

# Producción de Combustibles Sostenibles de Aviación mediante Fraccionamiento y Hidrodesoxigenación Catalítica de Bio-oil Lignocelulósico

Arianna Sabina, Noemí Gil-Lalaguna, Isabel Fonts, Alfonso Cornejo, José Luis Sánchez

Grupo de Procesos Termoquímicos (GPT)  
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)  
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, España.  
Tel. +34-976762707, e-mail: [asabina@unizar.es](mailto:asabina@unizar.es)

## Resumen

Este trabajo aborda la obtención de familias de compuestos compatibles con los combustibles sostenibles de aviación (SAF) a partir de bio-oil procedente de la pirólisis rápida de biomasa lignocelulósica, mediante fraccionamiento y reacciones de hidrodesoxigenación. Las subfracciones homogéneas, simuladas con mezclas modelo, permitieron obtener hidrocarburos líquidos como aromáticos, cicloalcanos y alcanos lineales.

## Introducción y objetivos

La búsqueda de alternativas energéticas para la aviación se ha intensificado en los últimos años no solo por la necesidad de reducir el 2% de las emisiones globales de carbono atribuibles actualmente a este sector, sino también por el crecimiento previsto en la demanda de transporte aéreo en las próximas décadas [1,2]. En este contexto, la Unión Europea ha establecido medidas regulatorias como el reglamento ReFuelEU Aviation, que fija objetivos obligatorios de incorporación progresiva de combustibles sostenibles de aviación (SAF) en los vuelos que operan desde aeropuertos europeos, con el objetivo de avanzar hacia la neutralidad climática en 2050 [3].

Actualmente, el bio-oil obtenido por pirólisis rápida de biomasa lignocelulósica se consideran una materia prima prometedora para la obtención de determinadas familias de compuestos que son necesarias para la correcta formulación de los SAF. Sin embargo, el uso directo del bio-oil es limitado debido a su alta heterogeneidad, elevado contenido de oxígeno y presencia de agua, factores que afectan negativamente a su poder calorífico, estabilidad química y compatibilidad con motores convencionales [4].

Frente a este desafío, la hidrodesoxigenación (HDO) catalítica se ha consolidado como una de las rutas más eficaces para mejorar la calidad del bio-oil, transformando compuestos oxigenados (como los derivados fenólicos y ácidos grasos) en hidrocarburos avanzados aptos para su uso como SAF. Este proceso implica reacciones complejas de hidrogenación, ruptura de enlaces C–O y eliminación de oxígeno mayoritariamente en forma de agua, lo que incrementa la densidad energética y la estabilidad del producto final [4, 5].

Por otro lado, el uso de catalizadores eficientes y estables, capaces de operar en sistemas multifásicos y de resistir la desactivación, es un aspecto central de la investigación actual. Estudios recientes resaltan el buen funcionamiento de catalizadores basados en metales nobles, destacando el rutenio soportado en carbono activado (Ru/C), que exhibe una buena actividad bifuncional: sitios metálicos que facilitan la hidrogenación de grupos oxigenados, mientras que el soporte carbonoso controla la acidez superficial. Esta doble funcionalidad favorece la ruptura selectiva de enlaces oxigenados en compuestos derivados de lignina y su conversión en hidrocarburos tipo diésel bajo condiciones moderadas de temperatura y presión [4].

En este contexto, la presente investigación se centra en el desarrollo y evaluación de un proceso integrado que combina el fraccionamiento selectivo del bio-oil con procesos catalíticos de HDO, con el objetivo de producir fracciones específicas de SAF como aromáticos, alcanos o cicloalcanos.

## Materiales y Métodos

Como materia prima se utilizó bio-oil proveniente de la empresa holandesa Biomass Technology Group (BTG). El bio-oil fue sometido a un procedimiento de extracción con disolventes (agua

y diclorometano), y las fracciones de interés (aquellas solubles en diclorometano) se separaron por tamaño molecular mediante cromatografía líquida flash, utilizando el equipo Interchim Puriflash 5.150 con una columna de 50 cm de longitud rellena con resina Bio-Beads SX3 (BioRad) y equilibrada en diclorometano (DCM). De esta manera se logró separar la fracción soluble en agua y soluble en DCM (SA-SDCM) del *bio-oil* en 3 subfracciones y la fracción insoluble en agua y soluble en DCM (IA-SDCM) en 4 subfracciones: (i) subfracción más pesada con peso molecular (PM) superior al orden de tetrámeros (H); (ii) compuestos con PM del orden de tetrámeros (T); (iii) compuestos con PM del orden de dímeros (D) y (iv) monómeros (M). Posteriormente, cada una de estas subfracciones fueron separadas también de acuerdo a su polaridad, mediante cromatografía líquida flash en una columna de sílice tipo SI-HP (25 G) de 15  $\mu\text{m}$  (presión de 22 bar), y utilizando como disolvente sucesivos gradientes de DCM, acetonitrilo y metanol, con el objetivo de separar grupos más homogéneos, concretamente monómeros fenólicos y compuestos grasos, que puedan servir como base para procesos de hidrodesoxigenación.

Además, las subfracciones monoméricas (formadas por compuestos relativamente volátiles) se analizaron mediante la técnica de cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC/MS) para profundizar en el estudio de su composición. A partir de esta identificación, se llevaron a cabo reacciones de HDO utilizando mezclas sintéticas de compuestos representativos de estas subfracciones. Los experimentos preliminares de HDO a partir de las mezclas mencionadas anteriormente se realizaron en un reactor batch OLLITAL de 50 mL de capacidad, empleando Ru/C como catalizador y las siguientes condiciones de operación: dodecano como disolvente, presión inicial de hidrógeno de 35 bar, 4 horas de reacción, 600 rpm y temperaturas en el rango de 220-330°C (dos valores de temperatura para cada mezcla de compuestos) (ver Tabla 1).

## Resultados y discusión

El proceso de fraccionamiento de *bio-oil* por tamaño molecular y polaridad permitió concentrar monómeros fenólicos y ácidos grasos en tres subfracciones homogéneas: dos de ellas enriquecidas en compuestos fenólicos, especialmente derivados de guayacol (como 2-metoxi-5-metilfenol, guayacol, eugenol y vanilina), y una tercera subfracción rica en ácidos grasos

(como ácido palmítico y ácido esteárico), identificados mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS). En la Tabla 1 se muestran estos compuestos identificados y su porcentaje en peso.

Los resultados preliminares de las reacciones de HDO mostraron la formación de hidrocarburos importantes para la formulación de SAF, incluidos cicloalcanos (ciclohexano, metilciclohexano y propilciclohexano) y aromáticos (tolueno, benceno y sus derivados metilados y propilados) a partir de las mezclas fenólicas. La formación de cicloalcanos sugiere una ruta de hidrogenación total del anillo fenólico seguida de deshidroxilación, facilitada por la actividad del catalizador Ru/C; este comportamiento confirma su capacidad para inducir tanto la ruptura de enlaces C–O como la saturación de anillos aromáticos en condiciones moderadas de temperatura.

En el caso de las mezclas de ácidos grasos, se obtuvieron alcanos lineales (pentadecano, hexadecano, heptadecano y octadecano), alcanos ramificados (3-metilhexano y 2,4-dimetilhexano) y cicloalcanos (ciclohexano y sus derivados), lo que sugiere que el catalizador favoreció rutas de descarboxilación/descarbonilación e hidrogenación sin necesidad de condiciones extremadamente severas.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman la eficacia del proceso de HDO con Ru/C como catalizador para convertir compuestos fenólicos y ácidos grasos en hidrocarburos líquidos dentro del rango de queroseno. En particular, se logró obtener aromáticos ligeros, cicloalcanos y alcanos lineales y ramificados, a partir de mezclas modelo representativas de fracciones del *bio-oil*. Además, el fraccionamiento previo del *bio-oil* permite trabajar con mezclas más homogéneas, lo que mejora la eficacia del proceso y reduce la formación de subproductos no deseados. Este estudio demuestra que la combinación de fraccionamiento selectivo y HDO catalítica es una estrategia viable para valorizar *bio-oil* lignocelulósico y producir combustibles sostenibles de aviación, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental del sector aeronáutico.

## REFERENCIAS

- [1]. YANG, F., and YAO, Y. Sustainable aviation fuel pathways: Emissions, costs and uncertainty. Resources, Conservation and Recycling. 2025, 215. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108124>.
- [2]. ICAO Assembly. Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection-carbon offsetting and reduction scheme for international aviation. 2022. Available from: [https://www.icao.int/environmentalprotection/CORSIA/Documents/Resolution\\_A41-22\\_CORSIA.pdf](https://www.icao.int/environmentalprotection/CORSIA/Documents/Resolution_A41-22_CORSIA.pdf).
- [3]. European Union. Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport. 2023. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R2405>.
- [4]. ANJANI R.K. GOLLAKOTA, CHI-MIN SHU, PRAKASH KUMAR SARANGI, KRUSHNA PRASAD SHADANGI, SUDIP RAKSHIT, JOHN F. KENNEDY, VIJAI KUMAR GUPTA, MINAXI SHARMA. Catalytic hydrodeoxygenation of bio-oil and model compounds-Choice of catalysts, and mechanisms. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023, 187, 113700. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113700>.
- [5] RUI DANG, XIANGRONG MA, JIAO LUO, YUANYUAN ZHANG, JIAWEI FU, CHUNYAN LI, NING YANG. Hydrodeoxygenation of 2-methoxy phenol: Effects of catalysts and process parameters on conversion and products selectivity. Journal of the Energy Institute. 2020, 93, 1527-1534. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.01.015>.

## TABLAS

Tabla 1. Compuestos más abundantes presentes en las subfracciones monoméricas que se obtuvieron tras el fraccionamiento por polaridad, identificados por cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC/MS) y temperaturas empleadas en reacciones de HDO.

Subfracciones monoméricas	Subfracción tras la separación por polaridad	Compuestos más abundantes	% en peso	Temperatura HDO (°C)
SA-SDCM-M	F1	2-Metoxi-5-metilfenol	51	220 y 280
		Guayacol	22	
		Vanilina	10	
		Eugenol	5	
		Otros fenoles	12	
	F2	Ácido palmítico	40	280 y 330
		1-Monopalmitina	11	
		Acido esteárico	9	
		m-Cresol	7	
		Otros	33	
IA-SDCM-M	F2	Isoeugenol	19	220 y 280
		Eugenol	18	
		Vanilina	12	
		Homovanilato de metilo	10	
		Otros	41	

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida de la Agencia Estatal de Investigación (PID2020-114936RB-I00), así como del Gobierno de Aragón (Ref. T22\_23R). A. Sabina agradece la ayuda FPI (PRE2021-097946) financiada por MCIN/AEI/FSE+.