

Tendencias actuales en la producción de bioturbosina a partir de subproductos agroindustriales: una oportunidad para la agroindustria en Colombia

Current trends in biojet fuel production from agro-industrial by-products: An opportunity for the agroindustry in Colombia

Tovar-Díaz, L. A.¹, Gómez-Ángel, K. L.² y Hoyos-Leyva, J. D.^{2*}

¹ Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora, México.

² Grupo de Investigación en Ingeniería Agroindustrial (GINNA), Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Colombia.

Fecha de recepción: marzo de 2020 / **Fecha de aceptación:** julio de 2020

Resumen

Este artículo analiza las tendencias globales en la producción de combustibles sostenibles de aviación (SAF) o bioturbosina a partir de subproductos agroindustriales, con énfasis en su potencial de implementación en Colombia. Se evalúan las principales rutas tecnológicas, incluyendo las tecnologías HEFA, Fischer-Tropsch, Alcohol-to-Jet, Direct Sugar-to-Hydrocarbon y licuefacción hidrotérmica, considerando su madurez tecnológica, eficiencia y viabilidad económica. Asimismo, se examina la disponibilidad de materias primas como residuos lignocelulósicos, aceites residuales y subproductos agroindustriales, destacando su papel en los esquemas de biorrefinería y en la economía circular. El estudio identifica barreras críticas relacionadas con los costos, la logística, la escalabilidad y los marcos regulatorios, que limitan la adopción a gran escala. Se concluye que Colombia posee ventajas competitivas para el desarrollo de SAF, aunque requiere políticas integrales e innovación tecnológica para consolidar una industria sostenible de combustibles de aviación. Además, se discute la interacción entre la disponibilidad de biomasa, los costos de hidrógeno y el desempeño catalítico como determinantes clave de la competitividad y la reducción de emisiones.

Palabras clave: bioturbosina, combustibles sostenibles de aviación, biorrefinería, residuos agroindustriales.

* Correspondencia: hoyos.javier@uniagraria.edu.co

Abstract

This article analyzes global trends in the production of sustainable aviation fuels (SAF) from agro-industrial by-products, with an emphasis on their implementation potential in Colombia. The main technological pathways, including HEFA, Fischer–Tropsch, Alcohol-to-Jet, Direct Sugar-to-Hydrocarbon, and hydrothermal liquefaction, are evaluated in terms of their technological maturity, efficiency, and economic feasibility. The availability of feedstocks such as lignocellulosic residues, waste oils, and agro-industrial by-products is examined, highlighting their role in biorefinery schemes and circular economy strategies. Critical barriers related to costs, logistics, scalability, and regulatory frameworks are identified as key constraints for large-scale deployment. The study concludes that Colombia holds significant competitive advantages for SAF development; however, integrated policies and technological innovation are required to establish a sustainable aviation fuel industry. Additionally, the interplay between biomass availability, hydrogen costs, and catalytic performance is discussed as a key determinant of competitiveness and emissions reduction.

Keywords: Biojet fuel, sustainable aviation fuels, biorefinery, agro-industrial residues.

Introducción

El incremento en la demanda global de combustibles sostenibles y la necesidad de reducir las emisiones contaminantes han impulsado la investigación y el desarrollo de biocombustibles avanzados, particularmente de la bioturbosina o los *Sustainable Aviation Fuels* (SAF) (Zhang *et al.*, 2020). Este tipo de combustible, derivado de recursos renovables, representa una alternativa prometedora al Jet-A convencional, mitigando el impacto ecológico de la aviación al reducir su dependencia de los combustibles fósiles (Kandaramath Hari *et al.*, 2015). En este contexto, la producción de bioturbosina a partir de biomasa es una estrategia clave para el desarrollo sostenible del sector de la aviación (Prussi *et al.*, 2019). La descarbonización del sector aeronáutico mediante el uso de SAF es fundamental para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero sin requerir modificaciones sustanciales en la infraestructura o en las aeronaves existentes (Scheelhaase *et al.*, 2019). De hecho, la integración de biocombustibles y combustibles sintéticos en las mezclas de combustible de aviación es una estrategia vital para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector aeronáutico (O'Connell *et al.*, 2019).

A nivel global, la industria se ha enfocado en diversas tecnologías para la producción de bioturbosina, siendo las rutas de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados y la síntesis de Fischer-Tropsch las más avanzadas y comercialmente viables (Díaz-Pérez y Serrano-Ruiz, 2020; Vásquez *et al.*, 2017). A pesar de su madurez tecnológica,

estas vías presentan desafíos significativos, como los altos costos de producción, que superan en al menos un 120 % los del combustible fósil para aviación, y la limitada disponibilidad de incentivos monetarios para los productores (Mawhood *et al.*, 2016). Esta situación, sumada a la complejidad de los procedimientos administrativos y la rigurosidad de los ensayos de vuelo requeridos para la certificación de nuevas rutas de combustible renovable, ralentiza la adopción masiva de la bioturbosina (Kim *et al.*, 2019; Smith *et al.*, 2017). A pesar de estos desafíos, la demanda de combustibles de aviación sostenibles está en aumento, impulsada por la necesidad de reducir la huella de carbono de la aviación (Kousoulidou y Lonza, 2016; O'Connell *et al.*, 2019).

Esta revisión se centrará en las tendencias de investigación y producción de bioturbosina a nivel global entre 2015 y 2020, con énfasis en el aprovechamiento de subproductos agroindustriales y con un foco en el potencial de producción en Colombia, examinando las vías tecnológicas, la viabilidad económica y los impactos ambientales asociados. Se realizará una revisión sistemática para evaluar los avances y desafíos específicos que enfrenta Colombia en la implementación de estas tecnologías, considerando la disponibilidad de materias primas y el marco regulatorio vigente.

SAF en el mundo

Entre 2015 y 2020 se han consolidado varias rutas tecnológicas para la producción de SAF, basadas principalmente en procesos termoquímicos y bioquímicos de conversión de biomasa.

Tendencias tecnológicas y de producción

El desarrollo de combustibles sostenibles de aviación (SAF, por sus siglas en inglés) se basa en diversas rutas tecnológicas que permiten transformar biomasa o residuos orgánicos en hidrocarburos compatibles con los combustibles convencionales utilizados en la aviación. Estas tecnologías han sido evaluadas y certificadas bajo estándares internacionales como los establecidos por ASTM International, para garantizar su seguridad, desempeño y compatibilidad con la infraestructura existente de combustibles aeronáuticos. Entre las principales rutas tecnológicas destacan HEFA, Fischer-Tropsch, Alcohol-to-Jet, Direct Sugar to Hydrocarbon y Hydrothermal Liquefaction.

A continuación, se presenta una descripción de cada una de las tecnologías de producción empleadas en la obtención de bioturbosina.

HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*)

La ruta tecnológica conocida como HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) es una de las más desarrolladas a nivel comercial para la producción de combustibles sostenibles de aviación. Este proceso utiliza como materia prima aceites vegetales, grasas animales o aceites residuales provenientes de la industria alimentaria (Doliente *et al.*, 2020; Starck *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2019). Durante el proceso, los lípidos son sometidos a reacciones catalíticas en presencia de hidrógeno, incluyendo hidrogenación, hidroisomerización e hidrocrackeo. Estas etapas permiten eliminar el oxígeno presente en los ácidos

grasos y transformar las cadenas carbonadas en hidrocarburos parafínicos de cadena larga, que presentan propiedades fisicoquímicas similares al queroseno de aviación convencional (Pattanaik y Misra, 2017).

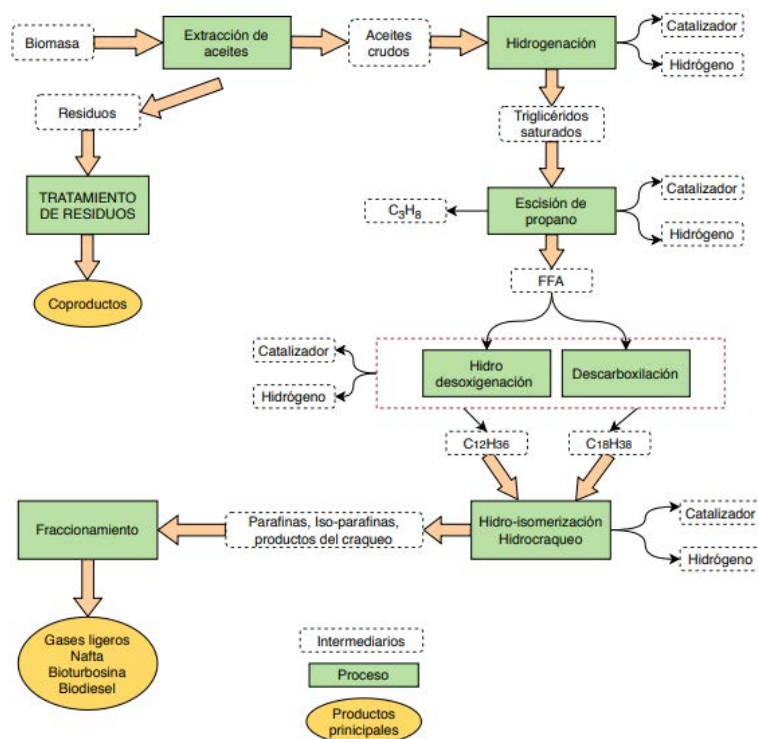
El combustible resultante, conocido como HEFA-SPK (*Synthetic Paraffinic Kerosene*), posee alta estabilidad térmica, bajo contenido de azufre y excelentes características de combustión (Starik *et al.*, 2018). Debido a estas propiedades, esta tecnología ha sido ampliamente adoptada por refinerías que han adaptado sus unidades de hidrotratamiento existentes para producir biocombustibles avanzados. La madurez tecnológica de esta ruta ha permitido su certificación para mezclas de hasta un 50 % con combustible Jet A-1, bajo los estándares internacionales de calidad definidos por ASTM International (Neuling y Kaltschmitt, 2015). Sin embargo, la disponibilidad sostenible de materias primas lipídicas continúa siendo uno de los principales desafíos para su expansión a gran escala.

En la Figura 1 se presenta un diagrama de proceso de la producción de bioturbosina mediante la metodología HEFA, cuando se tienen materias primas compuestas en mayor proporción por lípidos.

FT (*Fischer-Tropsch*)

La síntesis Fischer-Tropsch representa una de las rutas termoquímicas más prometedoras para la producción de combustibles sostenibles de aviación a partir de biomasa lignocelulósica y residuos sólidos. Este proceso implica, inicialmente, la gasificación de biomasa a altas temperaturas

Figura 1. Diagrama de proceso para la producción de bioturbosina mediante hidrotratamiento



Fuente. Elaboración propia.

para producir gas de síntesis, una mezcla compuesta principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno. Posteriormente, este gas se somete a reacciones catalíticas que permiten sintetizar hidrocarburos líquidos mediante la polimerización controlada de las moléculas de carbono e hidrógeno (Chiodini *et al.*, 2017; Rauch *et al.*, 2014).

Una de las principales ventajas de esta tecnología radica en su flexibilidad respecto al tipo de biomasa que puede utilizarse como materia prima, incluyendo residuos agrícolas, forestales y desechos sólidos orgánicos (Benedetti *et al.*, 2020). El producto obtenido, denominado FT-SPK, consiste en hidrocarburos parafínicos de alta pureza que pueden ser refinados para producir fracciones compatibles con combustibles

de aviación (Shafer *et al.*, 2019). Esta ruta ha sido certificada para mezclas de hasta un 50 % con combustibles convencionales y ha sido implementada en varios proyectos piloto y plantas demostrativas en diferentes regiones del mundo.

No obstante, la implementación industrial de la tecnología Fischer-Tropsch requiere inversiones de capital significativamente elevadas debido a la complejidad de las etapas de gasificación, limpieza del gas de síntesis y síntesis catalítica (Rafati *et al.*, 2017). A pesar de estos desafíos económicos, su capacidad para utilizar residuos lignocelulósicos de bajo costo como materia prima en este proceso la convierte en una alternativa estratégica para países con alta disponibilidad de biomasa.

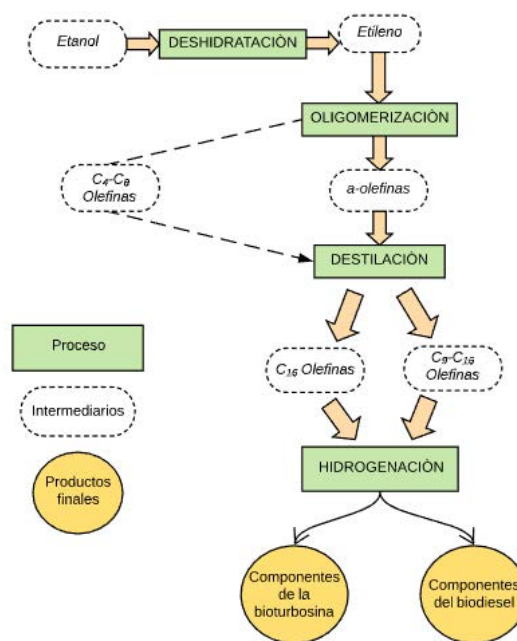
ATJ (Alcohol-to-Jet)

La tecnología Alcohol-to-Jet (ATJ) se basa en la conversión de alcoholes, principalmente etanol o butanol, en hidrocarburos líquidos de rango jet (Geleynse *et al.*, 2018). Estos alcoholes se obtienen generalmente mediante procesos de fermentación de azúcares provenientes de cultivos energéticos o residuos agrícolas ricos en carbohidratos. Una vez producido el alcohol, este es sometido a una serie de transformaciones catalíticas que incluyen la deshidratación para producir olefinas, la oligomerización para aumentar la longitud de las cadenas carbonadas y, posteriormente, la hidrogenación para generar hidrocarburos saturados compatibles con combustibles aeronáuticos (Zacharopoulou y Lemonidou, 2018).

Esta ruta tecnológica resulta de interés para países que cuentan con una infraestructura consolidada para la producción de bioetanol, ya que permite integrar cadenas de valor existentes en el sector de biocombustibles. Además, ofrece la posibilidad de utilizar materias primas lignocelulósicas o residuos agroindustriales mediante procesos avanzados de fermentación. El combustible producido mediante esta tecnología, denominado ATJ-SPK, ha sido certificado para mezclas limitadas con combustible convencional, lo que demuestra su viabilidad técnica. Sin embargo, aún se requieren mejoras en la eficiencia energética y la reducción de costos para lograr su competitividad a gran escala (Vozka *et al.*, 2019).

En la Figura 2 se presentan las principales etapas del proceso “alcohol a turbosina” empleando etanol como intermediario.

Figura 2. Diagrama de proceso para la producción de bioturbosina a partir de etanol



Fuente. Elaboración propia.

DSHC (Direct Sugar to Hydrocarbons)

La ruta *Direct Sugar to Hydrocarbon* (DSHC) representa un enfoque biotecnológico avanzado para la producción de combustibles sostenibles de aviación (Kandaramath Hari et al., 2015). En este proceso, los azúcares derivados de biomasa se convierten directamente en hidrocarburos mediante fermentación microbiana utilizando microorganismos genéticamente modificados (Junne y Kabisch, 2017).

Estos microorganismos han sido diseñados para sintetizar moléculas de hidrocarburos que, posteriormente, pueden ser refinadas y adaptadas para su uso como combustibles de aviación (Jiménez-Díaz et al., 2017).

El atractivo principal de esta tecnología radica en su capacidad para producir hidrocarburos de manera directa, sin requerir múltiples etapas de conversión termoquímica. Además, permite diseñar rutas metabólicas específicas para generar moléculas con propiedades similares a las del queroseno de aviación.

Sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo y enfrenta desafíos relacionados con la estabilidad de los microorganismos, los rendimientos de producción y la escalabilidad industrial de los procesos biotecnológicos.

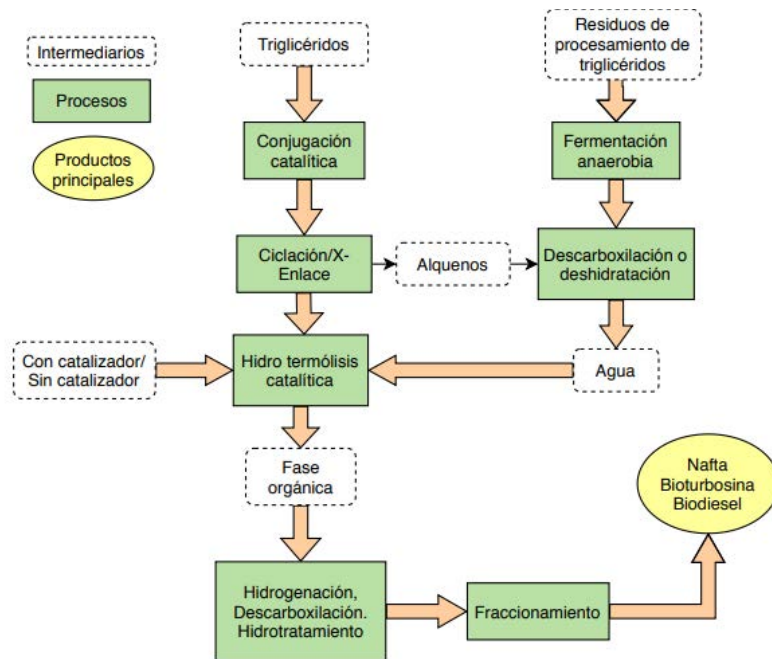
HTL (Hydrothermal Liquefaction)

La licuefacción hidrotérmica (HTL) es un proceso termoquímico que permite convertir biomasa húmeda en un biocrudo energético mediante condiciones de alta presión y temperatura en presencia de agua (Chand et al., 2019). A diferencia de otras tecnologías que requieren el secado previo de la biomasa, la HTL puede procesar materiales con alto contenido de humedad, como residuos orgánicos, lodos de tratamiento de aguas residuales o biomasa acuática (Dimitriadis y Bezergianni, 2017). Durante el proceso, la biomasa se descompone en un líquido orgánico conocido como biocrudo, el cual puede ser posteriormente sometido a procesos de hidrotratamiento para producir combustibles líquidos compatibles con el queroseno de aviación. Esta tecnología presenta ventajas significativas en términos de eficiencia energética y versatilidad de materias primas. No obstante, su desarrollo industrial aún se encuentra en fase de demostración, y se requieren avances tecnológicos adicionales para optimizar la estabilidad del biocrudo y reducir los costos de procesamiento.

Materias primas usadas en el mundo para la producción de SAF

En la Tabla 1 se presenta una comparación entre el rendimiento y el costo mínimo de venta de la bioturbosina obtenida a partir de diferentes materias primas.

Figura 3. Diagrama de proceso para la producción de bioturbosina mediante el método de hidrotermólisis



Fuente. Elaboración propia.

Tabla 1. Comparación de rendimiento y del costo de venta de referencia de la bioturbosina elaborada a partir de diferentes materias primas, utilizando tecnologías disponibles

Materia prima	Proceso	Rendimiento	Costo de venta mínimo (MJSP)	Referencia
Aceite de camelina	HEFA	~48 % – 49 % (kg fuel/kg oil)	1,63 – 4,62 USD/gal	(Diederichs <i>et al.</i> , 2016; Mupondwa <i>et al.</i> , 2016)
Aceite de soja	HEFA	Variable	3,82 – 4,39 USD/gal	(Pearlson <i>et al.</i> , 2013)
Aceites usados	HEFA	480 kg/MT aceite	2,36 – 4,73 USD/gal	(Pearlson <i>et al.</i> , 2013; Wang, 2016)
Biomasa	Fischer-Tropsch (FT)	~0,17 kg fuel/kg biomasa	6,23 – 7,57 USD/gal	(Diederichs <i>et al.</i> , 2016)
Caña de azúcar	ATJ	Variable	3,65 – 8,08 USD/gal	(Atsonios <i>et al.</i> , 2015)
Biomasa	ATJ (Vía Etanol)	0,11 – 0,14 kg fuel/kg biomasa	4,32 – 10,91 USD/gal	(Crawford <i>et al.</i> , 2016)
Microalgas	HEFA	Variable	31,98 USD/gal	(Klein-Marcuschamer <i>et al.</i> , 2013)

Caña de azúcar	DSHC	~12,1 % (w/w fuel/ biomasa)*	7,17 USD/gal	(Michailos, 2018)
Biomasa	HTL	27,6 % (líquido orgánico)	2,99 – 4,12 USD/gal (estimado)	(Tzanetis <i>et al.</i> , 2017)
Residuos forestales/ agrícolas	Pirólisis+ Hidrogenación	~80,4 % (selectividad aromáticos)	5,23 – 7,15 USD/gal	(Y. Zhang <i>et al.</i> , 2015)

Nota. HEFA: Ésteres y ácidos grasos hidroprocesados; ATJ: alcohol a bioturbosina; FT: Fischer-Tropsch; HTL: hidrotermólisis.

Fuente. Elaboración propia.

El análisis comparativo de las rutas tecnológicas y las materias primas presentadas en la Tabla 1 pone en evidencia que la viabilidad de los combustibles sostenibles de aviación está determinada por la interacción entre tres factores fundamentales: la madurez tecnológica de los procesos de conversión, la disponibilidad sostenible de materias primas y la competitividad económica frente a los combustibles fósiles. En este contexto, la ruta basada en ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA) se ha consolidado como la tecnología más avanzada desde el punto de vista comercial, respaldada por su compatibilidad con la infraestructura existente de refinación y por su relativa simplicidad de integración en las cadenas actuales de producción de combustibles.

Los análisis tecnoeconómicos disponibles indican que la ruta HEFA presenta actualmente los valores más competitivos de precio mínimo de venta del combustible para aviones, *Minimum Jet Fuel Selling Price* (MJSP), entre las diferentes rutas tecnológicas. En particular, materias primas, como el aceite de camelina y los aceites de cocina usados, muestran rangos estimados

de costo entre 1,63 y 4,62 USD por galón y 2,36 y 4,73 USD por galón, respectivamente. Estos resultados reflejan el grado de optimización alcanzado por los procesos de hidrotratamiento catalítico, así como la posibilidad de aprovechar unidades industriales ya existentes en refinerías convencionales.

No obstante, la sostenibilidad económica de esta ruta tecnológica depende de manera crítica del costo de las materias primas lipídicas. Diversos estudios coinciden en que el suministro de aceites y grasas representa entre el 70 % y el 90 % de los costos operativos totales, lo que introduce una dependencia estructural del mercado global de aceites vegetales. Esta situación genera incertidumbre respecto a la escalabilidad de la tecnología, especialmente considerando la disponibilidad limitada de residuos lipídicos como los aceites de cocina usados y las grasas animales. En consecuencia, aunque la HEFA continuará desempeñando un papel dominante en la implementación inicial de los combustibles sostenibles de aviación, su potencial de expansión global podría verse restringido por la disponibilidad sostenible de materias primas.

En contraste, las materias primas lignocelulósicas, que incluyen residuos forestales, madera de rotación corta y residuos agrícolas, representan una alternativa estratégicamente más robusta desde una perspectiva de largo plazo. Estos recursos presentan una ventaja fundamental: su abundancia y amplia distribución geográfica, así como su mínima competencia con la producción de alimentos. Desde el punto de vista de la bioeconomía, el aprovechamiento de estos residuos permitiría integrar las cadenas productivas agrícolas y forestales en sistemas de biorrefinería orientados a la producción de combustibles avanzados.

Sin embargo, la conversión de biomasa lignocelulósica en hidrocarburos de rango jet continúa enfrentando desafíos tecnológicos significativos. La estructura compleja de la lignocelulosa, caracterizada por la interacción entre la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, exige procesos de pretratamiento intensivos y rutas de conversión termoquímica o bioquímica más sofisticadas. Tecnologías como la gasificación seguida de síntesis Fischer-Tropsch o la licuefacción hidrotérmica presentan un elevado potencial para la producción de combustibles avanzados, pero su implementación a gran escala sigue limitada por los altos requerimientos de capital, la complejidad operativa y los desafíos asociados al escalado industrial.

En conjunto, estas observaciones sugieren que la transición hacia combustibles sostenibles de aviación seguirá una trayectoria tecnológica dual. Mientras que las rutas basadas en aceites y grasas continuarán liderando el despliegue comercial en el corto plazo, las plataformas

basadas en biomasa lignocelulósica probablemente constituirán el pilar fundamental para la expansión del sector en el largo plazo, particularmente en países con abundantes recursos agroforestales.

Las materias primas más usadas para la producción de bioturbosina, reportadas en la literatura científica entre 2015 y 2020, son:

Cultivos oleaginosos y grasas (aceites)

Los cultivos oleaginosos y las grasas constituyen una de las materias primas más importantes para la producción de combustibles sostenibles de aviación, especialmente en la ruta tecnológica de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA), considerada actualmente la alternativa más madura desde el punto de vista comercial (Starck *et al.*, 2016).

Estas materias primas se caracterizan por su alto contenido de lípidos, compuestos orgánicos formados principalmente por triglicéridos, los cuales consisten en moléculas de glicerol unidas a tres cadenas de ácidos grasos de longitud variable (Vaisali *et al.*, 2015). Los ácidos grasos presentes en estos aceites suelen tener entre 14 y 22 átomos de carbono, lo que facilita su conversión en hidrocarburos de rango jet mediante procesos de hidrodesoxigenación, hidrocrackeo e hidroisomerización.

Los aceites comestibles de primera generación incluyen materias primas como el aceite de soja (Pearlson *et al.*, 2013), colza (rapeseed), maíz (Barrera-Arellano *et al.*, 2019), girasol, cacahuete y palma (Gesteiro *et al.*, 2019).

Desde el punto de vista fisicoquímico, estos aceites presentan un alto contenido de ácidos grasos insaturados, principalmente el ácido oleico (C18:1), el ácido linoleico (C18:2) y el ácido linolénico (C18:3) (Zhang *et al.*, 2020). La presencia de estas cadenas hidrocarbonadas permite obtener fracciones de hidrocarburos parafínicos e isoparafínicos con propiedades similares al queroseno de aviación después del procesamiento catalítico (Verma *et al.*, 2015). Sin embargo, el uso de aceites comestibles ha sido objeto de debate debido a su potencial competencia con la producción de alimentos.

Por esta razón, se ha promovido el uso de aceites no comestibles de segunda generación, provenientes de cultivos adaptados a suelos marginales o a condiciones ambientales adversas. Entre estos se destacan especies como la *Jatropha*, la camelina, el ricino, la macauba, la carinata y la salicornia (Hunsberger y Alonso-Fradejas, 2016; Shah *et al.*, 2019). Estos cultivos presentan composiciones lipídicas particulares; por ejemplo, el aceite de ricino contiene altas concentraciones de ácido ricinoleico (Suhail *et al.*, 2015), mientras que la camelina posee elevados niveles de ácidos grasos poliinsaturados (Y. Li y Sun, 2015). Estas características influyen en las condiciones de procesamiento requeridas para su conversión en combustibles.

Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica es considerada una de las materias primas más prometedoras para la producción de combustibles sostenibles de aviación a largo plazo debido a su abundancia,

bajo costo y mínima competencia con la producción de alimentos. Desde el punto de vista estructural, estos materiales están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, tres biopolímeros que forman la estructura de las paredes celulares de las plantas (Sorieul *et al.*, 2016). La celulosa es un polímero lineal de glucosa con alto grado de cristalinidad, la hemicelulosa es un heteropolímero amorfo compuesto por azúcares de cinco y seis carbonos, mientras que la lignina es un polímero aromático complejo que proporciona rigidez y resistencia estructural a la biomasa (Sorieul *et al.*, 2016).

Los residuos forestales y la madera constituyen una fuente importante de biomasa lignocelulósica. Especies de rápido crecimiento, como el eucalipto, el álamo (*poplar*) y el sauce (*willow*), se utilizan ampliamente debido a su alta productividad y a su contenido relativamente elevado de celulosa, que puede superar el 40 % de la masa seca (Bekele *et al.*, 2018; Przybysz *et al.*, 2018).

Los residuos derivados de operaciones forestales, tales como aserrín, corteza, hojas y ramas, presentan propiedades energéticas favorables para procesos termoquímicos como la gasificación, la pirólisis o la licuefacción hidrotérmica (Braghiroli y Passarini, 2020).

Los residuos agrícolas representan otra fuente significativa de biomasa lignocelulósica. Entre los más estudiados se encuentran el rastrojo de maíz, la paja de trigo, la paja y cascarilla de arroz (Biswas *et al.*, 2017) y el bagazo de caña de azúcar (Hernández *et al.*, 2019).

Estos materiales contienen proporciones variables de celulosa (30–50 %), hemicelulosa (20–35 %) y lignina (10–25 %), lo que determina su comportamiento durante los procesos de conversión energética. La presencia de lignina, por ejemplo, favorece la formación de compuestos aromáticos durante los procesos termoquímicos (Biswas *et al.*, 2017).

Además, se han desarrollado cultivos energéticos herbáceos específicamente para la producción de bioenergía. Entre ellos se destacan el *switchgrass*, el *miscanthus* y el pasto Napier, especies caracterizadas por su alta productividad de biomasa, eficiencia en el uso de nutrientes y capacidad de crecer en suelos de baja calidad (Mitchell *et al.*, 2016). Estas plantas presentan composiciones lignocelulósicas que facilitan su procesamiento en biorrefinerías orientadas a la producción de combustibles avanzados.

Azúcares y almidones

Los azúcares y los almidones constituyen materias primas ampliamente utilizadas en rutas bioquímicas para la producción de combustibles sostenibles de aviación, especialmente en procesos de fermentación microbiana y conversión catalítica en fase acuosa.

Desde el punto de vista químico, los azúcares son carbohidratos simples compuestos por unidades de monosacáridos que pueden ser metabolizados por microorganismos para producir alcoholes, hidrocarburos u otros intermediarios químicos de interés energético (Farrán *et al.*, 2015).

Los cultivos tradicionales ricos en azúcares o almidón incluyen la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el sorgo dulce, el trigo y el maíz. En el caso de la caña de azúcar y la remolacha, los azúcares predominantes son la sacarosa, la glucosa y la fructosa, los cuales pueden ser fermentados directamente para producir etanol (Duraism *et al.*, 2017). Por otro lado, cultivos ricos en almidón como el maíz o el trigo requieren procesos de hidrólisis enzimática para convertir el almidón en glucosa antes de la fermentación. El almidón es un polisacárido formado por cadenas de glucosa organizadas en dos fracciones principales: la amilosa y la amilopectina (Hoyos-Leyva *et al.*, 2017).

Adicionalmente, los azúcares derivados de biomasa lignocelulósica han adquirido gran relevancia en el desarrollo de biocombustibles avanzados. Mediante procesos de pretratamiento e hidrólisis enzimática es posible liberar azúcares de cinco y seis carbonos, como la glucosa, la xilosa y la arabinosa, a partir de materiales lignocelulósicos. Estos azúcares pueden ser fermentados por microorganismos para producir alcoholes o convertidos catalíticamente en compuestos intermedios como hidrocarburos ligeros, cetonas o ácidos orgánicos (Mika *et al.*, 2017). La versatilidad química de estos azúcares los convierte en una plataforma clave para la producción de múltiples intermediarios energéticos en biorrefinerías integradas.

Algas (3ª generación)

Las algas, tanto microalgas como macroalgas, han sido ampliamente investigadas como materias primas de tercera generación para la producción de combustibles sostenibles de aviación (Moreno-García *et al.*, 2017).

Estos organismos fotosintéticos presentan ventajas significativas frente a cultivos terrestres tradicionales, entre ellas su rápido crecimiento, su alta eficiencia en la conversión de energía solar y su capacidad paracapturardióxidodecarbonoatmosférico o industrial (D bowski et al., 2020). Además, muchas especies de microalgas pueden cultivarse en sistemas acuáticos que no requieren tierras agrícolas, lo que reduce la competencia con la producción de alimentos. Desde el punto de vista fisicoquímico, algunas microalgas pueden acumular entre el 20 % y el 60 % de su peso seco en forma de lípidos, principalmente triglicéridos y ácidos grasos de cadena larga (Brennan y Owende, 2010). Estas moléculas pueden ser convertidas en combustibles mediante procesos similares a los utilizados para aceites vegetales. Entre las especies más estudiadas se encuentran la *Spirulina*, la *Nannochloropsis* y *Botryococcus braunii*, esta última conocida por su capacidad para producir hidrocarburos naturales similares al petróleo (Matos et al., 2016).

Además de los lípidos, las algas contienen carbohidratos, proteínas y pigmentos bioactivos que pueden valorizarse en biorrefinerías integradas (Brennan y Owende, 2010). No obstante, la producción de biocombustibles a partir de algas aún enfrenta desafíos relacionados con los costos de cultivo, la cosecha y la extracción de compuestos energéticos.

Compuestos intermedios de origen bio

En el desarrollo de tecnologías avanzadas para combustibles sostenibles de aviación, se ha explorado el uso de compuestos intermedios derivados de biomasa como

plataformas químicas para la síntesis de hidrocarburos de rango jet. Estos compuestos pueden obtenerse mediante fermentación microbiana, transformación catalítica de azúcares o conversión termoquímica de biomasa.

Un grupo de compuestos intermedios de interés en la investigación corresponde a los terpenos e isoprenoides, compuestos orgánicos derivados de la biosíntesis de unidades de isopreno (Tetali, 2018). Entre ellos se encuentran moléculas como el farneseno, el bisabolenos, el limoneno, el pineno, el prespatano y el eucaliptol. Estos compuestos pueden producirse mediante microorganismos modificados genéticamente y posteriormente transformarse en hidrocarburos de aviación mediante hidrogenación y otros procesos catalíticos (Walls y Rios-Solis, 2020).

Existen diversas plataformas químicas derivadas de biomasa, como el furfural, el 2-metilfurano, las cetonas y el sorbitol (Gómez Millán et al., 2019). Estas moléculas pueden transformarse mediante procesos de desoxigenación, condensación o hidrogenación en hidrocarburos de cadena larga con propiedades adecuadas para combustibles aeronáuticos (H. Li et al., 2017).

El desarrollo de estas plataformas químicas representa un enfoque innovador dentro del campo de las biorrefinerías, permitiendo integrar procesos biotecnológicos y catalíticos para producir combustibles sostenibles de alta calidad.

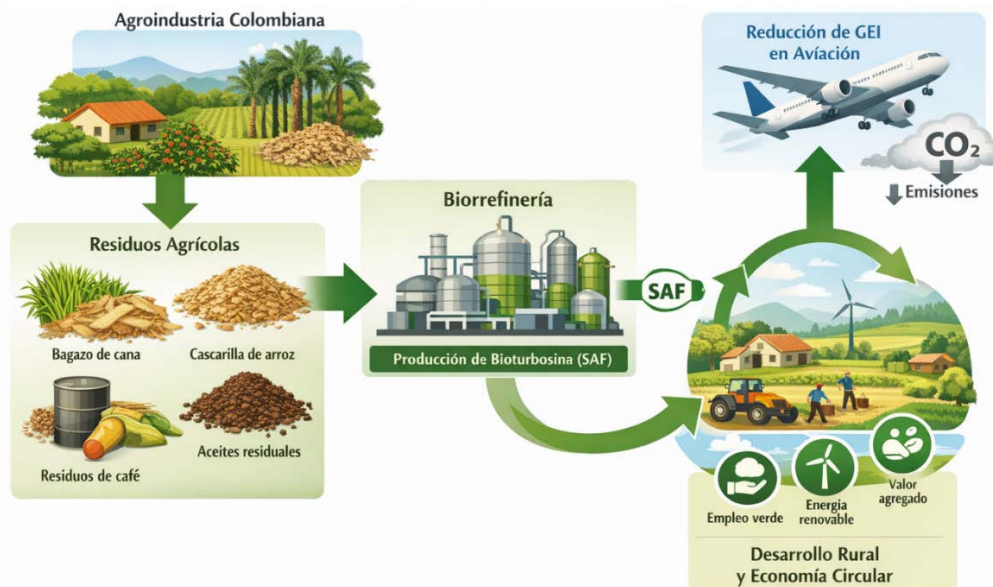
Materias primas para producción de SAF disponibles en Colombia

En la Figura 4 se presenta un modelo de bioeconomía para la producción de bioturbosina en Colombia, considerando las materias primas disponibles a partir de la producción agropecuaria nacional.

Residuos lignocelulósicos

Los residuos lignocelulósicos constituyen una de las fuentes de biomasa más prometedoras para la producción de combustibles sostenibles de aviación debido a su abundancia, bajo costo y disponibilidad como subproductos de actividades agrícolas y forestales (Aristizábal Marulanda, 2015).

Figura 4. Modelo de bioeconomía para la producción de bioturbosina (SAF) en Colombia



SAF: Sustainable Aviation Fuel

Fuente. Elaboración propia.

En Colombia, durante el periodo 2015–2020, el crecimiento sostenido de varios sectores agroindustriales generó grandes volúmenes de residuos lignocelulósicos que podrían ser aprovechados como materias primas para la producción de bioturbosina.

Entre los principales residuos disponibles en el país se encuentran el bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de arroz, los rastrojos de

maíz y diversos residuos forestales derivados de actividades de aprovechamiento maderero y plantaciones comerciales (Acosta *et al.*, 2018). La agroindustria de la caña de azúcar, concentrada principalmente en el Valle del Cauca, produce anualmente millones de toneladas de bagazo que actualmente se utilizan principalmente para la generación de energía en ingenios azucareros, pero que también presentan

un alto potencial para la producción de biocombustibles avanzados mediante rutas termoquímicas como la gasificación y la síntesis Fischer-Tropsch (Correa-García *et al.*, 2018; Dussán *et al.*, 2019).

De manera similar, la producción de arroz en regiones como Tolima, Meta y Casanare genera grandes cantidades de cascarilla, un residuo rico en lignocelulosa y sílice que puede ser utilizado como fuente de carbono para procesos de conversión energética (Hoyos *et al.*, 2019). Los rastrojos de maíz, ampliamente distribuidos en zonas agrícolas del país, representan otra fuente significativa de biomasa lignocelulósica susceptible de ser aprovechada en esquemas de biorrefinería.

Asimismo, el sector forestal colombiano genera residuos derivados de operaciones de aserrado, poda y manejo de plantaciones comerciales de especies como el eucalipto y el pino. Estos residuos presentan características fisicoquímicas adecuadas para su conversión en combustibles líquidos mediante tecnologías como la pirólisis rápida o la licuefacción hidrotérmica.

La disponibilidad de estos residuos lignocelulósicos posiciona a Colombia como un país con alto potencial para el desarrollo de biorrefinerías orientadas a la producción de combustibles sostenibles de aviación.

Aceites y grasas

Los aceites y grasas constituyen una de las materias primas más utilizadas a nivel global para la producción de combustibles sostenibles de aviación debido a su elevada densidad energética y

a la madurez tecnológica de los procesos de hidroprocesamiento. La ruta tecnológica basada en ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA) ha demostrado ser una de las alternativas más viables para la producción de bioturbosina, ya que permite transformar lípidos en hidrocarburos parafínicos compatibles con los combustibles de aviación convencionales.

En Colombia, entre 2015 y 2020, la disponibilidad de aceites y grasas estuvo estrechamente relacionada con el desarrollo de las industrias de palma de aceite, procesamiento de alimentos y producción pecuaria (Marin-Burgos y Clancy, 2017). El país es uno de los principales productores de aceite de palma en América Latina, con extensas plantaciones ubicadas en regiones como el Magdalena Medio y los Llanos Orientales (Pardo Vargas *et al.*, 2015). Durante el procesamiento del fruto de palma se generan fracciones residuales de aceite y subproductos grasos que pueden ser utilizados como materias primas para la producción de biocombustibles avanzados.

Además del aceite de palma residual, los aceites de cocina usados representan otra fuente relevante de materia prima para la producción de bioturbosina. Estos residuos se generan principalmente en sectores urbanos asociados a restaurantes, hoteles e industrias de alimentos.

Su aprovechamiento permite no solo producir combustibles sostenibles, sino también reducir los impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada en sistemas de alcantarillado o cuerpos de agua.

Las grasas animales, provenientes principalmente de la industria cárnica y de procesamiento de subproductos pecuarios, constituyen otra fuente potencial de lípidos para la producción de SAF.

Estos materiales presentan composiciones químicas adecuadas para su conversión mediante procesos de hidrotratamiento, permitiendo obtener hidrocarburos de rango jet con propiedades fisicoquímicas compatibles con los estándares internacionales de combustibles de aviación.

El aprovechamiento de aceites y grasas residuales en Colombia podría contribuir significativamente al desarrollo de una economía circular en el sector energético, al transformar residuos orgánicos en combustibles de alto valor agregado.

Subproductos agroindustriales

Además de los residuos lignocelulósicos y las fracciones lipídicas, diversas cadenas agroindustriales en Colombia generan subproductos orgánicos que podrían ser aprovechados como materias primas para la producción de combustibles sostenibles de aviación.

Estos materiales incluyen residuos provenientes del procesamiento de alimentos, frutas y productos agrícolas que actualmente se utilizan principalmente como abonos orgánicos, como alimentación animal o que, en algunos casos, son descartados sin un aprovechamiento energético significativo.

Entre los subproductos agroindustriales con mayor potencial se encuentran la cáscara de papa, los residuos de banano, la pulpa de frutas y los residuos derivados del procesamiento del café (Alarcón García *et al.*, 2015). La producción de papa en Colombia genera grandes cantidades de cáscaras durante los procesos de lavado y pelado en la industria alimentaria.

Este residuo contiene almidones, fibras y compuestos orgánicos que pueden ser utilizados como sustratos para procesos bioquímicos de fermentación orientados a la producción de alcoholes, los cuales posteriormente pueden convertirse en combustibles de aviación mediante tecnologías como Alcohol-to-Jet (ATJ) (Kot *et al.*, 2020).

La industria bananera, concentrada principalmente en las regiones de Urabá y Magdalena, produce residuos significativos durante el procesamiento y la clasificación de la fruta para exportación (Evans *et al.*, 2020). Estos residuos incluyen cáscaras, pulpas y frutos descartados que contienen altos niveles de carbohidratos y compuestos orgánicos susceptibles de ser transformados en bioenergía.

Por su parte, la industria de procesamiento de frutas genera pulpas residuales y subproductos ricos en azúcares fermentables que podrían integrarse en esquemas de biorrefinería. Finalmente, el sector cafetero colombiano produce grandes cantidades de residuos como la pulpa de café y la cascarilla durante las etapas de beneficio y procesamiento del grano.

Estos subproductos contienen compuestos lignocelulósicos y azúcares que pueden ser transformados en biocombustibles mediante procesos termoquímicos o bioquímicos.

El aprovechamiento energético de estos subproductos agroindustriales representa una oportunidad para diversificar las cadenas de valor rurales, promover la bioeconomía y reducir el impacto ambiental asociado a la gestión de residuos orgánicos.

Barreras que Colombia debe superar para la producción comercial de SAF

La producción de biocombustible para aviones (bio-jet) enfrenta diversas barreras tecnológicas que van desde el pretratamiento de la materia prima hasta la optimización de los procesos de conversión y la calidad del producto final.

Las principales barreras identificadas en las fuentes son:

A pesar del significativo potencial que posee Colombia para producir combustibles sostenibles de aviación (SAF) a partir de biomasa y subproductos agroindustriales, la implementación a escala comercial de estas tecnologías enfrenta múltiples desafíos. Estas barreras incluyen limitaciones tecnológicas, logísticas, económicas y regulatorias que deben ser abordadas de manera integral para permitir el desarrollo de una industria nacional de bioturbosina. Además, existen desafíos asociados al pretratamiento de materias primas, a la eficiencia de los procesos de conversión y a la calidad final del combustible producido.

Barreras tecnológicas

Uno de los principales desafíos para la producción de SAF a partir de biomasa radica en la complejidad de los procesos de conversión química requeridos para transformar compuestos orgánicos altamente oxigenados en hidrocarburos compatibles con los combustibles de aviación. La biomasa presenta una composición química muy diferente a la de los hidrocarburos fósiles, caracterizada por un elevado contenido de oxígeno y una menor proporción de hidrógeno. Como consecuencia, los procesos de conversión requieren etapas intensivas de desoxigenación catalítica, tales como la hidrodeseoxigenación, el hidrocrackeo y la hidroisomerización (Wei *et al.*, 2019).

Estos procesos demandan grandes cantidades de hidrógeno, cuyo suministro en la actualidad depende principalmente de fuentes fósiles, lo que incrementa los costos de producción y reduce parcialmente los beneficios ambientales del combustible resultante. Además, muchos de los esquemas tecnológicos actualmente en desarrollo implican rutas multietapa, que incluyen varias reacciones intermedias y operaciones de separación. Esta complejidad aumenta tanto el consumo energético como los costos operativos de las plantas industriales.

Otro desafío tecnológico relevante es la formación de coque sobre los catalizadores, fenómeno que ocurre debido al alto contenido de compuestos oxigenados presentes en los bioaceites derivados de biomasa (Hu *et al.*, 2020).

La deposición de coque provoca la desactivación progresiva de los catalizadores, reduciendo su vida útil y afectando la estabilidad del proceso (Barbarias *et al.*, 2018). Asimismo, cuando los procesos se escalan desde el laboratorio hacia sistemas industriales, surgen limitaciones adicionales relacionadas con fenómenos de transferencia de masa y difusión que no son evidentes en estudios a pequeña escala.

Desafíos en el pretratamiento y manejo de materias primas

La biomasa presenta una naturaleza altamente heterogénea, lo que convierte al pretratamiento en una etapa crítica dentro de las cadenas de conversión hacia combustibles de aviación. Factores como el contenido de humedad, la densidad aparente y la composición química varían significativamente entre diferentes tipos de biomasa, lo que dificulta la estandarización de los procesos de conversión. En el caso de la biomasa lignocelulósica, los procesos de pretratamiento necesarios para liberar azúcares fermentables o producir bioaceites pueden generar compuestos inhibitorios, tales como el furfural, el hidroximetilfurfural, los ácidos orgánicos y los compuestos fenólicos (Mithra *et al.*, 2018). Estas moléculas pueden afectar negativamente la actividad metabólica de los microorganismos utilizados en procesos de fermentación, reduciendo la eficiencia global de las rutas bioquímicas (Duraism *et al.*, 2017).

Adicionalmente, el manejo de grandes volúmenes de biomasa implica desafíos logísticos importantes.

La baja densidad energética de muchos residuos agrícolas aumenta los costos asociados a su transporte y almacenamiento. Asimismo, durante el almacenamiento prolongado pueden ocurrir procesos de degradación biológica o pérdida de contenido energético, lo que reduce la calidad de la materia prima disponible para su conversión en combustibles.

Barreras logísticas

Desde el punto de vista logístico, la disponibilidad de biomasa en Colombia presenta una alta dispersión geográfica, ya que los residuos agrícolas y forestales se generan en múltiples regiones del país. Esta distribución territorial dificulta la consolidación de cadenas de suministro eficientes para alimentar instalaciones industriales de producción de SAF.

Además, muchos residuos agroindustriales presentan baja densidad volumétrica, lo que incrementa los costos de transporte en comparación con los combustibles líquidos convencionales (Magalhães *et al.*, 2019). La recolección de biomasa también requiere sistemas especializados de almacenamiento y acondicionamiento que permitan mantener su estabilidad física y química antes de su procesamiento. En el caso de residuos orgánicos con alto contenido de humedad, como los provenientes de la agroindustria alimentaria, existe además el riesgo de degradación microbiana durante el almacenamiento. Estas limitaciones logísticas hacen necesario desarrollar modelos regionales de biorrefinería que permitan procesar la biomasa cerca de su lugar de origen, reduciendo así los costos asociados a la cadena de suministro.

Barreras económicas

Desde el punto de vista económico, uno de los principales obstáculos para la adopción de combustibles sostenibles de aviación es su costo de producción. En la actualidad, el SAF puede ser entre dos y cuatro veces más costoso que el combustible fósil de aviación convencional. Esta diferencia se explica principalmente por el alto costo de las materias primas, la complejidad de los procesos de conversión y las elevadas inversiones de capital necesarias para construir instalaciones industriales de biorrefinería.

La producción de bioturbosina requiere infraestructuras tecnológicas avanzadas, como unidades de gasificación, reactores catalíticos de alta presión y sistemas de purificación complejos (Crawford *et al.*, 2016).

Estas instalaciones implican costos de inversión significativos que solo pueden amortizarse mediante economías de escala o a través de mecanismos de apoyo gubernamental.

Sin incentivos económicos, tales como créditos fiscales, subsidios a la producción o mecanismos de mercado que valoren la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la competitividad del SAF frente a los combustibles fósiles sigue siendo limitada. En este sentido, el desarrollo de mercados de carbono y políticas de transición energética podría desempeñar un papel clave para cerrar esta brecha de costos.

Barreras regulatorias e institucionales

El desarrollo de una industria nacional de SAF también requiere marcos regulatorios claros que establezcan incentivos y lineamientos para su producción, certificación y uso en el sector aeronáutico. La ausencia de políticas públicas específicas orientadas a la promoción de combustibles sostenibles de aviación ha limitado hasta ahora el avance de proyectos industriales en muchos países en desarrollo. Para que Colombia pueda posicionarse como productor de bioturbosina, será necesario implementar políticas que promuevan la inversión en investigación y desarrollo, así como incentivos fiscales que faciliten la instalación de biorrefinerías. Asimismo, se requiere la armonización de regulaciones nacionales con los estándares internacionales de calidad y seguridad de combustibles de aviación, como los definidos por ASTM International.

Desafíos asociados a la calidad del combustible

La producción de combustibles sostenibles de aviación enfrenta retos relacionados con las propiedades fisicoquímicas del combustible obtenido. Algunas rutas tecnológicas, como HEFA o la síntesis Fischer-Tropsch, generan principalmente hidrocarburos parafínicos que presentan bajos contenidos de compuestos aromáticos (Richter *et al.*, 2018). Sin embargo, los aromáticos desempeñan un papel importante en los combustibles de aviación convencionales, ya que contribuyen a mantener la elasticidad de los sellos de los sistemas de combustible de las aeronaves (Duong *et al.*, 2018).

Adicionalmente, ciertos hidrocarburos derivados de biomasa pueden presentar densidades inferiores al límite mínimo requerido para combustibles de aviación, o viscosidades y puntos de congelación elevados (Shah *et al.*, 2019). Estas características obligan en muchos casos, a mezclar el SAF con combustibles fósiles convencionales para cumplir con las especificaciones técnicas establecidas para su uso en aeronaves.

Superar estas limitaciones tecnológicas y regulatorias será fundamental para consolidar la producción de combustibles sostenibles de aviación en Colombia y permitir su integración dentro de las estrategias de descarbonización del sector aeronáutico.

Conclusiones

Entre 2015 y 2020, el desarrollo de combustibles sostenibles de aviación experimentó avances significativos en términos tecnológicos y de investigación. Las rutas HEFA y Fischer-Tropsch se consolidaron como las tecnologías más maduras para la producción de bioturbosina, mientras que procesos emergentes, como ATJ y HTL, continúan en fase de desarrollo.

Colombia posee un importante potencial para la producción de SAF, gracias a la disponibilidad de residuos agroindustriales provenientes de cadenas productivas como la caña de azúcar, el arroz, el café y el banano. La valorización de estos subproductos podría contribuir simultáneamente a la transición energética y al desarrollo de una bioeconomía basada en biorrefinerías.

No obstante, la implementación comercial de estas tecnologías requerirá superar barreras tecnológicas, económicas y regulatorias. En este contexto, la articulación entre el sector académico, la industria y el gobierno será fundamental para consolidar una estrategia nacional de combustibles sostenibles de aviación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Red de Movilidad Internacional DELFÍN y a la Fundación Universitaria Agraria de Colombia por permitir el intercambio internacional y la disponibilidad de recursos para ejecutar la investigación.

Referencias

- Acosta, R., Sanabria, J., y Nabarlatz, D. (2018). Biomass from colombian agroindustrial activities: Characterization and potential for oligosaccharides production. *Chemical Engineering Transactions*, 65, 667–672. <https://doi.org/10.3303/CET1865112>
- Alarcón García, M. Á., López Vargas, J. H., y Restrepo Molina, D. A. (2015). Agro-industrial fruit co-products in Colombia, their sources and potential uses in processed food industries: a review. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(2), 7729–7742. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n2.50993>

- Aristizábal Marulanda, V. (2015). *Producción de biocombustible de avión a partir de residuos agroindustriales a través de una plataforma de furfural*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54008>
- Atsonios, K., Kougioumtzis, M. A., Panopoulos, K. D., y Kakaras, E. (2015). Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison. *Applied Energy*, 138, 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.056>
- Barbarias, I., Artetxe, M., Lopez, G., Arregi, A., Bilbao, J., y Olazar, M. (2018). Influence of the conditions for reforming HDPE pyrolysis volatiles on the catalyst deactivation by coke. *Fuel Processing Technology*, 171, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.11.003>
- Barrera-Arellano, D., Badan-Ribeiro, A. P., y Serna-Saldivar, S. O. (2019). Corn Oil: Composition, Processing, and Utilization. *Corn: Chemistry and Technology*, 3rd Edition, 593–613. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00021-8>
- Bekele, T. D., Kidanemariam, B., Bahiru, T., Semere, M., Sisaya, K., y Tadesse, E. (2018). Comparative growth performance of fast-growing tree species for woodfuel production in highland area of Ethiopia. *Horticulture International Journal*, 2(6). <https://doi.org/10.15406/hij.2018.02.00069>
- Benedetti, V., Ail, S. S., Patuzzi, F., Cristofori, D., Rauch, R., y Baratieri, M. (2020). Investigating the feasibility of valorizing residual char from biomass gasification as catalyst support in Fischer-Tropsch synthesis. *Renewable Energy*, 147, 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.050>
- Biswas, B., Pandey, N., Bisht, Y., Singh, R., Kumar, J., y Bhaskar, T. (2017). Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource Technology*, 237, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>
- Braghiroli, F. L., y Passarini, L. (2020). Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. In *Current Forestry Reports*, 6(2), 172–183. Springer. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00112-9>
- Brennan, L., y Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Chand, R., Babu Borugadda, V., Qiu, M., y Dalai, A. K. (2019). Evaluating the potential for bio-fuel upgrading: A comprehensive analysis of bio-crude and bio-residue from hydrothermal liquefaction of agricultural biomass. *Applied Energy*, 254, 113679. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113679>

- Chiodini, A., Bua, L., Carnelli, L., Zwart, R., Vreugdenhil, B., y Vocciante, M. (2017). Enhancements in Biomass-to-Liquid processes: Gasification aiming at high hydrogen/carbon monoxide ratios for direct Fischer-Tropsch synthesis applications. *Biomass and Bioenergy*, 106, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.022>
- Correa-García, E., Vélez-Correa, J., Zapata-Caldas, E., Vélez-Torres, I., y Figueroa-Casas, A. (2018). Territorial transformations produced by the sugarcane agroindustry in the ethnic communities of López Adentro and El Tiple, Colombia. *Land Use Policy*, 76, 847–860. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.026>
- Crawford, J. T., Shan, C. W., Budsberg, E., Morgan, H., Bura, R., y Gustafson, R. (2016). Hydrocarbon bio-jet fuel from bioconversion of poplar biomass: Techno-economic assessment. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0545-7>
- Dobowski, M., Zieliński, M., Kazimierowicz, J., Kujawska, N., y Talbierz, S. (2020). Microalgae Cultivation Technologies as an Opportunity for Bioenergetic System Development—Advantages and Limitations. *Sustainability*, 12(23), 9980. <https://doi.org/10.3390/su12239980>
- Díaz-Pérez, M. A., y Serrano-Ruiz, J. C. (2020). Catalytic production of jet fuels from biomass. *Molecules*, 25(4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules25040802>
- Diederichs, G. W., Ali Mandegari, M., Farzad, S., y Görgens, J. F. (2016). Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice. *Bioresource Technology*, 216, 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.090>
- Dimitriadis, A., y Bezergianni, S. (2017). Hydrothermal liquefaction of various biomass and waste feedstocks for biocrude production: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.120>
- Doliente, S. S., Narayan, A., Tapia, J. F. D., Samsatli, N. J., Zhao, Y., y Samsatli, S. (2020). Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. *Frontiers in Energy Research* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00110>
- Duong, L. H., Reksowardojo, I. K., Soerawidjaja, T. H., Pham, D. N., y Fujita, O. (2018). The sooting tendency of aviation biofuels and jet range paraffins: effects of adding aromatics, carbon chain length of normal paraffins, and fraction of branched paraffins. *Combustion Science and Technology*, 190(10), 1710–1721. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1468323>
- Duraisam, R., Saleh, K., y Kerebo Berekete, A. (2017). Production of Beet Sugar and Bio-ethanol from Sugar beet and its Bagasse: A Review. *International*

- Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 43(4), 222–233. <http://www.ijettjournal.org>
- Dussán, K. J., de Mello, G. F., Floriam, B. G., Ortiz Sanchez, M., Carmona Garcia, E., Cardona, C. A., y Silva, D. D. V. (2019). Sugarcane Biofuel Production in Colombia. *Sugarcane Biofuels*, 237–265. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18597-8_11
- Evans, E. A., Ballen, F. H., & Siddiq, M. (2020). Banana production, global trade, consumption trends, postharvest handling, and processing. En M. Siddiq, J. Ahmed, M. G. Lobo, & S. Ozadali (Eds.), *Handbook of banana production, postharvest science, processing technology, and nutrition* (pp. 1–18). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119528265.ch1>
- Farrán, A., Cai, C., Sandoval, M., Xu, Y., Liu, J., Hernáiz, M. J., y Linhardt, R. J. (2015). Green Solvents in Carbohydrate Chemistry: From Raw Materials to Fine Chemicals. *In Chemical Reviews*, 115(14), 6811–6853. <https://doi.org/10.1021/cr500719h>
- Geleynse, S., Brandt, K., Garcia-Perez, M., Wolcott, M., y Zhang, X. (2018). The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation. *ChemSusChem*, 11(21), 3728–3741. <https://doi.org/10.1002/cssc.201801690>
- Gesteiro, E., Guijarro, L., Sánchez-Muniz, F. J., Del Carmen Vidal-Carou, M., Troncoso, A., Venanci, L., Jimeno, V., Quilez, J., Anadón, A., y González-Gross, M. (2019). Palm Oil on the Edge. *Nutrients*, 11(9), 2008. <https://doi.org/10.3390/nu11092008>
- Gómez Millán, G., Hellsten, S., Llorca, J., Luque, R., Sixta, H., y Balu, A. M. (2019). Recent Advances in the Catalytic Production of Platform Chemicals from Holocellulosic Biomass. *ChemCatChem*, 11(8), 2022–2042. <https://doi.org/10.1002/cctc.201801843>
- Hernández, C., Escamilla-Alvarado, C., Sánchez, A., Alarcón, E., Ziarelli, F., Musule, R., y Valdez-Vazquez, I. (2019). Wheat straw, corn stover, sugarcane, and Agave biomasses: chemical properties, availability, and cellulosic-bioethanol production potential in Mexico. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(5), 1143–1159. <https://doi.org/10.1002/bbb.2017>
- Hoyos, V., Plaza, G., y Caicedo, A. L. (2019). Characterization of the phenotypic variability in Colombian weedy rice (*Oryza* spp.). *Weed Science*, 67(4), 441–452. <https://doi.org/10.1017/wsc.2019.18>
- Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Alvarez-Ramirez, J., y Agama-Acevedo, E. (2017). Structural characterization of aroid starches by means of chromatographic techniques. *Food Hydrocolloids*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.01.034>

- Hu, X., Zhang, Z., Gholizadeh, M., Zhang, S., Lam, C. H., Xiong, Z., y Wang, Y. (2020). Coke Formation during Thermal Treatment of Bio-oil. *Energy & Fuels*, 34(7), 7863–7914. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01323>
- Hunsberger, C., y Alonso-Fradejas, A. (2016). The discursive flexibility of ‘flex crops’: comparing oil palm and jatropha. *The Journal of Peasant Studies*, 43(1), 225–250. <https://doi.org/10.1080/03066150.2015.1052802>
- Jiménez-Díaz, L., Caballero, A., Pérez-Hernández, N., y Segura, A. (2017). Microbial alkane production for jet fuel industry: Motivation, state of the art and perspectives. *Microbial Biotechnology*, 10(1), 103–124. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12423>
- Junne, S., y Kabisch, J. (2017). Fueling the future with biomass: Processes and pathways for a sustainable supply of hydrocarbon fuels and biogas. In *Engineering in Life Sciences*, 17(1), 14–26. <https://doi.org/10.1002/elsc.201600112>
- Kandaramath Hari, T., Yaakob, Z., y Binitha, N. N. (2015). Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1234–1244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095>
- Kim, Y., Lee, J., y Ahn, J. (2019). Innovation towards sustainable technologies: A socio-technical perspective on accelerating transition to aviation biofuel. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 317–329. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.04.002>
- Klein-Marcuschamer, D., Turner, C., Allen, M., Gray, P., Dietzgen, R. G., Gresshoff, P. M., Hankamer, B., Heimann, K., Scott, P. T., Stephens, E., Speight, R., y Nielsen, L. K. (2013). Technoeconomic analysis of renewable aviation fuel from microalgae, *Pongamia pinnata*, and sugarcane. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(4), 416–428. <https://doi.org/10.1002/bbb.1404>
- Kot, A. M., Pobiega, K., Piwowarek, K., Kieliszek, M., Błażej, S., Gniewosz, M., y Lipińska, E. (2020). Biotechnological Methods of Management and Utilization of Potato Industry Waste—a Review. *Potato Research*, 63(3), 431–447. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09449-6>
- Kousoulidou, M., y Lonza, L. (2016). Biofuels in aviation: Fuel demand and CO₂ emissions evolution in Europe toward 2030. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.018>
- Li, H., Riisager, A., Saravanamurugan, S., Pandey, A., Sangwan, R. S., Yang, S., y Luque, R. (2017). Carbon-Increasing Catalytic Strategies for Upgrading Biomass into Energy-Intensive Fuels and Chemicals. *ACS Catalysis*, 8(1), 148–187. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b02577>

- Li, Y., y Sun, X. S. (2015). Camelina oil derivatives and adhesion properties. *Industrial Crops and Products*, 73, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.015>
- Magalhães, A. I., de Carvalho, J. C., de Melo Pereira, G. V., Karp, S. G., Câmara, M. C., Medina, J. D. C., y Soccol, C. R. (2019). Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1505–1519. <https://doi.org/10.1002/bbb.2048>
- Marin-Burgos, V., y Clancy, J. S. (2017). Understanding the expansion of energy crops beyond the global biofuel boom: evidence from oil palm expansion in Colombia. *Energy, Sustainability and Society*, 7(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s13705-017-0123-2>
- Matos, Â. P., Feller, R., Moecke, E. H. S., de Oliveira, J. V., Junior, A. F., Derner, R. B., y Sant'Anna, E. S. (2016). Chemical Characterization of Six Microalgae with Potential Utility for Food Application. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 93(7), 963–972. <https://doi.org/10.1007/s11746-016-2849-y>
- Mawhood, R., Gazis, E., de Jong, S., Hoefnagels, R., y Slade, R. (2016). Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects. In *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(4), 462–484. <https://doi.org/10.1002/bbb.1644>
- Michailos, S. (2018). Process design, economic evaluation and life cycle assessment of jet fuel production from sugar cane residue. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 37(3), 1227–1235. <https://doi.org/10.1002/ep.12840>
- Mika, L. T., Cséfalvay, E., y Németh, Á. (2017). Catalytic Conversion of Carbohydrates to Initial Platform Chemicals: Chemistry and Sustainability. *Chemical Reviews*, 118(2), 505–613. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00395>
- Mitchell, R. B., Schmer, M. R., Anderson, W. F., Jin, V., Balkcom, K. S., Kiniry, J., Coffin, A., y White, P. (2016). Dedicated Energy Crops and Crop Residues for Bioenergy Feedstocks in the Central and Eastern USA. *Bioengineering Research*, 9, 384–398.
- Mithra, M. G., Jeeva, M. L., Sajeev, M. S., y Padmaja, G. (2018). Comparison of ethanol yield from pretreated lignocellulo-starch biomass under fed-batch SHF or SSF modes. *Heliyon*, 4(10), e00885. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00885>
- Moreno-Garcia, L., Adjallé, K., Barnabé, S., y Raghavan, G. S. V. (2017). Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 493–506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.024>

- Mupondwa, E., Li, X., Tabil, L., Falk, K., y Gugel, R. (2016). Technoeconomic analysis of camelina oil extraction as feedstock for biojet fuel in the Canadian Prairies. *Biomass and Bioenergy*, 95, 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.10.014>
- Neuling, U., y Kaltschmitt, M. (2015). Conversion routes for production of biokerosene—status and assessment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5(4), 367–385. <https://doi.org/10.1007/s13399-014-0154-2>
- O’Connell, A., Kousoulidou, M., Lonza, L., y Weindorf, W. (2019). Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.033>
- Pardo Vargas, L. E., Laurance, W. F., Clements, G. R., y Edwards, W. (2015). The impacts of oil palm agriculture on Colombia’s biodiversity: What we know and still need to know. *Tropical Conservation Science*, 8(3), 828–845. <https://doi.org/10.1177/194008291500800317>
- Pattanaik, B. P., y Misra, R. D. (2017). Effect of reaction pathway and operating parameters on the deoxygenation of vegetable oils to produce diesel range hydrocarbon fuels: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 545–557. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.018>
- Pearlson, M., Wollersheim, C., y Hileman, J. (2013). A techno-economic review of hydroprocessed renewable esters and fatty acids for jet fuel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(1), 89–96. <https://doi.org/10.1002/bbb.1378>
- Prussi, M., O’Connell, A., y Lonza, L. (2019). Analysis of current aviation biofuel technical production potential in EU28. *Biomass and Bioenergy*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105371>
- Przybysz, K., Małachowska, E., Martyniak, D., Boruszewski, P., Iłowska, J., Kalinowska, H., y Przybysz, P. (2018). Paper y fast growth fiber. In *BioResources*, 13(1).
- Rafati, M., Wang, L., Dayton, D. C., Schimmel, K., Kabadi, V., y Shahbazi, A. (2017). Techno-economic analysis of production of Fischer-Tropsch liquids via biomass gasification: The effects of Fischer-Tropsch catalysts and natural gas co-feeding. *Energy Conversion and Management*, 133, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.051>
- Rauch, R., Hrbek, J., y Hofbauer, H. (2014). Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 3(4), 343–362. <https://doi.org/10.1002/wene.97>
- Richter, S., Braun-Unkhoff, M., Naumann, C., y Riedel, U. (2018). Paths to alternative fuels for aviation. *CEAS Aeronautical Journal*, 9(3), 389–403. <https://doi.org/10.1007/s13272-018-0296-1>

- Scheelhaase, J., Maertens, S., y Grimme, W. (2019). Synthetic fuels in aviation - Current barriers and potential political measures. *Transportation Research Procedia*, 43, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.015>
- Shafer, W. D., Gnanamani, M. K., Graham, U. M., Yang, J., Masuku, C. M., Jacobs, G., y Davis, B. H. (2019). Fischer-tropsch: Product selectivity-the fingerprint of synthetic fuels. *Catalysts*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/catal9030259>
- Shah, Z., Veses, R. C., Vaghetti, J. C. P., Amorim, V. D. A., y Silva, R. da. (2019). Preparation of jet engine range fuel from biomass pyrolysis oil through hydrogenation and its comparison with aviation kerosene. *International Journal of Green Energy*, 16(4), 350–360. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1566730>
- Smith, P. M., Gaffney, M. J., Shi, W., Hoard, S., Armendariz, I. I., y Mueller, D. W. (2017). Drivers and barriers to the adoption and diffusion of Sustainable Jet Fuel (SJF) in the U.S. Pacific Northwest. *Journal of Air Transport Management*, 58, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.10.004>
- Sorieul, M., Dickson, A., Hill, S. J., y Pearson, H. (2016). Plant fibre: Molecular structure and biomechanical properties, of a complex living material, influencing its deconstruction towards a biobased composite. *Materials*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/ma9080618>
- Starck, L., Pidol, L., Jeuland, N., Chapus, T., Bogers, P., y Bauldrey, J. (2016). Production d'huiles végétales hydrotraitées (hydroprocessed esters and fatty acids, HEFA) – optimisation du rendement. *Oil and Gas Science and Technology*, 71(1). <https://doi.org/10.2516/ogst/2014007>
- Starik, A. M., Savel'ev, A. M., Favorskii, O. N., y Titova, N. S. (2018). Analysis of emission characteristics of gas turbine engines with some alternative fuels. *International Journal of Green Energy*, 15(3), 161–168. <https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1324790>
- Suhail, A. H., Sakure, A. A., Bharose, A. A., Umale, A. A., Sushil, K., y Subhash, N. (2015). Identification and characterization of low and high ricin containing castor (*Ricinus communis* L.) genotypes. *Vegetos*, 28(3), 92–97. <https://doi.org/10.5958/2229-4473.2015.00071.3>
- Tetali, S. D. (2018). Terpenes and isoprenoids: a wealth of compounds for global use. *Planta* 2018 249:1, 249(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s00425-018-3056-x>
- Tzanetis, K. F., Posada, J. A., y Ramirez, A. (2017). Analysis of biomass hydrothermal liquefaction and biocrude-oil upgrading for renewable jet fuel production: The impact of reaction conditions on production costs and GHG emissions performance. *Renewable Energy*, 113(7), 1388–1398. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.104>

- Vaisali, C., Charanyaa, S., Belur, P. D., y Regupathi, I. (2015). Refining of edible oils: A critical appraisal of current and potential technologies. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(1), 13–23. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12657>
- Vásquez, M. C., Silva, E. E., & Castillo, E. F. (2017). Hydrotreatment of vegetable oils: A review of the technologies and their developments for jet biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 105, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.07.008>
- Verma, D., Rana, B. S., Kumar, R., Sibi, M. G., y Sinha, A. K. (2015). Diesel and aviation kerosene with desired aromatics from hydroprocessing of jatropha oil over hydrogenation catalysts supported on hierarchical mesoporous SAPO-11. *Applied Catalysis A: General*, 490(1), 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.11.007>
- Vozka, P., Vrtiška, D., Šimá ek, P., y Kilaz, G. (2019). Impact of Alternative Fuel Blending Components on Fuel Composition and Properties in Blends with Jet A. *Energy y Fuels*, 33(4), 3275–3289. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00105>
- Walls, L. E., y Rios-Solis, L. (2020). Sustainable Production of Microbial Isoprenoid Derived Advanced Biojet Fuels Using Different Generation Feedstocks: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 599560. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.599560>
- Wang, W. C. (2016). Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing Hydro-processed Renewable Jet fuel from Jatropha. *Renewable Energy*, 95, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.107>
- Wei, H., Liu, W., Chen, X., Yang, Q., Li, J., & Chen, H. (2019). Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel*, 254, 115599. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.007>
- Zacharopoulou, V., y Lemonidou, A. A. (2018). Olefins from biomass intermediates: A review. In *Catalysts*, 8(1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal8010002>
- Zhang, L., Butler, T. L., y Yang, B. (2020). Recent trends, opportunities and challenges of sustainable aviation fuel. In *Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries* (pp. 85–110). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119152057.ch5>
- Zhang, T., Wang, T., Liu, R., Chang, M., Jin, Q., y Wang, X. (2020). Chemical characterization of fourteen kinds of novel edible oils: A comparative study using chemometrics. *LWT*, 118, 108725. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108725>
- Zhang, Y., Bi, P., Wang, J., Jiang, P., Wu, X., Xue, H., Liu, J., Zhou, X., y Li, Q. (2015). Production of jet and diesel biofuels from renewable lignocellulosic biomass. *Applied Energy*, 150, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.023>