primeras etapas del ACV y se mencionan las diferentes consideraciones que se deben tomar en cuenta para desarrollar el análisis de ciclo de vida para la revalorización de los lodos residuales a biocombustibles. La **Figura 1** muestra la metodología que se utiliza para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida de acuerdo con las normas ISO 14040 e ISO 14044.



**Figura 1.** Metodología Estandarizada para el Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040 e ISO 14044).

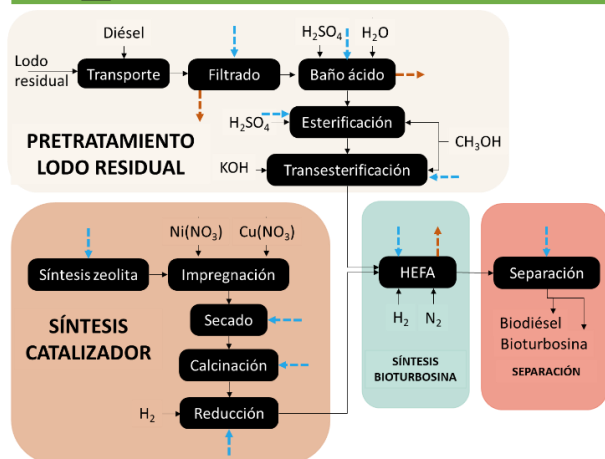
El desarrollo de las etapas 1 y 2 del ACV determina la calidad en los resultados obtenidos durante la evaluación del impacto ambiental y facilita la interpretación de los resultados, por lo que, su correcto planteamiento y desarrollo es de interés.

**Definición del objetivo y alcances.** El propósito de este estudio es establecer las bases y definir las primeras etapas para determinar el potencial de impacto ambiental del proceso de producción de BT a escala laboratorio, utilizando la metodología HEFA y empleando como materia prima lodo residual de una planta de tratamiento de aguas de Nuevo León (México); considerando los alcances desde la recolección del lodo residual hasta la producción del biocombustible.

La **Figura 2** muestra el diagrama de bloques de la metodología empleada para la producción de bioturbosina. Para esta primera aproximación y definición de las etapas del ACV de la producción de bioturbosina se consideraron dos escenarios de producción en los que se consideran dos catalizadores: a) Ni/SAPO-11 y b) Cu/SAPO-11. El rendimiento en la producción de BT fue calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{m_{BT}}{m_{biodiesel}} \quad (1)$$

donde  $m_{BT}$  es la masa de la BT obtenida en la etapa de separación (destilación), y  $m_{biodiesel}$  es la masa de biodiésel obtenida en las etapas de esterificación-transesterificación. Es importante mencionar que en el balance de materia se ha considerado la producción de biodiésel como co-producto.



**Figura 2.** Diagrama de Bloques de la Metodología de Producción de Bioturbosina. -->, Energía Eléctrica; -->, Residuos.

**Unidad funcional y fronteras del sistema.** En este trabajo, se establece como unidad funcional (UF) la gestión de 1 kg de lodo residual de la PTAR noroeste de la Zona Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México.

La **Figura 3** muestra las fronteras del sistema en este análisis, se puede observar que para el ACV se considera desde la recolección de los lodos en la PTAR hasta la producción de BT.

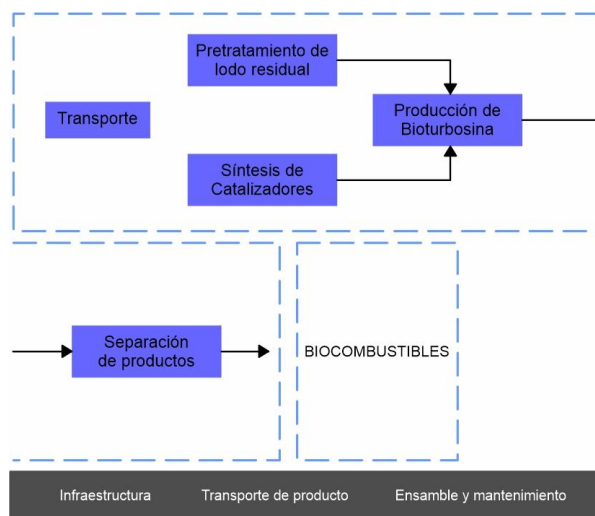
El proceso de producción consta de 2 etapas generales:

- i) Transporte de lodo residual: Distancia recorrida desde la planta de tratamiento de aguas residuales, hasta el lugar de producción de la BT. Distancia aproximada de 20 km.
- ii) Síntesis de BT: Se conforma de cuatro subetapas, i) Pretratamiento de lodo residual, ii) Síntesis de catalizadores, iii) Producción de BT a partir de ácidos grasos esterificados (ver Figura 2) y iv)

Separación de productos mediante destilación.

Para este estudio se excluyen los impactos relacionados con: la infraestructura del complejo, ensamble y mantenimiento de equipos ya que se considera que su funcionamiento se dará por un tiempo prolongado, por lo que su contribución al impacto ambiental será mínimo comparado con el proceso de gestión de los lodos. Además, se ha demostrado que su contribución al impacto ambiental general es menor al 2%.

Se seleccionó la base de datos de ecoinvent V.3.7. cutoff. Lo anterior fue seleccionado luego de la comparación con trabajos similares, mismos que evaluaron las emisiones vinculadas al uso de los reactivos y servicios. Se consideró un panorama mexicano para el mix energético.



**Figura 3.** Fronteras del Sistema para la Producción de Bioturbosina a partir de Lodos Residuales. --- Fronteras de Estudio; ■, Fuera de las Fronteras del Estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

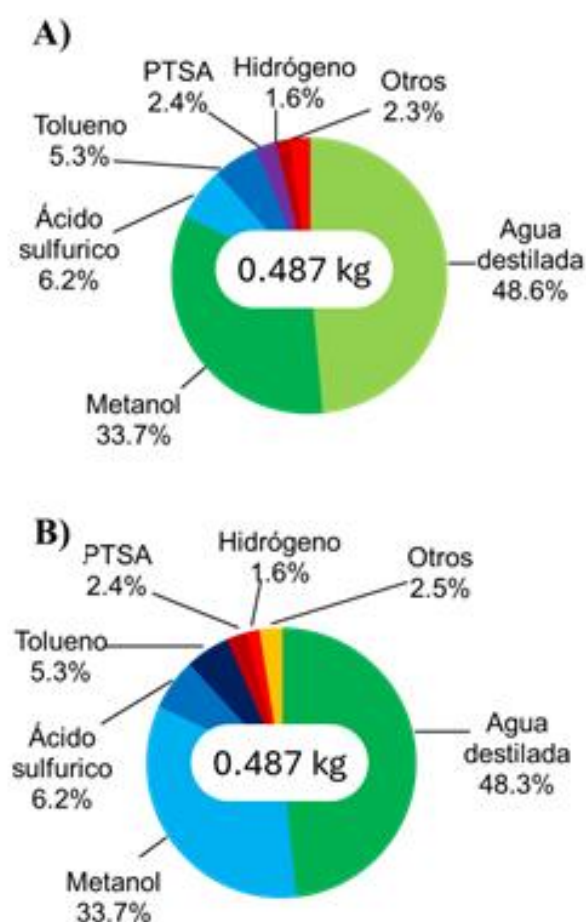
**Inventario de ciclo de vida.** El inventario de ciclo de vida recopila la demanda energética y de insumos requeridos para llevar a cabo la producción del proceso que se está estudiando. El inventario de ciclo de vida se formó a partir de los balances de materia y energía del proceso de producción.

**Balance de masa.** Para el transporte de lodos se consideró un camión de carga tipo 6 con capacidad de carga de 10,319.5 kg. Para la producción de BT se obtuvieron rendimientos de 31.1% y 53.4% usando los catalizadores de Ni y Cu soportados en SAPO-11, respectivamente. De esta manera, biodiésel que no ha reaccionado se encuentra presente como co-producto.

La **Figura 4** muestra el inventario de los diferentes insumos necesarios para gestionar 1 kg de lodos residuales para los escenarios de producción de BT utilizando los catalizadores de: a) Ni/SAPO-11 y b) Cu/SAPO-11. Se puede observar que el agua destilada, metanol y ácido sulfúrico son los insumos que se requieren en mayor medida en los dos escenarios. Lo anterior, se debe a la etapa de pretratamiento de los lodos residuales donde se emplean soluciones ácidas para la extracción de las grasas del lodo residual y se llevan a cabo reacciones de esterificación y transesterificación.

Por otro lado, para la producción de BT empleando catalizadores de Ni y Cu se consumen aproximadamente 0.00764 kg  $H_2/UF$  y 0.00763 kg  $H_2/UF$ ,

respectivamente. Esta diferencia nos indica que el impacto ambiental del uso de ambos catalizadores es semejante. Por otro lado, el consumo global de insumos no se ve afectado por el tipo de catalizadores. Lo anterior, se atribuye a que las cargas de los catalizadores son equivalentes y la mayor contribución másica corresponde a la etapa de pretratamiento (88%), en la cual los catalizadores no intervienen.

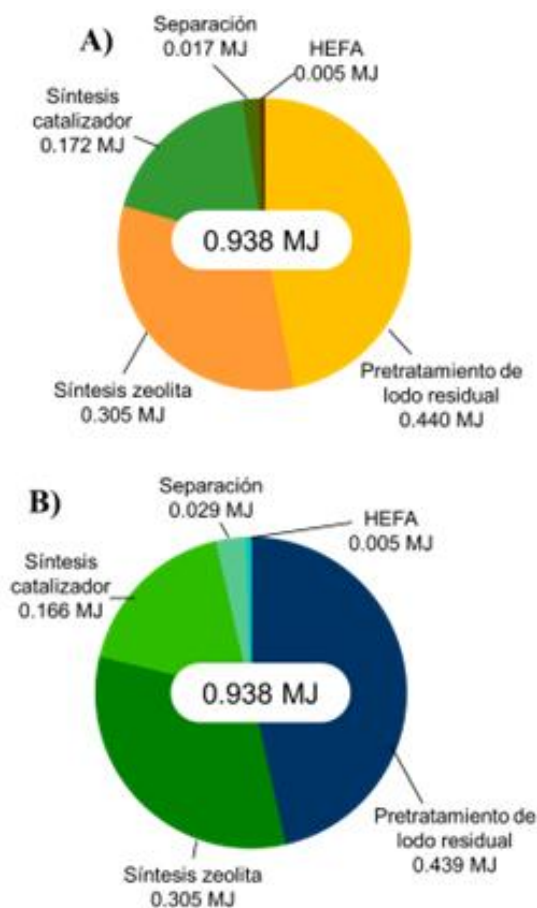


**Figura 4.** Distribución de Materia Prima Requerida para la Gestión de 1 kg de Lodo Residual. A) Catalizador de Ni/SAPO-11; B) Catalizador de Cu/APO-11.

**Balances de energía.** Los balances de energía se llevaron a cabo con base en los modelos propuestos por Piccinno et al. (2016) [19] para operaciones de mezclado y separación. Por otro lado, se utilizaron los modelos propuestos por Rayleigh [20] para operaciones de calentamiento y de transferencia de calor. Las propiedades fisicoquímicas y de transporte del oleato y *n*-dodecano fueron utilizadas para aproximar el requerimiento energético de los biocombustibles producidos (biodiésel y bioturbosina, respectivamente) en los procesos de síntesis del combustible y separación de los productos ya que son los compuestos que se encuentran en mayor proporción dentro de los combustibles. La **Figura 5** muestra la demanda energética por etapa del proceso de producción de BT planteado en este trabajo. Se puede observar que el requerimiento energético global de los dos escenarios estudiados es idéntico. Lo anterior se debe a que la etapa de pretratamiento de lodo residual es igual en los dos escenarios evaluados, mientras que en la etapa de HEFA, la contribución de los catalizadores heterogéneos (Ni y Cu) a las propiedades de transferencia de calor de la mezcla reactiva es mínima comparado con las demás especies presentes en la reacción. No obstante, existen diferencias en la demanda energética de otras etapas del proceso de producción cuando se comparan los dos escenarios.

La diferencia en el consumo energético para la etapa de síntesis de los catalizadores es resultado de la variación que existe entre las propiedades fisicoquímicas y de transferencia de calor

de los precursores  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  y  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  utilizados para la síntesis de los catalizadores



**Figura 5.** Comparación entre la Demanda Energética de los Escenarios Estudiados. A) Catalizador de Ni/SAPO-11; B) Cu/SAPO-11.

Adicionalmente, propiedades como la viscosidad, densidad y conductividad térmica intervienen en los procesos de transferencia de calor, mantenimiento de la temperatura y potencia de mezclado, por lo que la diferencia entre las propiedades de los catalizadores tiene un efecto en la demanda energética para procesos como el mezclado de las soluciones, secado, calcinación y reducción de los catalizadores.

En cuanto a la etapa de separación, la diferencia en la demanda energética entre los dos escenarios estudiados se debe al rendimiento del proceso de producción de BT. La **Figura 5**, muestra un ligero incremento en el consumo energético de la etapa de separación al utilizar el catalizador de Cu. Esto se puede explicar con base a los rendimientos obtenidos en la producción de BT. Cu/SAPO-11 presenta rendimientos del 53% mientras que Ni/SAPO-11 del 31%. Lo anterior, implica mayor cantidad de materia sometida al proceso de destilación cuando se utiliza Cu/SAPO-11 como catalizador, incrementando el consumo energético.

En términos de consumo energético (kWh), los dos escenarios propuestos en este trabajo presentan una demanda energética de 0.251 kWh, la cual es menor al requerimiento energético reportado por el estudio de Liu et al. (2021) (0.62 kWh) [4], donde se emplea aceite de jatrofa y de ricino como materia prima para la producción de BT, lo que representa mayor consumo energético debido a las etapas de cultivo y descascarado de las semillas. Por lo anterior, el uso de lodos residuales como materia prima para la producción de BT representa un ahorro energético de aproximadamente el 60%.

Conforme a los resultados obtenidos, el llevar a una escala más grande el proceso de producción de BT a partir de lodos residuales, es importante establecer medidas que ayuden a eficientizar los procesos con mayor demanda energética y de insumos, a través de redes de intercambio de calor que permitan aprovechar el flujo de calor de otras corrientes. Por otro lado, se podría

recircular de agua tratada para su uso como corriente de servicio y alternativas para el uso de reactivos como el  $H_2SO_4$  y el metanol.

Este estudio presenta limitaciones derivadas de su desarrollado a escala laboratorio, rendimiento y consumos podrían variar a un escenario industrial debido a la eficiencia de los equipos y a la variabilidad del lodo residual. Asimismo, el análisis no considera la construcción, mantenimiento e infraestructura del proceso, los cuales adquieren una contribución relevante en escenarios industriales donde el consumo de materiales, agua y energía es mayor. A nivel industrial, la recuperación de energía, agua y reactivos, así como el origen del hidrógeno, podrían modificar el impacto ambiental, por lo que los resultados deben interpretarse como una aproximación preliminar sujeta a validación mediante estudios de escalamiento.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se definió el objetivo, alcance e inventario de ciclo de vida del ACV para la producción de BT a partir de lodo residual bajo dos escenarios distintos de síntesis de: a) catalizador Ni/SAPO-11 y b) catalizador Cu/SAPO-11.

En función del inventario de análisis de ciclo de vida se puede concluir que no hay una diferencia significativa en la demanda de insumos y energía entre los dos escenarios estudiados para la gestión de 1 kg de lodo residual. Sin embargo, existen ligeras diferencias entre la demanda energética en las etapas de

síntesis de catalizadores y separación como consecuencia de las variaciones entre las propiedades fisicoquímicas como la densidad, viscosidad y conductividad térmica de los precursores empleados. La etapa de pretratamiento del lodo residual es la etapa que demanda mayor cantidad de insumos (88.20% de los insumos totales) y energía (46.91% de la demanda energética total) como consecuencia del uso de metanol, ácido sulfúrico y agua para extraer las grasas de los lodos residuales, así como para llevar a cabo las reacciones de esterificación y transesterificación.

En el escenario de Cu/SAPO-11, se observó que la etapa de separación de los productos presenta una mayor demanda energética (0.029 MJ) como consecuencia de una mayor producción de BT comparado con el escenario del Ni/SAPO-11 (0.017 MJ). Para ambos escenarios, la etapa HEFA fue la que presentó la menor demanda energética entre todas las etapas del proceso (0.005 MJ).

El desarrollo de este trabajo sienta bases firmes para la evaluación del impacto ambiental a través de distintos indicadores medioambientales del proceso de producción de BT bajo dos escenarios de síntesis de catalizadores. Lo anterior facilitará identificar áreas de mejora que posibiliten reducir la contribución al impacto ambiental por la producción de un nuevo biocombustible a partir de lodos residuales.

Finalmente, este estudio demuestra el potencial de los LR como materia prima sostenible para la producción de BT, ofreciendo posibles beneficios ambientales, económicos y tecnológicos.

Además, los resultados pueden orientar el desarrollo de políticas públicas y estrategias regionales que promuevan la descarbonización del sector aeronáutico y la transición hacia una economía circular en México y Latinoamérica.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido apoyado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) con el proyecto CBF2023-2024-1830 y por la Universidad Autónoma de Nuevo León en la convocatoria PROACTI, con el número 134-IDT-2024.

## REFERENCIAS

- [1] Yang, J., Xin, Z., He, Q. S., Corscadden, K., and Niu, H. (2019). An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. *Fuel*, 237: 916–936. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.079>
- [2] Asociación de Transporte Aéreo Internacional – IATA. (s.f.). Our Commitment to Fly Net Zero by 2050. Asociación de Transporte Aéreo Internacional. Montreal, Canadá. 5 p. Recuperado de <https://shorturl.at/vGK05> (consulta: 28 junio 2023).
- [3] Agencia Internacional de Energías Renovables – IRENA. (2021). Reaching zero with renewables: Biojet fuels. Agencia Internacional de Energías Renovables. Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos. 60 p. Recuperado de [www.irena.org](http://www.irena.org) (consulta: 15 julio 2023).
- [4] Liu, H., Zhang, C., Tian, H., Li, L., Wang, X., and Qiu, T. (2021). Environmental

- and techno-economic analyses of bio-jet fuel produced from jatropha and castor oilseeds in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26: 1071–1084. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01914-0>
- [5] Liu, Q., Zuo, H., Zhang, Q., Wang, T., and Ma, L. (2014). Hydrodeoxygenation of palm oil to hydrocarbon fuels over Ni/SAPO-11 catalysts. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 35(5): 748–756. [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(12\)60710-4](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(12)60710-4)
- [6] Badlam, J., Cox, J., Mehta, N., O'Rourke, S., and Silvis, J. (2022). The Inflation Reduction Act: Here's what's in it. McKinsey & Company. Washington, D.C., EUA. 12 p. Recuperado de <https://shorturl.at/bDR34> (consulta: 18 diciembre 2023).
- [7] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2022, 7 de junio). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Diario Oficial de la Unión Europea. Bruselas, Bélgica. 128 p.
- [8] Li, T., Cheng, J., Huang, R., Zhou, J., and Cen, K. (2015). Conversion of waste cooking oil to jet biofuel with nickel-based mesoporous zeolite Y catalyst. *Bioresource Technology*, 197: 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.115>
- [9] Moreno-Caballero, B. (2020). Effect of metallic oxides over physicochemical properties of biodiesel produced from waste water [Tesis de Maestría en Ciencias]. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, México. 110 p.
- [10] Organización de Aviación Civil Internacional – OACI. (s.f.). Sustainable aviation fuel. Organización de Aviación Civil Internacional. Montreal, Canadá. 8 p. Recuperado de <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx> (consulta: 17 diciembre 2023).
- [11] Klein, B. C., Chagas, M. F., Junqueira, T. L., Rezende, M. C. A. F., Cardoso, T. de F., Cavalett, O., and Bonomi, A. (2018). Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. *Applied Energy*, 209: 290–305. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.079>
- [12] Eller, Z., Varga, Z., and Hancsók, J. (2016). Advanced production process of jet fuel components from technical grade coconut oil with special hydrocracking. *Fuel*, 182: 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.055>
- [12] Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., and Olsen, S. I. (2017). Life Cycle Assessment. Springer. 327 p.
- [13] Hanaoka, T., Miyazawa, T., Shimura, K., and Hirata, S. (2015). Jet fuel synthesis in hydrocracking of Fischer-Tropsch product over Pt-loaded zeolite catalysts prepared using microemulsions. *Fuel Processing Technology*, 129: 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.011>
- [14] Vedachalam, S., Boahene, P., and Dalai, A. K. (2021). Production of jet fuel by hydrotreating of Fischer-Tropsch wax over Pt/Al-TUD-1 bifunctional catalyst. *Fuel*, 300: 121008.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121008>

- [15] Agusdinata, D. B., Zhao, F., Ileleji, K., and Delaurentis, D. (2011). Life cycle assessment of potential biojet fuel production in the United States. *Environmental Science and Technology*, 45(21): 9133–9143. <https://doi.org/10.1021/es202148g>
- [16] Vela-García, N., Bolonio, D., García-Martínez, M. J., Ortega, M. F., Almeida Streitwieser, D., and Canoira, L. (2021). Biojet fuel production from oleaginous crop residues: Thermoeconomic, life cycle and flight performance analysis. *Energy Conversion and Management*, 244: 114534. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114534>
- [17] International Organization for Standardization – ISO. (2006a). ISO 14040:2006: Gestión ambiental – Evaluación de ciclo de vida – Principios y marco de referencia. Ginebra, Suiza. 32 p.
- [18] International Organization for Standardization – ISO. (2006b). ISO 14044:2006: Gestión ambiental – Evaluación de ciclo de vida – Requisitos y directrices. Ginebra, Suiza. 46 p.
- [19] Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., and Som, C. (2016). From laboratory to industrial scale: A scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies. *Journal of Cleaner Production*, 135: 1085–1097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.164>
- [20] Çengel, Y. A., and Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa (4<sup>a</sup> ed., Vol. 1). McGraw-Hill. 925 p.

