

**Descarbonizando**

**los cielos:**

**biocombustibles**

**sostenibles**

**de aviación**

**IICA**





# Descarbonizando los cielos: biocombustibles sostenibles de aviación

---

## **Equipo de trabajo**

Agustín Torroba

Celestina Brenes Porras

Ricardo Orozco Montoya

María Clara Souza de Resende



Descarbonizando los cielos: biocombustibles sostenibles de aviación  
por [IICA](#) se encuentra publicado bajo

Licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir  
igual 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO)

(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>)

Creado a partir de la obra en [www.iica.int](http://www.iica.int)

El Instituto promueve el uso justo de este documento, así como el tratamiento de los datos personales, de acuerdo con la normativa del IICA vigente. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda y que se garantice el derecho de toda persona a la protección de sus datos personales, según la normativa del IICA.

Esta publicación está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio web institucional en <http://www.iica.int>.

Coordinación editorial: Agustín Torroba

Corrección de estilo: Unidad de Idiomas IICA

Diagramado: Federico Asin | Rolan Santiago Bastidas

Diseño de portada: Rolan Santiago Bastidas

Agustín Torroba

Descarbonizando los cielos: biocombustibles sostenibles de aviación.

San José, C.R.: IICA, 2023.

100 p ; 21 x 16 cm.

ISBN: 978-92-9273-032-1

1. Biocarburante 2. Biodiesel 3. aviación agrícola 4. aceites  
vegetales 5. Grasas hidrogenadas 6. Biocombustibles 7. Aceites vegetales  
hidrotratados I. Celestina Brenes Porras II. Ricardo Orozco Ramírez III. María  
Clara Souza de Resende IV. IICA V. Título

AGRIS

DEWEY

P05

333.796

Las ideas, las formas de expresión y los planteamientos de este documento son propios del autor (o autores), por lo que no necesariamente representan la opinión del IICA ni juicio alguno de su parte sobre las situaciones o condiciones planteadas.

San José, Costa Rica

2023

# Contenido

Resumen ejecutivo.....	8
Introducción .....	12
Capítulo 1. Introducción a los CAS: aspectos técnicos.....	14
Capítulo 2. El rol de los biocombustibles sostenibles de aviación en la descarbonización del sector .....	38
Capítulo 3. Aspectos económicos de los biocombustibles de aviación.....	49
Capítulo 4. Aspectos institucionales y políticas públicas.....	75
Institucionalidad nacional y temas por normar.....	82
Políticas nacionales.....	86
Normativa en desarrollo.....	84
El caso de la Unión Europea.....	87
Políticas públicas en América Latina.....	94
Casos específicos.....	95
Anexos.....	95
Referencias bibliográficas.....	107

# Índice de gráficos, ilustraciones y tablas

## Gráficos

Gráfico 1. Grado de desarrollo de las vías tecnológicas para producir CAS con base en el criterio de nivel de madurez y disponibilidad de combustibles (FRL), desarrollado por la Iniciativa de Combustibles Alternativos para la Aviación Comercial (CAAFI) (2010).....	34
Gráfico 2. Capacidad operativa y planificada en millones de toneladas de producción.....	35
Gráfico 3. Contribución al cumplimiento del objetivo de cero emisiones netas de carbono para 2050.....	38
Gráfico 4. Costos estimados de producción de la tecnología de HEFA (en USD/l).51	51
Gráfico 5. MFSP de la tecnología de HEFA (en USD/l).....	52
Gráfico 6 Costos estimados de producción de la tecnología de gasificación/FT (en USD/l).....	52
Gráfico 7. MFSP de la tecnología de gasificación/FT (en USD/l).....	53
Gráfico 8. Costos estimados de producción de la tecnología de pirólisis, bioaceite y mejoramiento (en USD/l).....	53
Gráfico 9. MFSP de la tecnología de pirólisis, bioaceite y mejoramiento (en USD/l).54	54
Gráfico 10. Costos estimados de producción de la tecnología de ATJ (en USD/l).54	54
Gráfico 11. MFSP de la tecnología de ATJ (en USD/l).....	55
Gráfico 12. Costos estimados de producción de la tecnología de fermentación avanzada (en USD/l).....	56
Gráfico 13. MFSP de la tecnología de fermentación avanzada (en USD/l).....	56
Gráfico 14. Costos estimados de producción de la tecnología de hidrotermólisis catalítica (en USD/l).....	57
Gráfico 15. MFSP de la tecnología de hidrotermólisis catalítica (en USD/l).....	57
Gráfico 16. Costos estimados de producción de la tecnología de Bio-GtL (en USD/l).....	58
Gráfico 17. MFSP de la tecnología de Bio-GtL (en USD/l).....	58
Gráfico 18. Costos estimados de producción de la tecnología de HTL (en USD/l).59	59
Gráfico 19. MFSP de la tecnología de HTL (en USD/l).....	59
Gráfico 20. Costos estimados de producción de la tecnología de SIP (en USD/l).60	60
Gráfico 21. MFSP de la tecnología de SIP (en USD/l).....	60

Gráfico 22. Costos estimados de producción de la tecnología de APR (en USD/l).....	61
Gráfico 23. MFSP de la tecnología de APR (en USD/l).....	61
Gráfico 24. MFSP de las tecnologías de PtX y FT (en USD/l).....	62
Gráfico 25. Costos de producción del biojet, de acuerdo con los distintos tipos de tecnología y materias primas, comparados con los de la producción de combustible fósil de aviación (promedio de 2022 hasta la semana del 24 de junio de 2022, en USD/l).....	63
Gráfico 26. Rangos de costos de producción del biojet de acuerdo con los distintos tipos de tecnología y materias primas, en comparación con los del jet fósil (promedio de 2022 hasta la semana del 24 de junio de 2022 en USD/l).....	64
Gráfico 27. Curva de los costos estimados de producción de CAS a través de la ruta tecnológica de HEFA (de 2020 a 2050 en USD/t).....	68
Gráfico 28. Curva de costos estimados de la producción de CAS mediante la ruta tecnológica de gasificación/FT (de 2020 a 2050 en USD/t).....	70
Gráfico 29. Curva de costos estimados de la producción de CAS por medio de la ruta tecnológica de ATJ (de 2020 a 2050 en USD/t).....	71
Gráfico 30. Curva de costos estimados de producción de CAS por medio de la ruta tecnológica de electrólisis acuosa y RWGS PtL (de 2020 a 2050 en USD/t).....	73
Gráfico 31. Consumo porcentual esperado de CAS para cumplir las metas de descarbonización de la UE (% como total del combustible de aviación consumido).....	92

## Ilustraciones

Ilustración 1. CAS: subgrupos.....	17
Ilustración 2. Diagrama de las etapas de la ruta de FT.....	20
Ilustración 3. Diagrama de las etapas de la ruta de HEFA.....	22
Ilustración 4. Diagrama de las etapas de la ruta de HFS.....	23
Ilustración 5. Diagrama de las etapas de la ruta de ATJ.....	24
Ilustración 6. Diagrama de las etapas de la ruta de CHJ.....	25
Ilustración 7. Materias primas y rutas tecnológicas dirigidas a la producción de biocombustibles para la aviación.....	30
Ilustración 8. Subproductos obtenidos a través de la tecnología de HEFA en distintas configuraciones de las biorrefinerías.....	31
Ilustración 9. Subproductos obtenidos a través de diferentes tecnologías en las distintas configuraciones de las biorrefinerías.....	32

Ilustración 10. Biojet producido y potencial según la configuración estándar de las biorrefinerías que produjeron diésel renovable (en miles de m <sup>3</sup> ).....	33
Ilustración 11. Capacidad instalada y planificada de CAS por tipo de tecnología y país.....	35
Ilustración 12. CAS que se debe producir y consumir para cumplir las metas de descarbonización de la aviación en 2050.....	47
Ilustración 13. Evolución del precio del petróleo Brent y del combustible de avión (en USD/barril).....	50

## Tablas

Tabla 1. Vías de la ASTM aprobadas para la producción de CAS.....	25
Tabla 2. CAS y otras alternativas actuales y futuras, de acuerdo con las distancias por recorrer.....	40
Tabla 3. Aeropuertos donde se provee CAS.....	43
Tabla 4. Las 10 principales aerolíneas que efectúan contratos de consumo.....	44
Tabla 5. Acuerdos de consumo: los 10 principales productores de combustible por volumen.....	45
Tabla 6. MFSP estimados para diversas formas de producción de CAS (puntos cuadrados), en comparación con el precio promedio correspondiente a un período de tres años del queroseno para reactores con origen en la costa estadounidense del golfo de México (línea continua).....	65
Tabla 7. Costos y limitaciones en la producción de CAS según la ruta.....	66
Tabla 8. Normativa implementada en materia de CAS.....	80
Tabla 9. Normativa en desarrollo.....	84
Tabla 10. Acciones en materia normativa realizadas en ALC.....	95

## Resumen ejecutivo

Los combustibles de aviación sostenibles (CAS) derivados de materias primas biológicas o no fósiles, conocidos como *biojet*, pueden sustituir o complementar a los combustibles para aviación convencionales, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo del ciclo de vida del producto.

Entre dichas materias primas se encuentran los aceites y las grasas, los azúcares y almidones y el material lignocelulósico, que constituyen las tres grandes familias de materias primas utilizables en la producción de *biojet*.

Estas se pueden procesar a partir de nueve rutas tecnológicas aprobadas por la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), dirigidas a modificar las moléculas de biomasa (p. ej., azúcar, lignocelulosa), a fin de cumplir con las especificaciones para la producción de biocombustible de aviación.

De estas nueve rutas tecnológicas, la única que se encuentra desarrollada a escala comercial es la de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA), producida a partir de aceites y grasas. Se estima que esta ruta será la predominante durante los próximos diez a quince años. Además, se espera que en 2025 otras tecnologías generen volúmenes comerciales de *biojet*, en especial el queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch (FT-SPK), el queroseno parafínico sintético a base de alcohol para reactores (ATJ-SPK) y el combustible sintético para *jet* por hidrotermólisis catalítica (CHJ) (IEA Bioenergy 2021).

A diferencia de otras ramas del sector del transporte, como los pequeños vehículos terrestres de combustión reemplazables por la electromovilidad que emplea fuentes de energía renovable para contribuir a la descarbonización, el sector de la aviación es único en cuanto a su dependencia de los combustibles líquidos. En este contexto los CAS constituyen la principal apuesta en las metas de descarbonización del transporte aéreo internacional, ya que representan el 65 % del ahorro de emisiones al 2050<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> El sector de la aviación había establecido medidas para reducir las emisiones, intentando lograr la neutralidad en carbono a partir de 2020 y apuntado a alcanzar emisiones netas de CO<sub>2</sub> equivalentes a cero en 2050. Cabe aclarar que en su 41.ª Asamblea, celebrada en octubre de 2022,

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de CAS podría evitar la obsolescencia anticipada de las aeronaves más antiguas, ya que permite que todos los aviones reduzcan su huella de carbono neta sin necesidad de efectuar cambios técnicos en ellos. En las próximas décadas los CAS resultarán clave para el avance general en la descarbonización de la industria de la aviación. Según la región, la tecnología y el tipo de materia prima, podrían ofrecer muchos otros beneficios además de reducir las emisiones, incluidos la generación de miles de puestos de trabajo, eslabonamientos positivos con el sector agrícola y la utilización de residuos como insumos en el proceso productivo, entre otros.

Crear una industria masiva de CAS con una producción estimada en 449 000 000 m<sup>3</sup> al 2050<sup>2</sup> implicará inversiones significativas, el compromiso del sector privado y políticas públicas dirigidas a su desarrollo. Este desafío es de grandes dimensiones, ya que al mundo le llevó 20 años desarrollar una industria de biocombustibles terrestres (biodiésel y bioetanol) de 165 000 000 m<sup>3</sup> y, en poco menos de 30 años, deberá construir una industria casi tres veces mayor.

De conformidad con lo anterior, cabe considerar que la articulación de políticas públicas en los ámbitos regional y global resultará esencial para desarrollar nuevos mercados, teniendo en cuenta el carácter transfronterizo de los CAS y los (des)incentivos cruzados que podrían producirse en ausencia de una coordinación equilibrada. Además, resulta importante complementar la institucionalidad pública nacional/estadual mediante la coordinación de políticas y acuerdos supranacionales, en particular en materia de vuelos internacionales, en la que ya existen mecanismos como el Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSA).

El establecimiento de instituciones y la formulación de políticas públicas son condiciones necesarias para desarrollar la producción y el consumo de CAS. En varios informes recientes se han evaluado los tipos de políticas requeridos

---

la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) acordó una nueva línea de base más baja de reducciones de GEI a partir de 2024, definida como el 85 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> de 2019. Asimismo, se confirmó la meta colectiva de alcanzar cero emisiones netas de carbono para la aviación internacional en 2050, de conformidad con los objetivos del Acuerdo de París.

<sup>2</sup> Producción necesaria estimada para lograr las metas de descarbonización (IATA 2022a).

para aumentar la producción y el uso del biocombustible de aviación (FEM 2020), considerando las especificidades de una regulación que pueda trascender las fronteras nacionales.

Cabe recordar que, de acuerdo con el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, la OACI es la institución encargada de abordar la reducción de las emisiones de GEI procedentes de la industria de la aviación internacional. Esta indicación se basa en que en dicho protocolo se exige a los países de realizar contribuciones a la aviación, por el carácter transfronterizo de esta, y se asigna la responsabilidad de “limitar o reducir” las emisiones de este sector a la OACI (ONU Cambio Climático 2018a, 2018b). Por otra parte, la aviación civil nacional, los vuelos privados y la aviación militar sí están comprendidas en los objetivos de mitigación nacionales, lo que explica en gran parte por qué las instituciones vinculadas con la aviación civil se incluyen entre las principales entidades impulsoras de la descarbonización del sector.

En la actualidad varios países han empezado a desarrollar políticas para fomentar el uso de CAS y combustibles de aviación con bajas emisiones de carbono. Se destacan los casos de legislaciones ya aprobadas en Noruega, Reino Unido, Indonesia y el estado de California y Oregón en los Estados Unidos, mientras que en Alemania, Francia, España, Portugal, Finlandia, el resto de los Estados Unidos, Brasil y Bélgica se encuentran en desarrollo (OACI 2022).

Dentro de los planes y las políticas públicas se destaca el desarrollo por parte del Gobierno de los Estados Unidos de la iniciativa intitulada Gran Desafío de los Combustibles Sostenibles para la Aviación, dirigida a colaborar con la industria en el aumento de la sostenibilidad, la reducción de los costos y la ampliación de la producción de CAS. Esto se logrará por medio de la generación de 3 billones de galones de CAS por año, con una reducción de al menos 50 % en las emisiones del ciclo de vida de los GEI hasta 2030, en comparación con los combustibles convencionales y de 100 % en el uso de los combustibles previstos o 35 billones de galones de producción anual hasta 2050.

Por su parte, se estima que en 2050 los CAS representarán el 63 % del total de los combustibles para la aviación de la Unión Europea (UE) (Comisión Europea 2020).

Dada la necesidad de contar con insumos a gran escala, el sector agropecuario podría cumplir un rol destacado en la provisión de materias primas para producir *biojet*, ya que cuenta actualmente con suficientes aceites vegetales, grasas animales, azúcares y almidones, alcoholes y materia prima lignocelulósica como para abastecer a este nuevo mercado.

Un punto importante en la masificación del uso de los CAS lo constituirán los precios de su producción, ya que resulta más costosa, en comparación con la de los combustibles fósiles; sin embargo, en recientes análisis técnico-económicos se muestra que actualmente algunas formas de producción se están acercando a la paridad con los combustibles fósiles en este sentido; por lo tanto, será muy importante trabajar en la generación de eficientes industrias a escala que busquen reducir los costos de producción de *biojet*, a fin de lograr abastecer al mercado con un producto sostenible, abundante y económico.

## Introducción

Las emisiones de GEI derivadas de la actividad humana han generado una crisis climática, lo que obliga a la comunidad internacional a tomar medidas urgentes para disminuir sus impactos. El sector de la aviación representa aproximadamente del 2 % al 3 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y el 12 % de las emisiones producidas por el transporte. Con arreglo a las acciones adoptadas en todo el mundo, el sector de la aviación ha adoptado medidas para reducir sus emisiones, logrando la neutralidad en carbono a partir de 2020 y apuntando a alcanzar cero emisiones netas de CO<sub>2</sub> en 2050.

Cabe aclarar que en su 41.ª Asamblea, celebrada en octubre de 2022, la OACI acordó una nueva línea de base más baja de reducciones de GEI a partir de 2024, definida como el 85 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> de 2019. Asimismo, se confirmó la meta colectiva de alcanzar cero emisiones netas de carbono para la aviación internacional en 2050, de conformidad con los objetivos del Acuerdo de París.

A diferencia de otras ramas del sector del transporte, como los pequeños vehículos terrestres de combustión reemplazables por la electromovilidad que emplea fuentes de energía renovable para contribuir a la descarbonización, el sector de la aviación es único en términos de su dependencia de los combustibles líquidos.

De acuerdo con IEA Bioenergy (2021), el sector seguirá dependiendo de los combustibles líquidos, a pesar de las investigaciones en curso sobre tecnologías alternativas como las de motores eléctricos e hidrógeno verde. Es poco probable que en el corto plazo estas tecnologías de baja intensidad de carbono estén listas para un despliegue comercial a gran escala en todo el sector, ya que enfrentan como obstáculo adicional el diseño y la fabricación de nuevas unidades aeronáuticas, debido a la larga vida útil de los aviones.

Como resultado de la necesidad de reducir las emisiones de GEI y la imposibilidad de implantar nuevos paradigmas de movilidad aérea alternativos a la combustión interna, los CAS surgen como una alternativa de alto potencial. Las rutas tecnológicas más prometedoras utilizan materias primas de origen biológico como principales insumos. En tal sentido, los biocombustibles para la aviación son las opciones más desarrolladas de CAS.



**Introducción a los CAS:  
aspectos técnicos**

## Capítulo 1.

# Introducción a los CAS: aspectos técnicos

De acuerdo con el Centro de Datos de Combustibles Alternativos y Vehículos Avanzados (AFDC 2021) del Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDOE), a diferencia de los combustibles fósiles, los CAS, derivados de recursos renovables, permiten reducir las emisiones netas de dióxido de carbono durante todo el ciclo de vida del producto.

Entonces, los combustibles sostenibles para aviación se definen como combustibles derivados de materias primas biológicas o no fósiles, que pueden sustituir o complementar a los combustibles para aviación derivados del petróleo, reduciendo las emisiones de GEI a lo largo del ciclo de vida del producto<sup>3</sup>.

En el CORSIA, elaborado por la OACI, se completa esta definición señalando como segundo principio fundamental que los CAS no deben provenir de biomasa obtenida de terrenos con una reserva significativa de carbono (ProQR 2022). Según lo anterior, existen dos criterios que un combustible debe cumplir para ser certificado como CAS: 1) este no debe proceder de biomasa obtenida de tierras regeneradas después del 1 de enero de 2008 o producida de forma tal que contribuya a la degradación de las reservas de carbono en bosques primarios, pantanos y turberas, una vez que esas tierras presentan grandes reservas de carbono; y 2) si se trata de terrenos regenerados después del 1 de enero de 2008, las emisiones del cambio se deben calcular con base en el uso de la tierra (OACI 2019b).

En 2019 la OACI publicó un documento complementario en el que se incluye la metodología de evaluación de ciclos de vida, que toma en cuenta toda la cadena productiva y el uso de CAS para su consideración como combustible elegible en el CORSIA (OACI 2019a). Según lo anterior, se deben considerar todas las emisiones de GEI derivadas del proceso productivo (siembra, cosecha, procesos químicos, electricidad consumida, transporte y distribución) (ProQR

---

<sup>3</sup> Uno de los criterios de sostenibilidad de la OACI (2019b) es que los CAS deben generar reducciones netas de GEI de por lo menos 10 %, en comparación con los combustibles fósiles, tomando como base su ciclo de vida.

2022). Basándose en este acuerdo y observando los protocolos de certificación de la ASTM, el CORSIA se ha convertido en el método más empleado para calcular las emisiones de GEI de los ciclos de vida de los CAS (Prussi *et al.* 2021).

Aunque los CAS pueden reducir las emisiones de GEI (en comparación con los combustibles fósiles, según un análisis de su ciclo de vida), el potencial de reducción de emisiones de diferentes materias primas y vías tecnológicas se ve influenciado por factores como la ubicación geográfica de las instalaciones de producción y la naturaleza de los servicios públicos y la infraestructura locales. La OACI ha establecido por defecto evaluaciones del ciclo de vida para las tecnologías de CAS actuales, las cuales muestran reducciones de carbono de hasta el 90 %<sup>4</sup> (OACI 2019c).

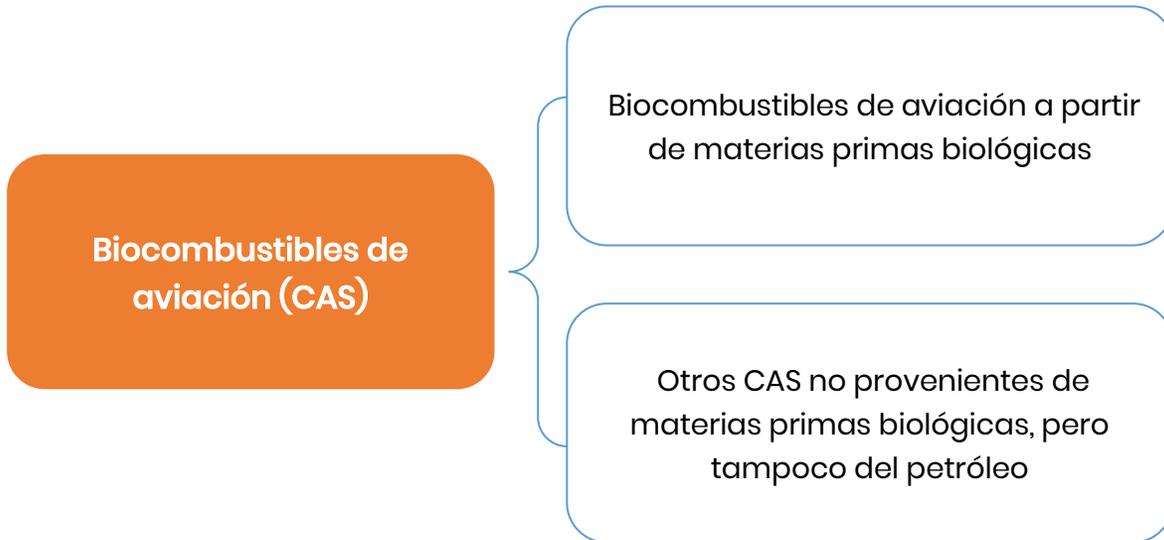
De conformidad con el tipo de materia prima utilizada en la producción, los CAS se pueden dividir en dos grandes categorías: 1) aquellos producidos a partir de materias primas de origen biológico, a los cuales se les denomina biocombustibles sostenibles de aviación o *biojet fuels*; y 2) los combustibles sostenibles que no provienen de materias primas biológicas, pero que tampoco se derivan del petróleo<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> De acuerdo con el Foro Económico Mundial (FEM) (2020), los CAS pueden en teoría reducir las emisiones durante su ciclo de vida hasta en 99 %, según la tecnología, la materia prima y el transporte empleados.

<sup>5</sup> Se están estudiando rutas adicionales para producir combustibles alternativos directamente a partir del CO<sub>2</sub>, incluido el CO<sub>2</sub> capturado de la atmósfera sin emplear biomasa. En la conversión se usa energía renovable para descomponer el CO<sub>2</sub> en CO y O<sub>2</sub> y el agua en H<sub>2</sub> y O, para después recombinar CO y H<sub>2</sub> en un hidrocarburo líquido utilizando la tecnología Fischer-Tropsch. En la actualidad estos procesos se encuentran en la etapa de investigación; por consiguiente, una gran cantidad de procesos en desarrollo permite el procesamiento de casi todos los tipos de materia prima en componentes de combustible para aviones, lo que ofrece flexibilidad para la adaptación y la optimización. La mayoría de estas diversas vías no producen de manera directa un combustible de avión, sino componentes que se deben mezclar con jet A-1 para obtener el combustible final. Cabe señalar que estos procesos coproducen combustibles utilizables en el transporte por carretera (Torroba 2021).

### Ilustración 1. CAS: subgrupos.



El grupo de biocombustibles sostenibles de aviación presenta un grado de desarrollo muy superior al del segundo grupo que no utiliza materias primas de origen biológico. Además, en su producción se utilizan tres grandes familias de materias primas de origen biológico (Torroba 2021):

#### 1) Aceites y grasas

Los triglicéridos, una clase de lípidos formada por moléculas de glicerol y ácidos grasos, son los componentes principales de los combustibles elaborados a base de aceites y grasas; no obstante, contienen también oxígeno, una molécula que debe ser eliminada, ya que los combustibles deben contener solamente hidrocarburos puros, es decir, carbono e hidrógeno, debido a lo cual diferentes procesos de purificación de los triglicéridos resultan imprescindibles para su conversión en combustibles. El método aprobado de uso de estas materias primas es el de HEFA.

#### 2) Azúcares y almidón

Es posible producir combustibles a partir de azúcares y de almidón provenientes de cultivos y de cereales, respectivamente, a través de una asociación con rutas de fermentación capaces de convertir los alcoholes obtenidos en hidrocarburos. Esta ruta se denomina alcohol para reactores

(ATJ). Asimismo, bacterias, levaduras y algas heterótrofas pueden usar azúcares derivados de la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el almidón y otros polisacáridos para el almacenamiento de energía, mientras que otras bacterias pueden usar monóxido de carbono e hidrógeno proveniente de gases residuales industriales (Karatzos *et al.* 2014). Algunos métodos aprobados siguen estos procesos, como las isoparafinas sintéticas (SIP) y el ATJ-SPK. De manera similar, microorganismos como cianobacterias y algas pueden capturar el CO<sub>2</sub> directamente de la atmósfera y convertirlo en etanol o lípidos.

### 3) Material lignocelulósico

El material lignocelulósico, que se encuentra en la pared de células vegetales como las de la madera, el trigo y el arroz, se obtiene de diferentes cultivos de residuos o algas. Es posible utilizarlo como biomasa en la generación de combustibles, dado su elevado contenido de polímeros de celulosa, hemicelulosa y lignina. Para convertirlo directamente en hidrocarburos, se efectúan procesos termoquímicos como el Fischer-Tropsch (FT) y la pirólisis. Adicionalmente, es posible transformar la lignocelulosa en azúcares y usarla en las rutas de fermentación antes mencionadas. De manera semejante, los azúcares pueden ser convertidos en aceites mediante rutas metabólicas distintas y pasar por un proceso de desoxigenación para su transformación en combustibles (Torroba 2021).

Las materias primas descritas se pueden procesar por medio de nueve rutas tecnológicas aprobadas por la ASTM, dirigidas a modificar las moléculas de biomasa (p. ej., azúcar y lignocelulosa) a fin de cumplir con las especificaciones para producir biocombustible de aviación. Los cambios moleculares se pueden producir químicamente, a través de reacciones químicas controladas por catalizadores a temperaturas y/o presiones elevadas, o de forma biológica, mediante biocatalizadores a temperaturas moderadas. Los procesos involucrados en estas transformaciones varían, dependiendo de la ruta tecnológica empleada. En algunos casos se requieren pretratamientos de la biomasa para generar la materia prima. El siguiente paso, común a todas las rutas, es la primera conversión de la materia prima generada en productos

intermediarios (p. ej., biocrudo y alcohol), seguida por una segunda conversión, en la que dichos productos se procesan para obtener los biocombustibles. De acuerdo con la certificación de la ASTM, los combustibles sintéticos (como el bioqueroseno) se clasifican en:

- Queroseno parafínico sintético (SPK), constituido por hidrocarburos con enlaces simples y cadenas abiertas, es decir, saturados y acíclicos;
- Queroseno parafínico sintético con aromáticos derivados de la alquilación de aromáticos ligeros de fuentes distintas del petróleo (SPK/A), que se compone de hidrocarburos aromáticos, o sea, compuestos cíclicos formados por anillos de benceno; e
- SIP, que son hidrocarburos de cadenas abiertas con ramificaciones (Neuling y Kaltschmitt 2018).

A continuación se describen las rutas tecnológicas aprobadas por la ASTM, así como sus respectivos procesos.

- **FT-SPK**

Certificada por la ASTM en 2009, la ruta de FT tiene un límite de mezcla de 50 %, mientras que el SPK, compuesto por una mezcla de hidrocarburos *n*- e isoalcanos, constituyó el primer combustible alternativo aprobado. Como materia prima se utilizan residuos urbanos, agrícolas y forestales, así como recursos no renovables como el gas natural. Para sintetizar el queroseno parafínico la materia prima se gasifica y transforma en monóxido de carbono e hidrógeno, que se sintetizan en parafinas de cadena larga. Posteriormente, esas parafinas se usan en la producción de CAS (Roitman 2018, ProQR 2022).

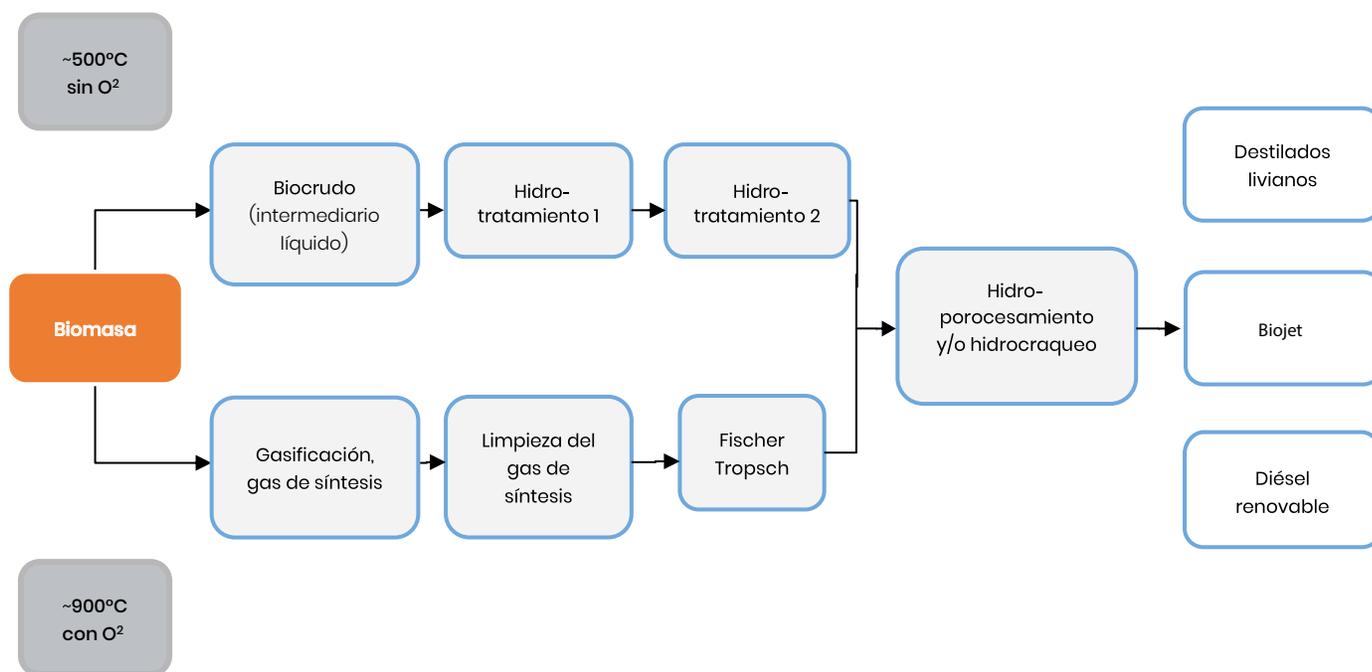
En este proceso se emplea una tecnología termoquímica denominada gasificación con síntesis FT. Otros ejemplos de dicha tecnología son la licuefacción termoquímica y la hidrotermal. Todas ellas producen intermediarios sólidos, gaseosos y líquidos, cuyas fracciones pueden variar. En la gasificación el producto de interés para la producción de combustibles es el intermediario gaseoso, mientras que en la licuefacción termoquímica directa es el intermediario líquido o el biocrudo (IEA Bioenergy 2021).

Cabe señalar que, aunque la síntesis FT es un proceso termoquímico, ocurre en presencia de un agente oxidante ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ) para producir una mezcla de

singás rica en CO y H<sub>2</sub>. La gasificación empleada en esta ruta genera otros productos como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, compuestos orgánicos pesados e inorgánicos (alcalinos y de azufre) y partículas. Después de la gasificación, el singás caliente se enfría y se eliminan todos los contaminantes para aumentar la proporción de CO: H<sub>2</sub>. Se pueden obtener varios productos a partir del singás producido; sin embargo, en este caso el enfoque es el procesamiento catalítico FT de singás para extender la longitud de la cadena de carbono (–CO–)<sub>n</sub>, a fin de producir combustibles de hidrocarburo (Tanzil *et al.* 2021).

Las tecnologías de gasificación han sido usadas por décadas en diferentes aplicaciones. Los coproductos sólidos o gaseosos del proceso pueden ser usados de diferentes maneras, p. ej., en la generación de calor o energía; no obstante, su aplicación en la producción de biocombustibles usando FT no es tan común, ya que la utilización de materias primas biológicas presenta desafíos que impactan en la selección de la tecnología de gasificación. Actualmente nuevas tecnologías están en desarrollo para permitir FT en pequeña escala y mejorar sus rendimientos (LeViness *et al.* 2014).

**Ilustración 2.** Diagrama de las etapas de la ruta de FT.



**Fuente:** Elaborado con base en Tanzil *et al.* . 2021.

- **Queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch con aromáticos derivados de la alquilación de aromáticos ligeros de fuentes distintas del petróleo (FT-SPK/A).**

Certificada en 2015, la ruta de FT-SPK/A tiene un límite de mezcla de 50 %. Se diferencia de la ruta de FT-SPK en el empleo de SPK/A. Esto representa un gran paso en el desarrollo de los CAS, ya que antes estos estaban compuestos únicamente por n- e isoalcanos. Como materia prima utiliza residuos urbanos, agrícolas y forestales, así como materiales no renovables como el carbón.

Después de los procesos de la ruta FT, se lleva a cabo la alquilación de aromáticos ligeros para producir una mezcla de hidrocarburos que evita las fugas de combustible (ProQR 2022).

- **FT coprocesado: cohidroprocesamiento de hidrocarburos FT en una refinería petrolera convencional.**

Esta ruta es extremadamente reciente, ya que fue certificada por la ASTM a fines de 2021. Difiere de las otras rutas de FT en el cohidroprocesamiento de los hidrocarburos FT en una refinería petrolera convencional. Los hidrocarburos de esta ruta se procesan junto con el petróleo (OAC 2021b). Debido a su reciente introducción, su límite de mezcla es de solo 5 %.

- **Queroseno parafínico sintético de ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA-SPK).**

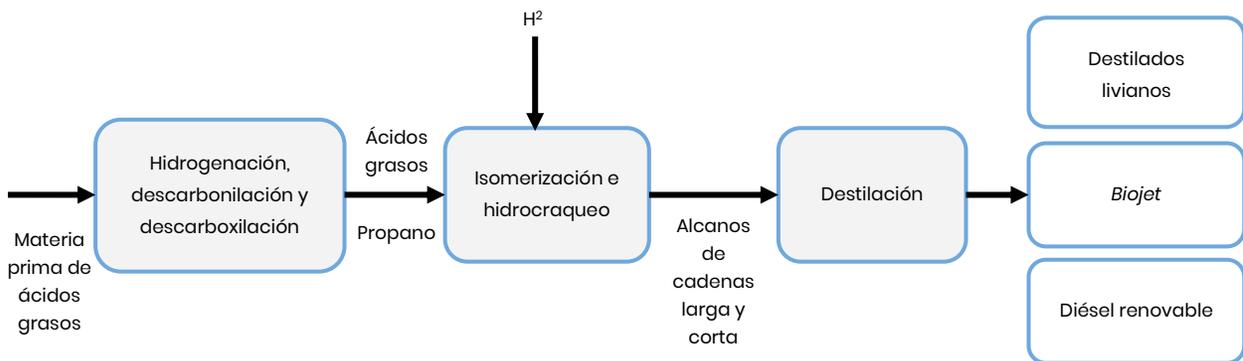
En la ruta de HEFA, certificada en 2011 y con un límite de mezcla de 50 %, se emplean aceites y grasas de origen vegetal y animal como biomasa en la producción de queroseno parafínico. Su composición molecular es similar a la de FT y consta de iso- y n-alcanos que componen el SPK. Por medio de reacciones de hidrogenación, el oxígeno y otras moléculas no deseadas se eliminan para producir hidrocarburos, que son craqueados e isomerizados para posibilitar su mezcla con combustibles convencionales. Esta ruta tiene un impacto ambiental más grande, dado que la hidrogenación catalítica requiere muchas moléculas de hidrógeno que suelen ser de origen fósil (Roitman 2018, ProQR 2022); sin embargo, la ruta de HEFA es la única que se opera a escala comercial.

El primer paso de la ruta para la producción de combustible en la refinería es seccionar la cadena de propano del esqueleto principal de glicerol a través del proceso de hidrogenación. Seguidamente se llevan a cabo el craqueo, la hidrodeshidrogenación y la descarbonilación de la cadena de ácidos grasos. Luego se inicia la isomerización para convertir el hidrocarburo parafínico lineal en una

configuración iso, a fin de mejorar las propiedades de flujo en frío del combustible (Starck *et al.* 2016).

Con respecto a la materia prima, se puede usar cualquier aceite vegetal puro, pero existen diferencias en cuanto a precio y tratamiento. P. ej., si se emplea aceite de cocina usado, el manejo de los desechos resulta más desafiante para garantizar los procesos en el catalizador, debido a lo cual normalmente la biomasa se prerrefina, se limpia y se acondiciona antes de su suministro a la refinería de HEFA (Neuling y Kaltschmitt 2018).

**Ilustración 3.** Diagrama de las etapas de la ruta de HEFA.



**Fuente:** Elaborado con base en Tanzil *et al.* 2021.

- **HEFA coprocesados:** cohidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos en refinería petrolera convencional

La ruta de HEFA coprocesados fue certificada por la ASTM a fines de 2021. Se diferencia de la ruta de HEFA tradicional en que el cohidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos se efectúa en una refinería petrolera convencional. Como en la ruta de FT, su límite de mezcla es de 5 % (OACI 2021b).

- Isoparafinas sintéticas producidas a partir de azúcares fermentados hidroprocesados (**HFS-SIP**):

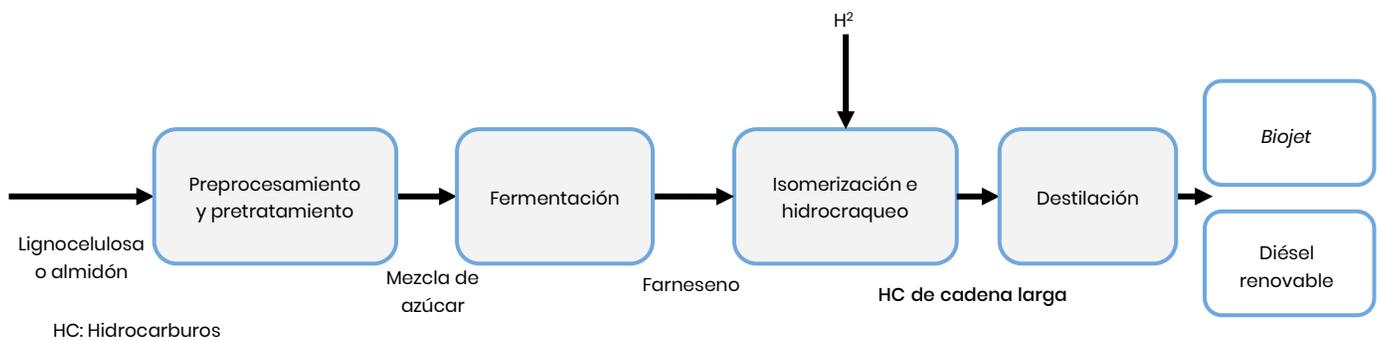
Certificada en 2014, la ruta de HFS-SIP tiene un límite de mezcla de 10 % y utiliza azúcares como materia prima. Estas moléculas se fermentan mediante levaduras genéticamente modificadas para producir hidrocarburos.

Las SIP son cadenas ramificadas de hidrocarburos de farnesenos. A diferencia de los HEFA o del FT, que generan varias moléculas, la ruta de HFS produce solamente

el farneseno, que es un compuesto sesquiterpeno hidratado de 15 carbonos. Los farnesenos se hidrogenan para generar farnesanos, a fin de que las moléculas obtenidas se mezclen con el combustible (Tanzil et al. 2021). Como las SIP están compuestas únicamente por isoparafinas, la mezcla del bioqueroseno con el CAS se limita a 10 % (Roitman 2018).

En la actualidad se está aumentando el uso de esta ruta para que su comercialización crezca.

**Ilustración 4.** Diagrama de las etapas de la ruta de HFS.



**Fuente:** Elaborado con base en Tanzil et al. 2021.

- **ATJ-SPK** (isobutanol y etanol)

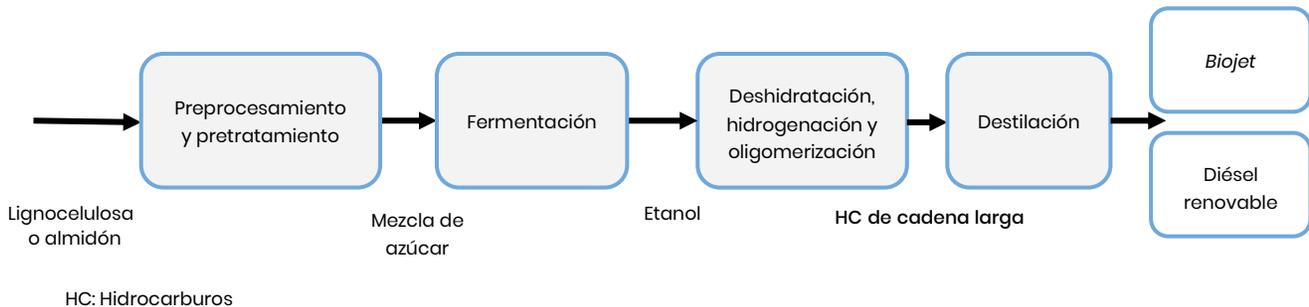
En 2016 la ruta de ATJ-SPK para isobutanol se certificó con un límite de mezcla de 30 % y en 2018 se expandió para mezclas de hasta 50 %. El ATJ-SPK de isobutanol está compuesto por SPK constituido por hidrocarburos isoalcanos de 8, 12 o 16 carbonos, los cuales están muy ramificados. En la ruta ATJ-SPK para etanol, certificada en 2018 y con un límite de mezcla de 50 %, el número de carbonos se amplía y el nivel de ramificación se puede reducir significativamente (USDOE 2020).

En ambas rutas, en las que se utilizan almidones, azúcares y biomasa lignocelulósica como materia prima, el alcohol se convierte en hidrocarburos de cadena larga. Aunque el isobutanol y el etanol constituyen los alcoholes más adecuados para llevar a cabo este proceso, se pueden utilizar otros como la acetona-butanol-etanol. En la refinería el primer paso es la deshidratación catalítica del alcohol, que se convierte en olefinas de cadena larga debido a las reacciones de polimerización. Luego se realiza el hidrotratamiento, en el que

estas olefinas se convierten en hidrocarburos saturados por reacciones de desoxigenación e hidrogenación (Tanzil *et al.* 2021).

El mayor desafío que enfrenta esta ruta es la competencia entre sus combustibles y los fósiles, ya que el proceso de transformación del alcohol, específicamente del etanol, supone altos costos tecnológicos, logísticos y de materias primas (Escalante *et al.* 2022). Además, la producción de bioqueroseno de aviación por medio de la ruta de ATJ representa una competencia para la producción de otros biocombustibles, principalmente etanol, en lo que se refiere a las materias primas utilizadas y a las emisiones de créditos de carbono (ProQR 2022).

**Ilustración 5.** Diagrama de las etapas de la ruta de ATJ.



**Fuente:** Elaborado con base en Tanzil *et al.* 2021.

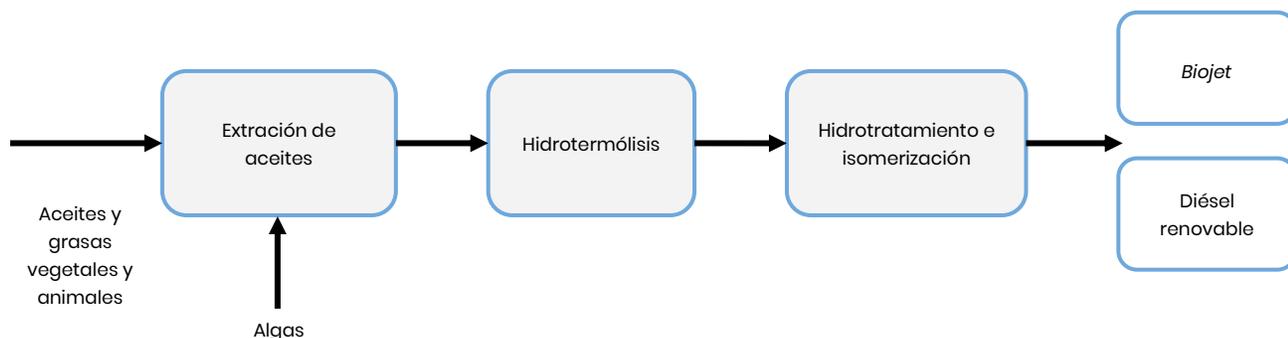
- **CHJ**

Certificada en 2020, esta ruta tiene un límite de mezcla de 50 % y utiliza aceites vegetales o residuales para producir biocombustibles. Se trata de una ruta similar a la de HEFA; no obstante, presenta diferencias significativas en sus procesos. Después de la limpieza y la filtración, los aceites y las grasas se someten a una hidrotermólisis, durante la cual se combinan con agua y se llevan a altas temperaturas y presiones. La mezcla resultante se isomeriza, a fin de que las moléculas generadas requieran menos hidrotreatamientos que en la ruta de HEFA (ProQR 2022). Genera compuestos como parafinas, isoparafinas, cicloparafinas y compuestos aromáticos (IATA 2019).

Se espera que esta ruta, implementable en refinerías de petróleo convencionales, promueva una gran reducción de GEI (Pavlenko y Searle 2021). Según Applied Research Associates, esta ruta tiene el potencial de reducir en 80 % las emisiones

de GEI y, debido a que los combustibles generados en la ruta presentan la misma densidad de los combustibles fósiles, es posible que en el futuro estos sean reemplazados sin necesidad de efectuar una mezcla (ARA 2021). Además, esta ruta consume 25 % menos hidrógeno que la de HEFA, lo que demuestra su potencial de producción.

**Ilustración 6.** Diagrama de las etapas de la ruta de CHJ.



**Fuente:** Elaborado con base en Tanzil *et al.* 2021.

En el siguiente cuadro se recapitulan todos los procesos tecnológicos aprobados a través de la norma ASTM para la producción de CAS, su año de aprobación, las posibles materias primas por utilizar y el volumen máximo de mezcla con combustibles fósiles.

**Tabla 1. Vías de la ASTM aprobadas para la producción de CAS.**

Referencia de la ASTM	Proceso aprobado por la ASTM	Año de aprobación	Opciones de materia prima	Proporción de mezcla por volumen
ASTM D7566, anexo 1	<b>FT-SPK</b>	2009	<b>Biomasa lignocelulósica</b> Residuos agrícolas y forestales (p. ej., bagazo y rastrojo de caña)	Hasta 50 %

			de azúcar, copas de árboles y rastrojo y tallos de maíz) y desechos municipales	
ASTM D7566, anexo 2	<b>HEFA-SPK</b>	2011	<b>Aceites y grasas</b> Camelina, Jatropha, aceites de ricino, de palma y de cocina usado y grasa animal	Hasta 50 %
ASTM D7566, anexo 3	<b>HFS-SIP</b>	2014	<b>Conversión microbiana de azúcares en hidrocarburos</b> Caña de azúcar, mandioca, sorgo y maíz	Hasta 10 %
ASTM D7566, anexo 4	<b>FT-SPK/A</b>	2015	<b>Biomasa lignocelulósica</b> Residuos agrícolas y forestales (p. ej., bagazo y rastrojo de caña de azúcar, copas de árboles y rastrojo y tallos de maíz) y desechos municipales	Hasta 50 %

ASTM D7566, anexo 5	<b>ATJ-SPK (isobutanol)</b>	2016	<b>Biomasa utilizada para la producción de azúcar y biomasa lignocelulósica</b> Caña de azúcar, mandioca, sorgo, maíz y etanol	Hasta 50 %
ASTM D7566, anexo 5	<b>ATJ-SPK (etanol)</b>	2018	<b>Biomasa utilizada para la producción de azúcar y biomasa lignocelulósica</b> Caña de azúcar, mandioca, sorgo, maíz y etanol	Hasta 50 %
ASTM D7566, anexo 7	<b>CHJ</b>	2020	<b>Materia prima basada en triglicéridos</b> Residuos, algas, soja, Jatropha, camelina y carinata	Hasta 50 %
ASTM D1655, anexo A1	<b>HEFA coprocesado</b>	2021	<b>Aceites y grasas</b> Camelina, Jatropha, aceites de ricino, de palma y de cocina usado y grasa animal	Hasta 5 %
ASTM D1655, anexo A1	<b>FT coprocesado</b>	2021	<b>Biomasa lignocelulósica</b> Residuos agrícolas y	Hasta 5 %

			forestales (p. ej., bagazo y rastrojo de caña de azúcar, copas de árboles y rastrojo y tallos de maíz) y desechos municipales	
--	--	--	---	--

**Fuente:** Elaborado con base en OACI 2021b y Torroba 2021.

### **Un avión Boeing 747 realizó un vuelo de prueba con CAS.**

Tres grandes compañías se han destacado por estar a la vanguardia en el mercado de la aviación: Rolls-Royce, fabricante de automóviles de lujo; The Boeing Company, productora de helicópteros, misiles y satélites; y World Energy, elaboradora de combustibles bajos en carbono, las cuales han decidido trabajar de manera conjunta para llevar a cabo vuelos con cero emisiones de carbono.

La unión de estas compañías de origen británico y estadounidense permitió la realización exitosa de un vuelo de prueba del 747 Flying Testbed, utilizando CAS en un motor Trent 1000 (Poleri 2021).

La prueba consistió en efectuar un recorrido con un motor Trent 1000 en funcionamiento exclusivamente con CAS, el cual inició en el aeropuerto internacional de Tucson, Arizona y atravesó los estados de Nuevo México y Texas. Cabe destacar que los otros tres motores que completaron la propulsión del cuatrimotor son del modelo RB211 y utilizaron combustible fósil convencional. La misión se completó sin ningún problema técnico ni contratiempos ocasionados por el clima, lo que enciende las luces verdes para realizar vuelos cortos con CAS.

Los directivos de las compañías resaltan la importancia de la aviación como medio para reforzar el bien cultural, debido a lo cual se deben emprender acciones concretas para disminuir su impacto negativo en el medio ambiente. El éxito del vuelo demuestra como los CAS podrían a largo plazo reemplazar completamente los combustibles tradicionales y convertirse en la principal opción para descarbonizar la aviación en un plazo máximo de 30 años.

Mientras tanto, el trabajo de la compañía británica Rolls-Royce continúa, pues anunció que en 2023 todos sus motores Trent, utilizados en una gama de aviones de largo recorrido, habrán demostrado ser en su totalidad compatibles con los CAS, lo que implica que en aproximadamente dos años se demostrará cómo la industria puede funcionar en largas y cortas distancias con cero emisiones de carbono.

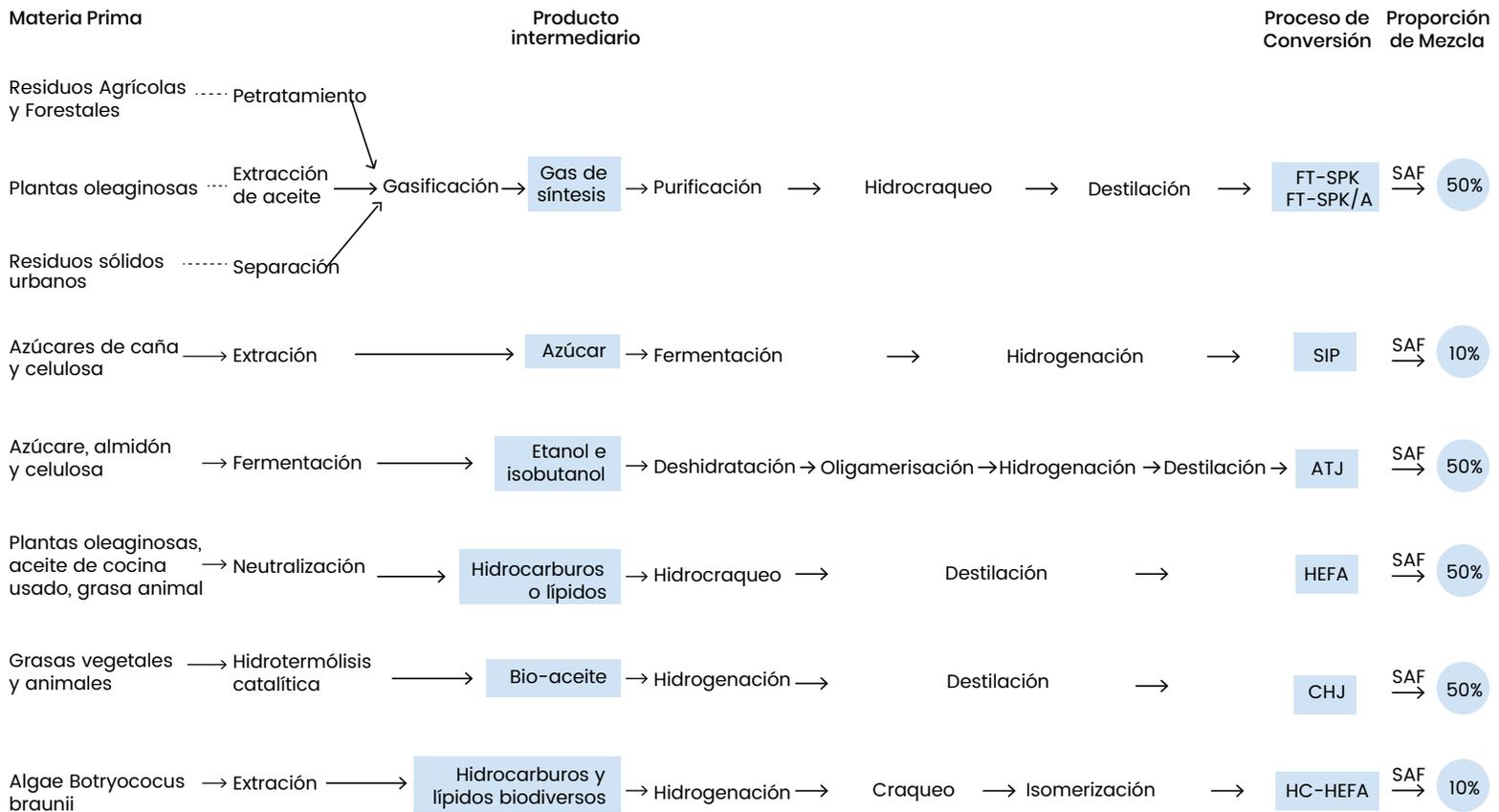
Además de trabajar con The Boeing Company y World Energy, Rolls-Royce ha aunado sus esfuerzos a los de Airbus, el principal fabricante de aeronaves de todo el mundo, así como a los de Royal Dutch Shell, una compañía productora de hidrocarburos con amplio interés en el gas natural y el refinado de gasolina, a fin de impulsar la participación gubernamental en la transición de la aviación de largo alcance hacia las cero emisiones, recalcando la necesidad de crear la infraestructura, efectuar las inversiones y establecer los marcos de políticas necesarios para apoyar la ampliación y el uso de CAS (Duvelleroy 2021).

Estas acciones no han pasado desapercibidas, ya que luego del lanzamiento de la iniciativa *Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge*, cuyo objetivo es fomentar la producción de 11 000 millones de litros de CAS por año hasta 2030, el Gobierno de los Estados Unidos reconoció hace poco la necesidad de aumentar significativamente su producción. Por otra parte, la UE lanzó el programa ReFuelEU Aviation, que exige la incorporación de CAS en los combustibles suministrados en los aeropuertos de la Unión.

**Fuente:** Elaborado con base en Duvelleroy 2021 y Poleri 2021.

En la siguiente ilustración se presentan en forma esquemática las materias primas empleadas en las diferentes rutas tecnológicas de producción de biocombustibles sostenibles para la aviación.

**Ilustración 7.** Materias primas y rutas tecnológicas dirigidas a la producción de biocombustibles para la aviación.



**Fuente:** Cabrera y Sousa 2022

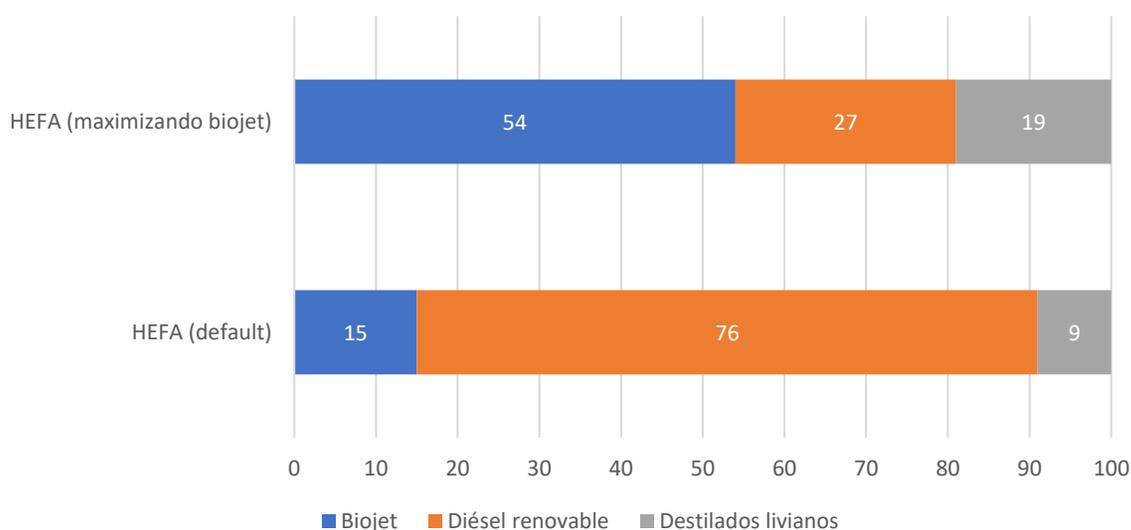
A pesar de que siete vías tecnológicas de procesamiento de CAS y dos vías de coprocesamiento han sido certificadas por la ASTM, en la actualidad la gran mayoría se produce mediante la vía HEFA. Esta ruta tecnológica es la misma que se aplica en la producción de diésel renovable o aceites vegetales hidrotratados (HVO)<sup>6</sup>, con un paso de fraccionamiento posterior (IRENA 2021).

<sup>6</sup> Los CAS utilizan una mezcla de moléculas de hidrocarburos de C<sub>4</sub> a C<sub>12</sub>, mientras que el diésel renovable emplea una de C<sub>12</sub> a C<sub>20</sub>.

Hoy en el mundo la gran mayoría de biocombustibles de aviación se produce por medio de la vía de HEFA y se estima que será la predominante durante los próximos diez a quince años (IEA Bioenergy 2021).

Este proceso productivo da origen a tres subproductos: diésel renovable, biocombustible de aviación y destilados livianos<sup>7</sup>. En su configuración habitual las biorrefinerías producen una pequeña parte de biocombustibles de aviación y destilados livianos y más del 75 % del diésel renovable. Debido al crecimiento de la demanda y a diversos incentivos fiscales, los procesos productivos se han diseñado para maximizar la producción de diésel renovable, por lo que las configuraciones de las biorrefinerías suelen modificarse para orientar toda la producción a la obtención de este último producto.

**Ilustración 8.** Subproductos obtenidos a través de la tecnología de HEFA en distintas configuraciones de las biorrefinerías.



**Fuente:** Elaborado con base en IEA Bioenergy 2021.

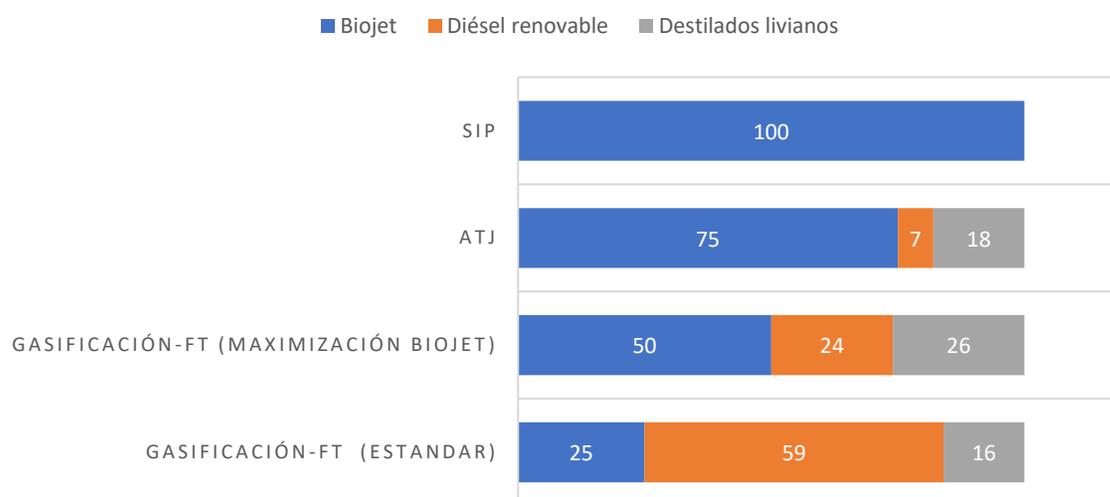
Por lo tanto, si se motivara a las refinerías de HEFA para que produzcan *biojet*, además de diésel renovable, al menos el 15 % de los combustibles de baja emisión de carbono que se producen actualmente podrían ser *biojet*. Esto aumentaría inmediatamente la disponibilidad de este combustible a un costo de inversión

<sup>7</sup> Se destaca la producción de nafta renovable, insumo intermedio que se puede utilizar en la producción de gasolinas renovables, bioplásticos y biohidrógeno.

moderado (Malins y Sandford 2022). Cabe destacar que, en especial en Estados Unidos, los incentivos federales y estatales sesgan la mezcla de producción en contra del *biojet*<sup>8</sup> y a favor de los HVO.

Además de la tecnología de HEFA, se estima que en 2025 otras tecnologías podrían estar produciendo volúmenes comerciales de *biojet*, en especial las de FT-SPK, ATJ-SPK y CHJ (IEA Bioenergy 2021); sin embargo, al igual que con la tecnología de HEFA, todos estos procesos producen múltiples productos combustibles que típicamente incluyen una fracción de combustible *biojet*. Por lo tanto, las decisiones de producción estarán vinculadas con las relaciones de costos y precios de los combustibles y los biocombustibles y, particularmente, en los últimos influyen e influirán los distintos tipos de mecanismos de regulación e incentivos.

**Ilustración 9.** Subproductos obtenidos a través de diferentes tecnologías en las distintas configuraciones de las biorrefinerías.

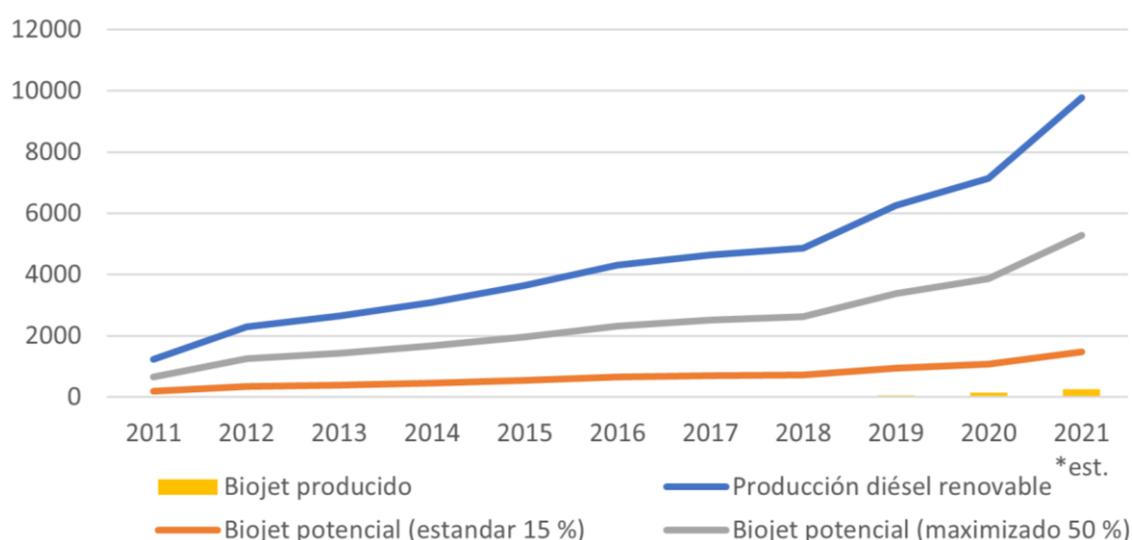


**Fuente:** Elaborado con base en IEA Bioenergy 2021.

<sup>8</sup> En la actualidad Estados Unidos apoya el suministro de diésel renovable mediante la Norma Federal de Combustibles Renovables, un crédito fiscal para mezcladores de diésel a base de biomasa, y por medio de políticas en el plano estatal, como la Norma de Combustibles Bajos en Carbono de California y el Programa de Combustibles Limpios de Oregón. Con base en los valores recientes de los créditos de estos programas, entendidos como apoyo político, el diésel renovable a base de aceite de desecho suministrado en California podría tener un valor de USD 4 por galón. De hecho, este país, que en 2020 produjo más de 500 millones de galones, cuenta con una capacidad de producción de diésel renovable de unos 800 millones de galones.

A pesar de que la producción de *biojet* se viene incrementando sustantivamente, lo hace desde un piso muy bajo. Si se considera el supuesto de que el 15 % de la producción de diésel renovable se podría haber destinado a la producción de *biojet*, se puede concluir que en 2020 solo se produjo 13 % del potencial y que en 2021 dicho porcentaje se elevó a 17 %. Este punto permite resaltar que en 2020 se podrían haber producido cerca de 1 000 000 m<sup>3</sup>, con inversiones moderadas y la recalibración de la mezcla de productos.

**Ilustración 10.** *Biojet* producido y potencial según la configuración estándar de las biorrefinerías que produjeron diésel renovable (en miles de m<sup>3</sup>).

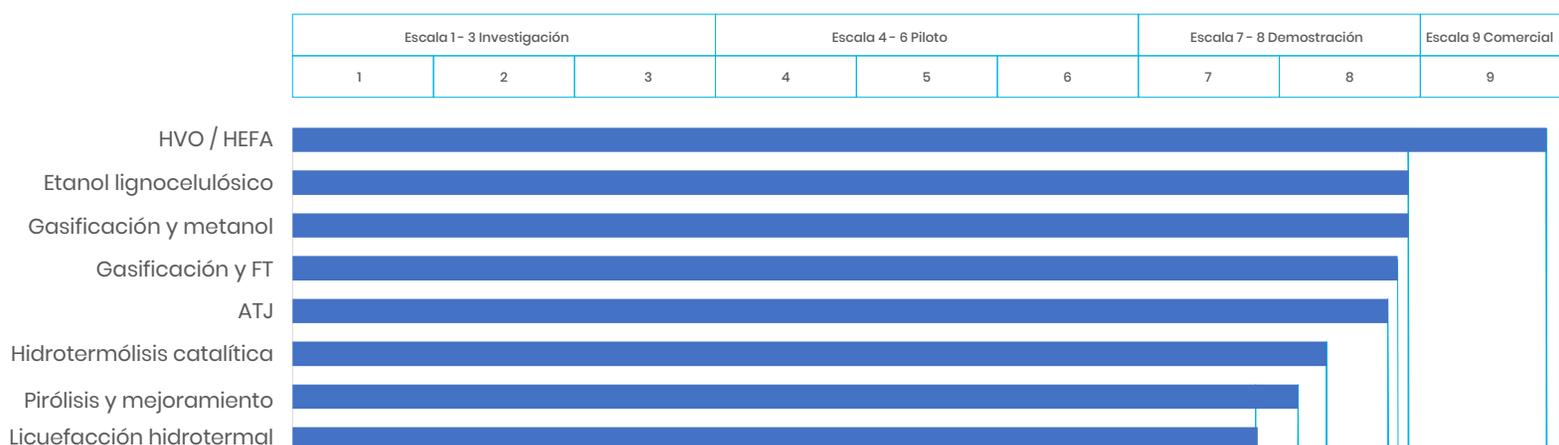


\*est.: estimado

**Fuente:** Elaborado con base en IEA Bioenergy 2021 e IRENA 2021.

A corto y mediano plazos la ruta tecnológica de HEFA es la forma más rápida de proporcionar volúmenes sustanciales de biocombustible sostenible para el mercado de la aviación. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2021), la vía tecnológica de HEFA es la única que obtiene un puntaje de 9, correspondiente a las vías que ya se encuentran disponibles a escala comercial. La siguiente ilustración muestra las demás vías que se encuentran en distintos niveles de desarrollo (demostración, piloto e investigación).

**Gráfico 1.** Grado de desarrollo de las vías tecnológicas para producir CAS con base en el criterio de nivel de madurez y disponibilidad de combustibles (FRL), desarrollado por la Iniciativa de Combustibles Alternativos para la Aviación Comercial (CAAFI) (2010).



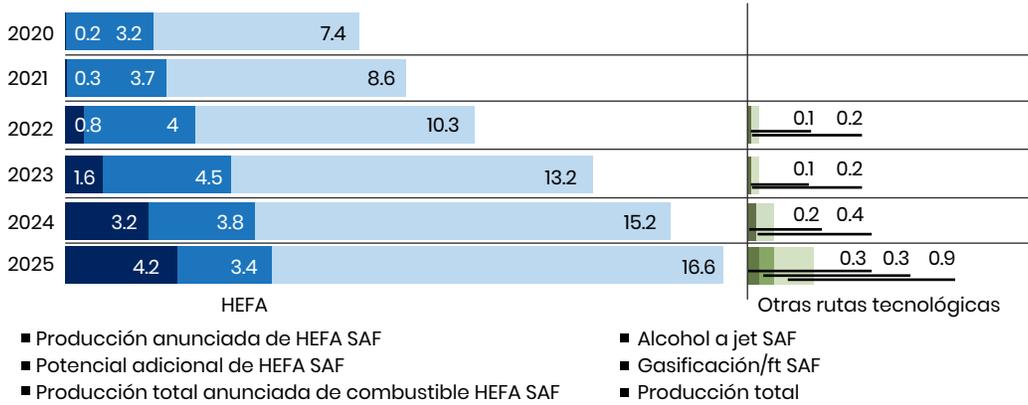
**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021 y Neuling y Kaltschmitt 2015.

**Nota:** estado de comercialización medido de acuerdo con el FRL del bioqueroseno: 1) principios básicos, 2) concepto formulado, 3) prueba de concepto, 4) evaluación técnica preliminar, 5) validación del proceso, 6) evaluación técnica a gran escala, 7) aprobación de combustible, 8) comercialización y 9) capacidad de producción establecida, según la CAAFI.

Además de la vía tecnológica de HEFA, en algunos casos se está planificando y en otros ya está en marcha la construcción de instalaciones a gran escala para otras tecnologías, incluidas las de gasificación con FT, etanol para reactores, isobutanol para reactores e hidrotermólisis catalítica. De esta manera se prevé que en 2025 nuevas cantidades de *biojet* serán producidas de manera más diversificada desde el punto de vista de las tecnologías y materias primas utilizadas<sup>9</sup>. Además, se espera que múltiples vías de tecnologías alternativas, actualmente en proceso de aprobación por parte de la ASTM, obtengan la certificación correspondiente.

<sup>9</sup> Sobre la base de las instalaciones actuales y planificadas, la OACI estima una capacidad total de refinería para 2032 de 8 000 000 000 l, con una producción real de *biojet* de entre 1 000 000 000 l (proporción baja) y 6 300 000 000 l (proporción alta) (Dickson, citado por IRENA 2021).

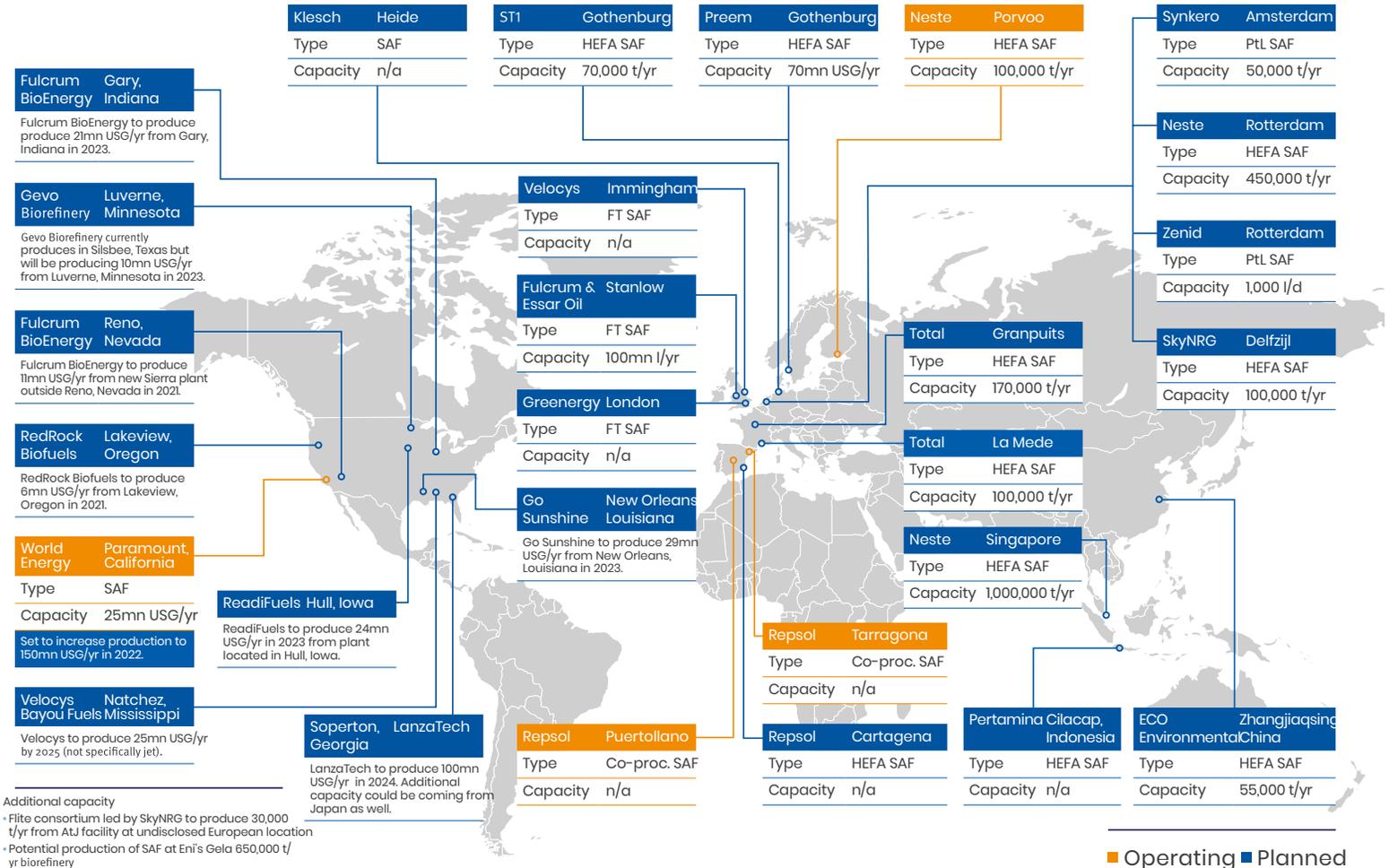
**Gráfico 2.** Capacidad operativa y planificada en millones de toneladas de producción.



**Fuente:** Tomado de FEM 2020:9.

En la siguiente ilustración se pueden observar las plantas industriales planificadas y las ya instaladas, de acuerdo con el tipo de tecnología utilizada para producir CAS.

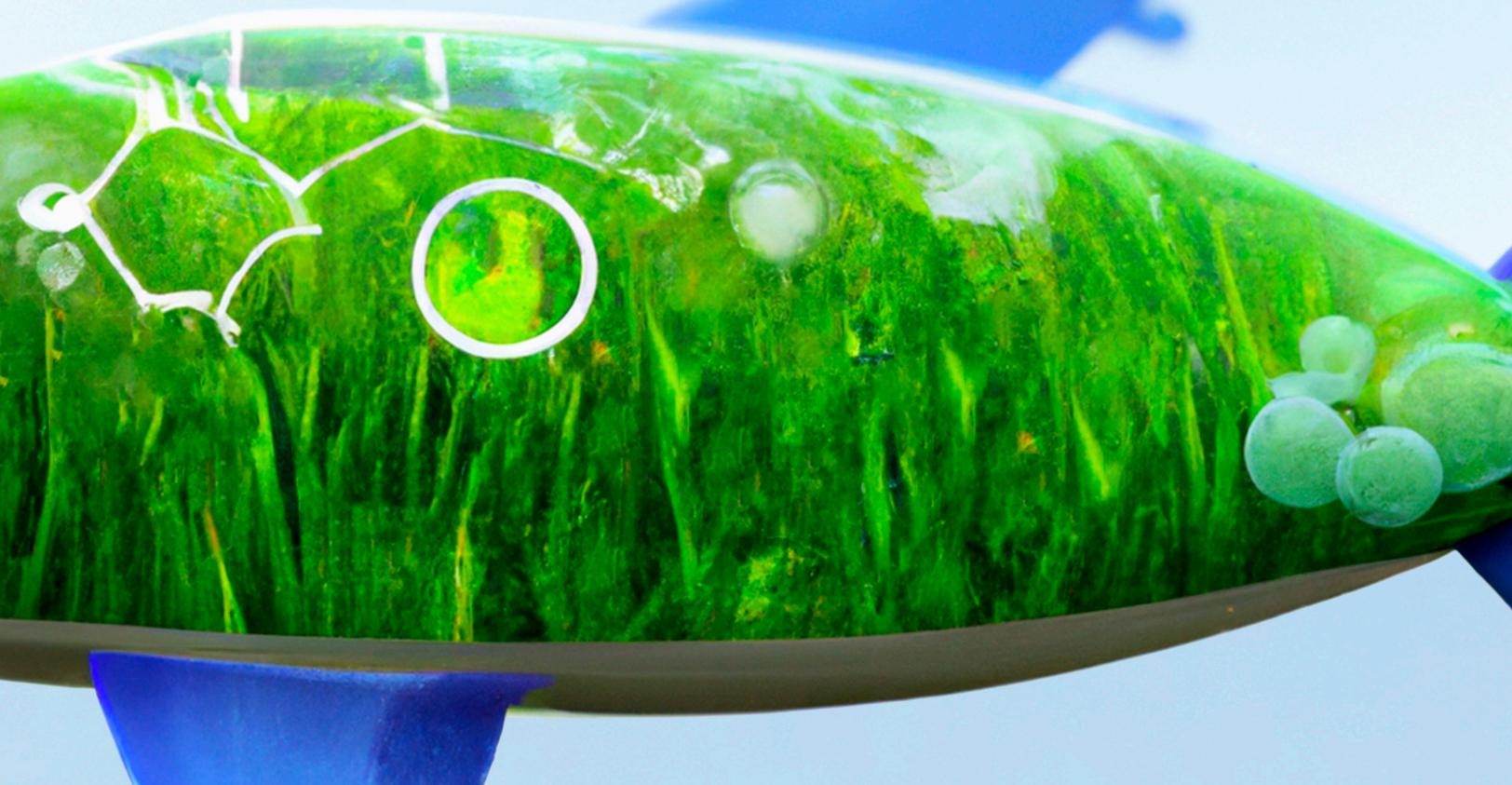
**Ilustración II.** Capacidad instalada y planificada de CAS por tipo de tecnología y país.



**Fuente:** Tomado de IATA 2022a:41

# 2

**El rol de los biocombustibles sostenibles de aviación en la descarbonización del sector**



## Capítulo 2.

# El rol de los biocombustibles sostenibles de aviación en la descarbonización del sector

El 11 de diciembre de 1997 se aprobó el Protocolo de Kioto; no obstante, no fue sino hasta 2005 que entró plenamente en vigencia. En el punto 2 de su artículo 2 se solicita expresamente a la OACI abordar las emisiones de GEI procedentes de la industria de la aviación internacional, ya que en que dicho protocolo se exime de realizar contribuciones nacionales a la aviación y al transporte marítimo internacional, por su carácter transfronterizo y sobre alta mar, y se asigna la responsabilidad de “limitar o reducir” las emisiones de estos sectores a la OACI y la Organización Marítima Mundial (ONU Cambio Climático 2018a y 2018b).

De acuerdo con Gössling y Humpe (2020), esta distribución general de responsabilidades se ha mantenido en virtud del Acuerdo de París, es decir, la aviación nacional está comprendida dentro de los objetivos de mitigación nacionales<sup>10</sup>, mientras que los vuelos internacionales son abordados por la OACI.

En este contexto la aviación internacional ha asumido serios compromisos en cuanto a la emisión de GEI. De hecho, en 2010, durante la 37.ª sesión de la asamblea de la OACI, se dio un importante paso al abordar el tema de las emisiones producidas por la aviación civil internacional, con el propósito de cumplir las metas relativas al clima en el ámbito global.

Las metas establecidas en aquel entonces planteaban reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a un promedio de 1.5 % al año durante el período 2009–2020, con miras a lograr un crecimiento neutro de carbono a partir de 2020 y disminuir las emisiones en 50 % para 2050, en comparación con los niveles de 2005 (Torroba 2021); sin embargo, la OACI decidió excluir el 2020 del cálculo, debido al número de pasajeros excepcionalmente bajo de ese año, atribuido a la pandemia del síndrome respiratorio agudo producido por un coronavirus (COVID-19). Es así que, en su 41.ª asamblea, celebrada en octubre de 2022, la OACI acordó una nueva línea de base más baja de reducciones de GEI a partir de 2024, definida como el

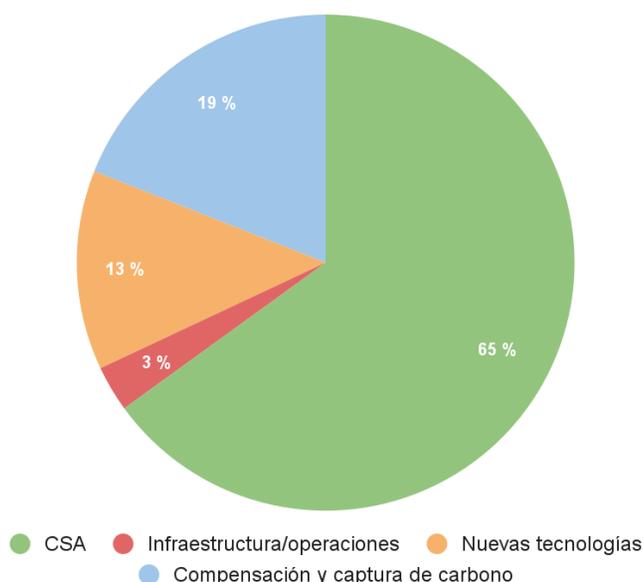
---

<sup>10</sup> La aviación militar y los vuelos privados también están comprendidos dentro de las emisiones nacionales.

85 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> de 2019, una medida a la que la industria se opuso previamente por motivos de costos, mientras se recuperaba del impacto del COVID-19. Asimismo, se fijó la meta colectiva de alcanzar cero emisiones netas de carbono para la aviación internacional en 2050, de conformidad con los objetivos del Acuerdo de París.

Con el fin de alcanzar los objetivos globales y, en definitiva, un futuro sostenible para la aviación internacional, la OACI ha enfocado su estrategia en el desarrollo y la implementación de una “canasta de medidas de mitigación” para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de esta industria, la cual incluye adelantos en la tecnología de las aeronaves, mejoras operativas, combustibles alternativos sostenibles y compensación y captura de carbono, según se muestra en la siguiente figura.

**Gráfico 3.** Contribución al cumplimiento del objetivo de cero emisiones netas de carbono para 2050.



**Fuente:** Elaborado con base en IATA 2022a y 2022b.

Como se muestra en la ilustración, los CAS encabezarán la descarbonización del sector, representando el 65 % del ahorro de emisiones, mientras que las nuevas tecnologías (hidrógeno y electricidad) permitirán ahorrar 13 %, las compensaciones y la captura de carbono, 19 %, y el desarrollo de infraestructura y las mejoras en las operaciones, 3 %.

En este contexto el sector aéreo tiene múltiples razones para utilizar biocombustibles sostenibles de aviación, si desea incidir directamente en una disminución de los GEI, más allá de los resultados de la implementación de medidas tecnológicas y operativas, entre las cuales sobresalen: 1) las barreras tecnológicas actuales para impulsar las aeronaves con portadores de energía más limpia, que hacen que el transporte aéreo dependa exclusivamente de combustibles líquidos; 2) la indisponibilidad comercial de avances tecnológicos importantes antes de 2050, ya que en el sector de la aviación estos suelen tardar hasta un par de décadas para alcanzar la madurez; y 3) la eliminación gradual de las aeronaves en servicio hasta que alcanzan el final de su vida útil, el cual se encuentra entre los 20 y 25 años en promedio (IEA Bioenergy 2021).

De acuerdo con el FEM (2020), ningún enfoque o tecnología por sí solo permitirá a la industria aérea lograr vuelos sostenibles con cero emisiones. Incluso si los aviones (híbridos) eléctricos y de hidrógeno se vuelven prácticos para vuelos de distancias cortas y medias, se requerirá la implementación de CAS de diferentes fuentes para descarbonizar a toda la industria.

Las tecnologías de baterías e hidrógeno presentan un rápido avance. Los aviones más pequeños, como los reactores regionales, podrían ser los primeros en efectuar la transición hacia nuevas tecnologías de propulsión; no obstante, alrededor del 95 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de aviones de mayor tamaño, debido a lo cual se deben superar algunos desafíos tecnológicos. Con las tecnologías actuales un avión necesitaría más de 50 kg de baterías para reemplazar 1 kg de queroseno, a fin de lograr un alcance máximo de 500 km a 1000 km. Adicionalmente, a diferencia del combustible, la batería no se quema y la aeronave necesitaría llevar la carga completa durante todo el vuelo, lo que requeriría energía adicional.

En la próxima década los aviones pequeños propulsados por pilas de combustible de hidrógeno se podrían utilizar en vuelos de hasta 500 km y, dentro de una década más, una extensión del segmento de corto alcance hasta 2000 km sería factible. Con respecto a vuelos de mediano y largo alcances, un diseño de avión evolutivo con combustión directa de hidrógeno constituye una opción prometedora: Airbus anunció recientemente un plan para desarrollar un avión de fuselaje estrecho, propulsado por hidrógeno, el cual entraría en servicio en 2035.

El tiempo que supone el desarrollo de nuevas tecnologías y la restricción impuesta a los viajes de larga distancia convierten a los CAS en la herramienta principal para descarbonizar a corto y largo plazos los viajes aéreos a gran escala, lo que se aplica a todos los segmentos de las aeronaves, incluidos los vuelos de mediana y larga distancias que representan la mayoría de las emisiones.

De acuerdo con el FEM (2020), la mejor opción individual para lograr una aviación sostenible es, en primer lugar, la eliminación de las emisiones contaminantes. En teoría, mediante el uso de CAS es posible reducir las emisiones del ciclo de vida hasta en 99 %<sup>11</sup>, según la tecnología, la materia prima y el transporte, sin que ello suponga cambios importantes en la infraestructura aeroportuaria ni en las aeronaves.

A continuación se describen las distintas tecnologías, además de los CAS, que podrían desarrollarse en el transporte aéreo, de conformidad con las distancias por cubrir y el porcentaje de reducción de emisiones correspondiente:

**Tabla 2.** CAS y otras alternativas actuales y futuras, de acuerdo con las distancias por recorrer.

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Viajeros</b> • 9-50 asientos • Vuelos de < 60 minutos • <1% de la industria CO <sub>2</sub>	SAF	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS
<b>Regional</b> • 50-100 asientos • Vuelos de 30-90 minutos • ~3% de la industria CO <sub>2</sub>	SAF	SAF	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS	Eléctrico  con pila de combustible de hidrógeno y/o CAS
<b>Trayecto corto</b> • 100-150 asientos • Vuelos de 45-120 minutos • ~24% de la industria CO <sub>2</sub>	SAF	SAF	SAF	CAS y, potencialmente, un poco de hidrógeno	Hidrógeno y/o CAS	Hidrógeno y/o CAS	Hidrógeno y/o CAS
<b>Trayecto medio</b> • 100-250 asientos • Vuelos de 60-150 minutos • ~43% de la industria CO <sub>2</sub>	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	CAS y, potencialmente, un poco de hidrógeno
<b>Trayecto largo</b> • 250+ asientos • Vuelos de más de 150 minutos • ~30% de la industria CO <sub>2</sub>	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

~27% de emisiones de CO<sub>2</sub>

~73% de CO<sub>2</sub>

**Fuente:** Elaborado con base en IATA 2022a y 2022b.

<sup>11</sup> Como bien destacan la OACI *et al.* (2018), los CAS son fundamentales en la reducción de las emisiones de GEI, que varía según la materia prima y la tecnología empleadas.

Por último, el desarrollo de CAS podría evitar la obsolescencia de las aeronaves más antiguas, ya que permite que todos los aviones reduzcan su huella de carbono neta. En las próximas décadas los CAS serán clave para el avance general en la descarbonización de la industria de la aviación. Según la región, la tecnología y el tipo de materia prima, podría ofrecer muchos beneficios además de reducir las emisiones, incluidos la creación de miles de puestos de trabajo, el establecimiento de eslabonamientos positivos con el sector agrícola y la utilización de residuos como insumos en el proceso productivo, entre otros.

Es en este contexto que en la 40.ª asamblea de la OACI, por medio de la resolución A39-3, se decidió implementar un plan mundial de medidas basadas en el mercado (MBM), de conformidad con el CORSIA, como parte del paquete de medidas descritas anteriormente (OACI 2019c).

### **¿Qué es el CORSIA?**

Este instrumento, aprobado por medio de la resolución n.º 39 de la asamblea de octubre de 2016 de la OACI, tiene como objetivo reducir el impacto climático neto de la aviación a través de requisitos de compensación de CO<sub>2</sub> establecidos en cada una de sus fases.

Su implementación se dirige a reducir o eliminar las altas cantidades de GEI que emite el sector aéreo. De acuerdo con la OACI (2019c), entre 2021 y 2035 el sector de la aviación internacional tendría que compensar alrededor de 2 500 000 000 t de emisiones de CO<sub>2</sub> para lograr un crecimiento neutro en carbono.

Según Malins y Sandford (2022), se desarrollará principalmente mediante la adquisición de derechos de emisión por parte de las compañías aéreas, que, además, tienen la opción de utilizar biocombustibles. Cabe destacar que su implementación ha marcado un hito para la comunidad internacional, debido a que es el primer mecanismo de carácter global que incide directamente en las emisiones de CO<sub>2</sub> de un sector específico, como resultado de un consenso entre los Gobiernos, la industria y organizaciones internacionales.

Funciona por medio de un enfoque basado en rutas, en el que se garantiza que aquellos aviones con vuelos en las mismas rutas internacionales reciban los mismos requisitos de compensación, independientemente de si los Estados a los que están atribuidos los aviones participan en este plan. En la actualidad se están determinando las rutas internacionales que incluirá, mientras tanto, ya se dispone de las fórmulas que definen los requisitos de compensación de CO<sub>2</sub> para los operadores de aeronaves individuales.

Se ejecutará en tres fases: la fase piloto (2021-2023), la primera fase (2024-2026) y la segunda fase (2027 y 2035). En las dos primeras (de 2021 a 2026) la participación es voluntaria. En junio de 2019 un total de 80 Estados, que representan aproximadamente el 76 % de los ingresos por tonelada-kilómetro (ITK) de la aviación internacional, han anunciado su intención de participar en el plan desde su inicio. A partir de 2027 la participación se determinará en función de los datos sobre ITK de 2018<sup>12</sup> (OACI 2019c).

Su organización e implementación se encuentran en manos del Consejo de la OACI, el Grupo Asesor sobre el CORSIA, el Grupo Asesor sobre el Medio Ambiente y el Comité sobre la Protección del Medio Ambiente y la Aviación. En términos generales, se estableció para ayudar a la aviación internacional a lograr un crecimiento neutro en carbono a partir de 2020. Se espera que a partir de 2022 el Consejo lo revise cada tres años. Según la OACI (2019c), dicha revisión incluirá la evaluación de su impacto en el crecimiento de la aviación internacional, cuyos resultados servirán como base para que el Consejo recomiende la realización de ajustes durante la asamblea, según corresponda.

Su principal ventaja es que ofrece una forma armonizada de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la aviación internacional, evitando distorsiones del mercado y respetando las características particulares y las capacidades respectivas de cada Estado Miembro de la OACI.

**Fuente:** Elaborado con base en Malins y Sandford 2022 y OACI 2019c.

---

<sup>12</sup> El CORSIA incluirá a todos los Estados que en 2018 tengan una proporción individual de ITK superior al 0.5 % del total de ITK o cuya participación acumulada en la lista de Estados, ordenados de mayor a menor cantidad de ITK, alcance el 90 % del total de ITK. De acuerdo con la resolución A39-3 de la asamblea, los países menos adelantados, los pequeños estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral están exentos de participación en el plan, incluso si cumplen con estas condiciones de ITK, pero pueden tomar parte en él de manera voluntaria.

A principios de 2020 119 Estados Miembros de la OACI –que representan cerca del 94 % del tráfico aéreo mundial– habían presentado planes de acción estatales, frente a los 111 del año anterior, en apoyo a la producción y el uso de combustibles de aviación alternativos sostenibles –específicamente, combustibles producidos a partir de biomasa, que incluye diferentes tipos de desechos orgánicos–.

Asimismo, en 2018 se llevó a cabo el primer vuelo comercial de prueba con CAS. A partir de 2016 se han efectuado más de 450 000 vuelos diarios con CAS en 40 aerolíneas diferentes y más de 200 000 vuelos comerciales con mezclas de combustibles alternativos, frente a los 150 000 del año anterior (IATA 2022a).

Durante 2020, en al menos ocho aeropuertos se efectuaba una distribución regular de combustible alternativo mezclado, frente a cinco el año anterior, mientras que al menos 14 aeropuertos tenían entregas por lotes de dichos combustibles. En el siguiente cuadro se muestra cómo en 2020 22 aeropuertos contaban con la capacidad de proveer CAS a las aeronaves que operaban en ellos, ya sea a partir de lotes o bien un servicio continuo. Nótese que la mayoría de estos pertenecían a Suecia, sin ser particularmente todos aeropuertos internacionales, lo cual muestra la penetración de este tipo de biocombustible en dicho país.

**Tabla 3.** Aeropuertos donde se provee CAS.

Entrega por lote (aeropuerto)	País	Entrega continua (aeropuerto)	País
De Karlstad	Suecia	De Los Ángeles	EE. UU.
O'Hare de Chicago	EE. UU.	De Oslo	Noruega
De Brisbane	Australia	De San Francisco	EE. UU.
Pearson de Toronto	Canadá	De Estocolmo Arlanda	Suecia
Trudeau de Montreal	Canadá	De Bergen	Noruega
De Åre Östersund	Suecia	De Växjö–Småland	Suecia
De Gotemburgo–Landvetter	Suecia	De la ciudad de Halmstad	Suecia
De Visby	Suecia	De Estocolmo–Bromma	Suecia
De Luleå	Suecia	De Kalmar Öland	Suecia
De Van Nuys	EE. UU.		
De Jackson Hole	EE. UU.		
De Umeå	Suecia		
De Malmö	Suecia		

**Nota:** Datos a 2021

**Fuente:** Elaborado con base en IEA Bioenergy 2021.

De acuerdo con *Sustainable Aviation Futures* (2022), las aerolíneas, a través de acciones voluntarias, han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de CAS mediante la inversión directa en productores de combustibles y la firma de acuerdos plurianuales de consumo. A continuación se detallan los principales aerolíneas compradoras y vendedoras de CAS, según la cantidad de acuerdos de consumo y los volúmenes comprometidos.

**Tabla 4. Las 10 principales aerolíneas que efectúan contratos de consumo.**

Aerolínea	Volumen total de extracción (millones de litros)	N.º de acuerdos de compra firmados
United Airlines	10 513.98	6
OneWorld	3785.41	1
American Airlines	2388.59	4
Delta	2367.02	6
Grupo Lufthansa	2248.53	1
AirBP	2192.71	2
Cathay Pacific	1419.53	1
Jet Blue	1140.73	3
KLM	937.04	4
Southwest Airlines	829	1

**Fuente:** Elaborado con base en *Sustainable Aviation Futures* 2022.

**Tabla 5.** Acuerdos de consumo: los 10 principales productores de combustible por volumen.

Productor de combustible	Volumen (millones de litros)	N.º de acuerdos de compra firmados
Gevo	8187.29	9
Fulcrum	6719.10	3
Alder Fuels	5678.12	1
Shell	2248.52	1
SG Preston	1287.04	3
Dimensional Energy	1135.62	1
Velocys	1105.34	2
Aemetis	1097.77	6
Grupo ECB	1050.08	2
Neste	1036.41	12

**Fuente:** Elaborado con base en Sustainable Aviation Futures 2022.

### **Primer vuelo del A319neo con combustible de aviación 100 % sostenible<sup>13</sup>**

Airbus, el principal fabricante de aeronaves del mundo; Dassault Aviation, fabricante de aeronaves civiles y militares; la Oficina Nacional de Estudios e Investigaciones Aeroespaciales (ONERA) de Francia; y Safran, una compañía de alta tecnología especializada en defensa, equipamiento aeronáutico y seguridad, en conjunto con el Ministerio de Transportes de Francia, están realizando un estudio intitulado Volar con nuevos combustibles alternativos, en el que se analiza el uso de CAS en la aviación.

Este estudio, dirigido a contribuir a los esfuerzos de descarbonización global que hoy se llevan a cabo en toda la industria aeronáutica, cuenta con financiamiento del Plan de Recuperación de France Relance,

<sup>13</sup> Véase el artículo de Airbus sobre este tema en <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-first-a319neo-flight-with-100-sustainable-aviation-fuel>.

específicamente, de la sección dedicada a la descarbonización de la aviación, implementada por la Dirección General de Aviación Civil, bajo la supervisión de Jean-Baptiste Djebbari, ministro de Transportes de Francia.

El objetivo final del estudio es promover el despliegue y uso a gran escala de CAS y la certificación de CAS 100 % para su uso en aviones comerciales de pasillo único y la nueva generación de reactores ejecutivos.

El estudio comenzó el 28 de octubre de 2021 con un vuelo de prueba efectuado en la región de Toulouse, Francia. El avión utilizado fue un Airbus A319neo, con un motor CFM LEAP-1A, que operó con CAS 100%.

El CAS sin mezclar, proporcionado por la empresa Total Energies, se elaboró a base de HEFA compuestos principalmente por aceite de cocina usado y otras grasas de desecho. Cabe destacar que los HEFA están hechos de hidrocarburos parafínicos y no contienen ni moléculas aromáticas ni azufre.

En todo el estudio se utilizarán aproximadamente 57 t de CAS no solo para determinar el funcionamiento de los aviones de prueba, sino también para analizar su operatividad y compatibilidad con el motor Safran Helicopters Arrano, usado en los Airbus Helicopters H160.

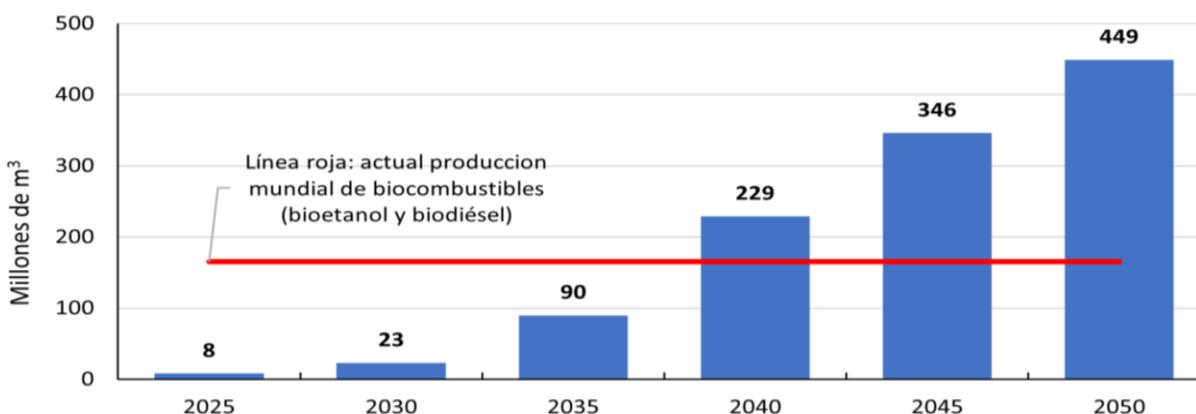
Dos actores llevan a cabo el estudio: Airbus, en colaboración con DLR, que se encarga de caracterizar y analizar el impacto del CAS 100 % en las emisiones terrestres y en vuelo, y Safran, que se centra en estudios de compatibilidad relacionados con el sistema de combustible y la adaptación del motor a aviones comerciales y helicópteros y su optimización para el uso de varios tipos de combustibles CAS 100 %.

Además, a finales de 2021 Safran realizó pruebas en tierra del motor LEAP con CAS 100 % en sus instalaciones para completar el análisis. ONERA está apoyando a ambas compañías en el análisis de la compatibilidad del combustible con los sistemas de la aeronave y se encargará de preparar, analizar e interpretar los resultados de las pruebas para determinar el impacto del CAS 100 % en las emisiones y la formación de estelas de condensación. Finalmente, Dassault Aviation está contribuyendo a los estudios de compatibilidad de materiales y equipos y verificando la susceptibilidad de biocontaminación del CAS 100 %.

**Fuente:** Elaborado con base en Duvelleroy 2021.

El desafío de descarbonizar el sector aéreo es mayúsculo. De acuerdo con la última resolución de la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA 2021a), para 2050 se deben producir 449 000 000 m<sup>3</sup> de CAS a fin de cumplir los objetivos previstos<sup>14</sup>. Hoy el mundo produce 165 000 000 m<sup>3</sup> de biocombustibles, casi todos destinados al transporte terrestre (biodiésel y bioetanol); en términos simples, al mundo le llevó 20 años desarrollar una industria de biocombustibles terrestres de 165 000 000 m<sup>3</sup> y, en poco menos de 30 años, deberá generar una industria casi tres veces mayor.

**Ilustración 12.** CAS que se debe producir y consumir para cumplir las metas de descarbonización de la aviación en 2050.



**Fuente:** Elaborado con base en IATA 2022a

Varios países ya han avanzado en el dictado de marcos normativos y estrategias de promoción de los CAS. En los siguientes capítulos se revisarán el estado de esta normativa en todo el mundo y los aspectos económicos vinculados a su producción y uso.

<sup>14</sup> Puede verse mayor detalle en el Comunicado N° 66 de IATA titulado “Cero emisiones netas de CO2 en 2050” del año 2021.



3

**Aspectos económicos de  
los biocombustibles  
de aviación**

## Capítulo 3.

# Aspectos económicos de los biocombustibles de aviación

De acuerdo con la IRENA (2021), el biocombustible de aviación es significativamente más caro que el convencional y es muy probable que lo siga siendo en el mediano plazo. Las estimaciones de la diferencia de precios varían entre 2 y 7 (IATA 2015a) y 3 y 4 veces más (Hollinger 2020). Aunque las aerolíneas y los aeropuertos han firmado varios acuerdos de compra, el precio establecido del *biojet* no es de carácter público; por lo tanto, resulta difícil estimar con exactitud los precios de los biocombustibles, ya que la mayoría de los cálculos se derivan de fuentes como informes, medios de comunicación en línea, presentaciones y documentos académicos<sup>15</sup> (Staples *et al.* 2014; IATA 2015a, 2015b; de Jong *et al.* 2015, 2017; Zhao *et al.* 2016; Bann *et al.* 2017; Yao *et al.* 2017; Pavlenko *et al.* 2019)<sup>16</sup>.

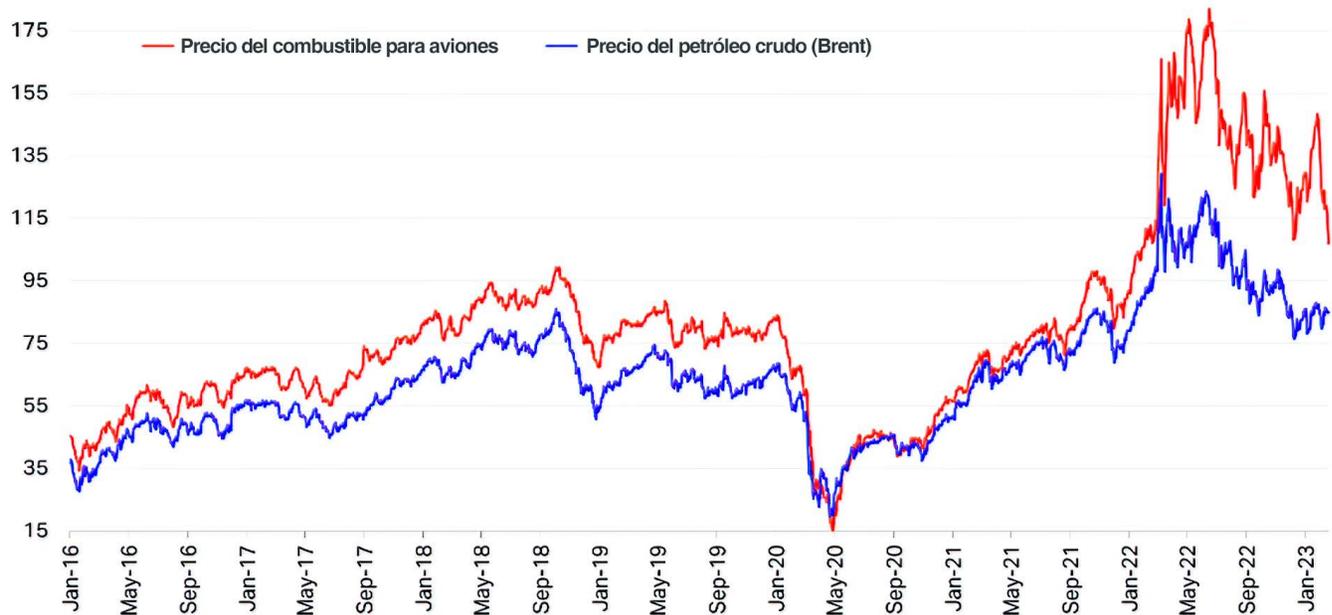
Otra cuestión relevante es que los precios de los combustibles fósiles han tenido grandes variaciones, pasando de valores cercanos a los USD 15 por barril en algunos meses de 2020 a los USD 175 durante junio de 2022. Los elevados precios de estos combustibles han provocado que algunas rutas tecnológicas adquieran una mayor viabilidad económica.

---

<sup>15</sup> Recopiladas por la IRENA (2021).

<sup>16</sup> Según la OACI (2017), “En la bibliografía existen varios análisis técnicoeconómicos (TEA) sobre precios de venta mínimos estimados de varios tipos de AAF. No obstante, siguen existiendo incertidumbres científicas significativas sobre la aplicabilidad de dichos estudios ya que sus resultados varían notablemente e incluso pueden ser contradictorios. Los retos específicos identificados con relación a los análisis técnicoeconómicos son su completitud y comparabilidad, ya que los supuestos financieros y de disponibilidad tecnológica no se utilizan de forma coherente en la amplia gama de estudios de la bibliografía”.

**Ilustración 13.** Evolución del precio del petróleo Brent y del combustible de avión (en USD/barril).



**Fuente:** Tomado de IATA 2023

Asimismo, según la información brindada por la IRENA (2021), se ha replicado el método del precio mínimo de venta del combustible (MFSP), con base en la determinación del precio mínimo de venta de las distintas opciones tecnológicas (y materias primas) del *biojet* que establezcan un valor actual neto igual a cero para un nuevo proyecto de producción<sup>17</sup>. En los siguientes gráficos se aprecian dichos precios, expresados en muchos casos con límites inferiores y superiores que reflejan naturalmente los costos de las diferentes materias primas utilizables.

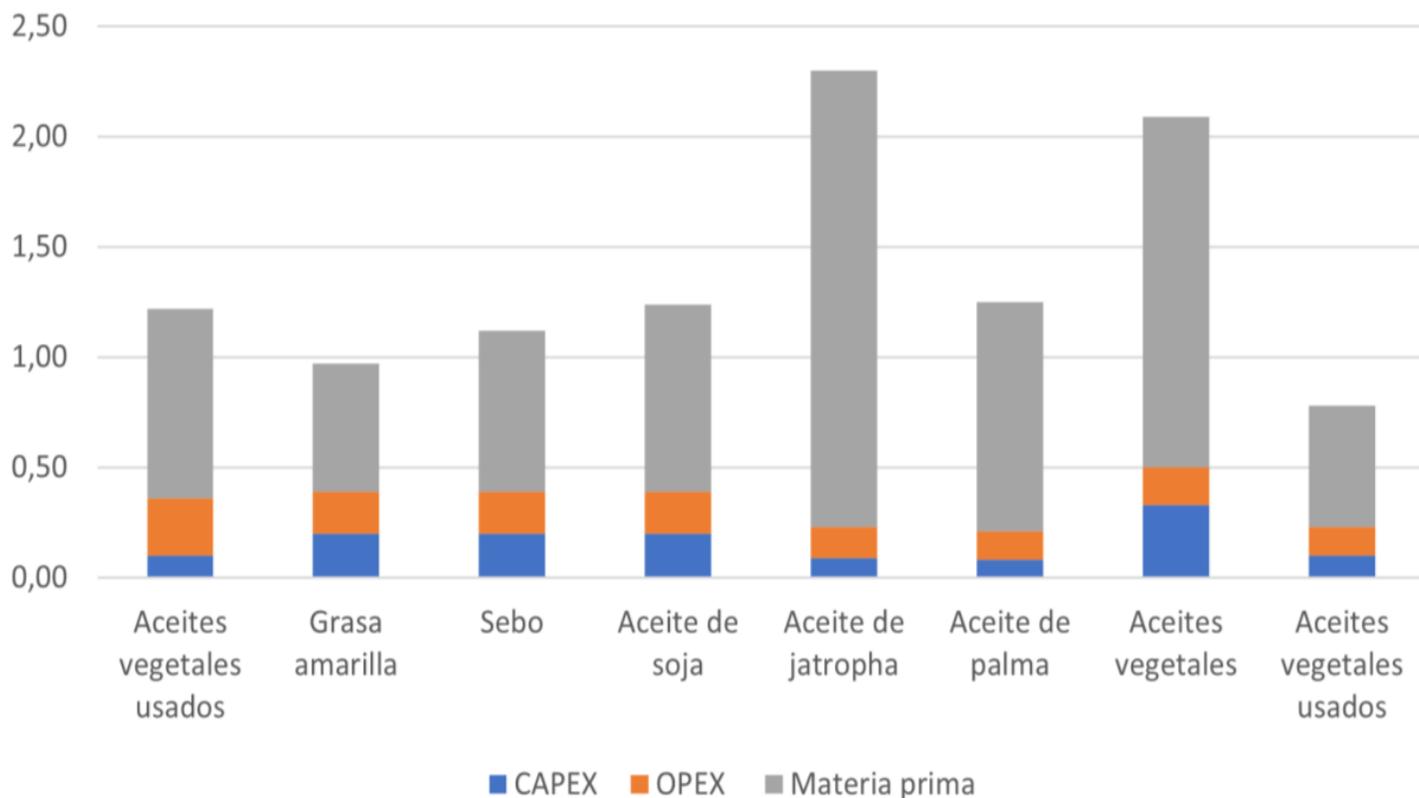
Como ya se ha señalado en varias ocasiones, la producción de biocombustibles fundamentada en los HEFA es la única tecnología totalmente comercial sobre la cual se dispone de información fiable y precisa. Muchos de los análisis tecno-económicos de otras tecnologías de biocombustibles de aviación se han basado en la revisión de la literatura actualizada, en la que se acepta un conjunto de modelos y suposiciones.

<sup>17</sup> Cuando el valor actual neto de un proyecto es igual a cero, significa que la inversión iguala exactamente a la misma tasa de interés de oportunidad del inversionista. De esta manera, lograr un valor actual neto al menos igual a cero es la regla de decisión utilizada para realizar una inversión.

En los siguientes gráficos se observan los diferentes costos de producción por tipo de tecnología y materia prima, así como el precio mínimo de venta, de acuerdo con diversas publicaciones.

En cuanto a la tecnología de HEFA, se observa que el costo de la materia prima puede representar entre el 60 % y el 90 % de los costos totales. A diferencia de otras tecnologías, los HEFA no presentan elevados costos de capital en términos comparativos. Obviamente, los precios de los aceites, las grasas y los sebos han fluctuado mucho durante los últimos cinco años, así como el costo de la materia prima.

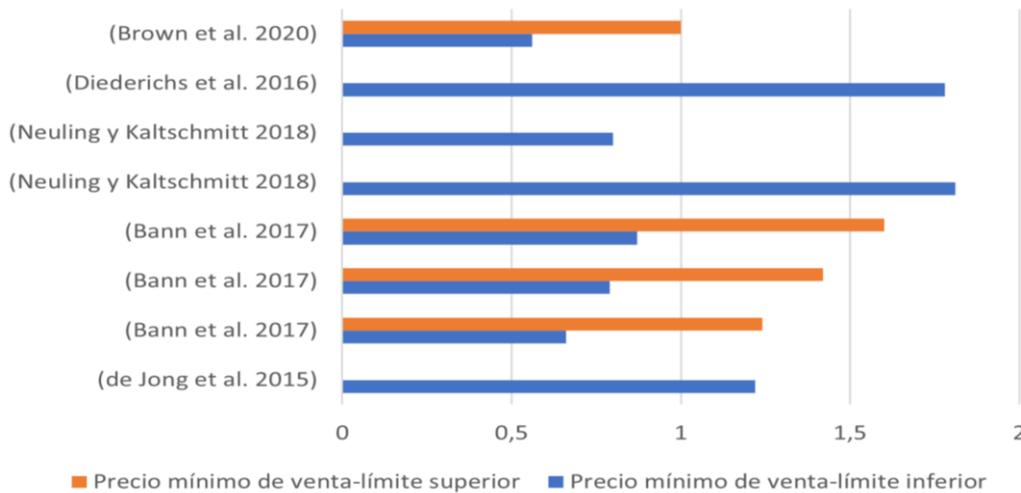
**Gráfico 4.** Costos estimados de producción de la tecnología de HEFA (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

De acuerdo con varios autores, el precio mínimo de venta se encuentra entre USD 0.56/l y USD 1.78/l.

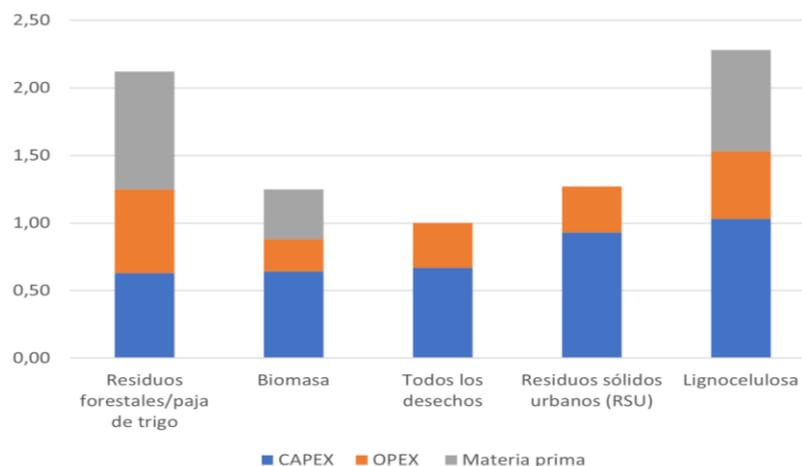
**Gráfico 5.** MFSP de la tecnología de HEFA (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Por otra parte, contrariamente a la tecnología de HEFA, en la gasificación por medio de FT el capital constituye el principal componente de los costos de producción. Si bien ello puede variar de acuerdo con el tipo de biomasa utilizada (el costo de las materias primas más caras puede representar hasta el 41% de los costos totales), los elevados costos de inversión en este tipo de tecnología provocan que los procesos de amortización tengan un peso significativo en el horizonte temporal del negocio.

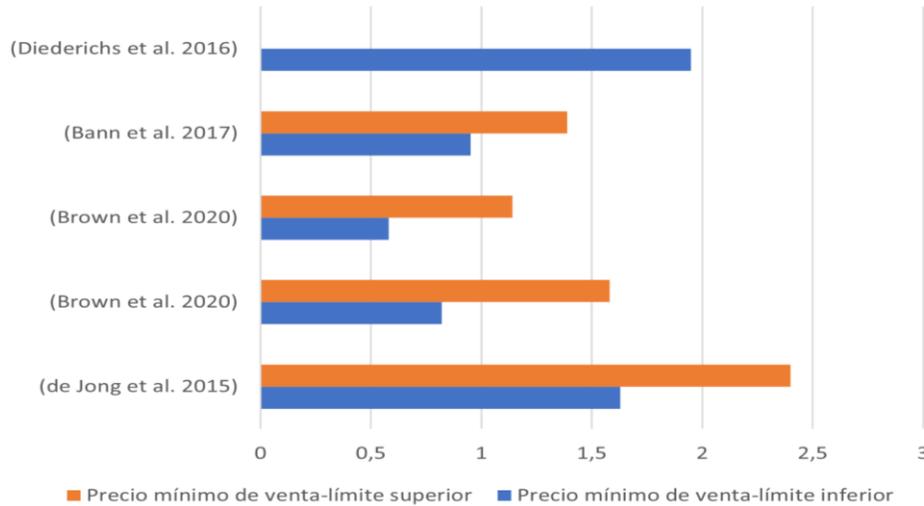
**Gráfico 6.** Costos estimados de producción de la tecnología de gasificación/FT (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Según distintos autores, el precio mínimo de venta oscila entre los USD 0.58/l y los USD 2.4/l.

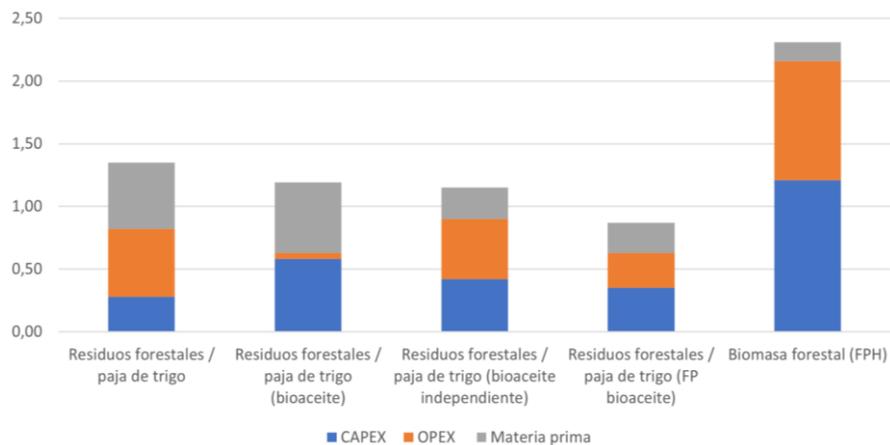
**Gráfico 7.** MFSP de la tecnología de gasificación/FT (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

La tecnología de pirólisis y mejoramiento del bioaceite presenta costos de materia prima inferiores al 50 % del total, pero muy variables, ya que pueden hallarse entre el 6 % y el 47 %. Asimismo, la inversión en capital, operación y mantenimiento suele constituir un porcentaje significativo de los costos totales.

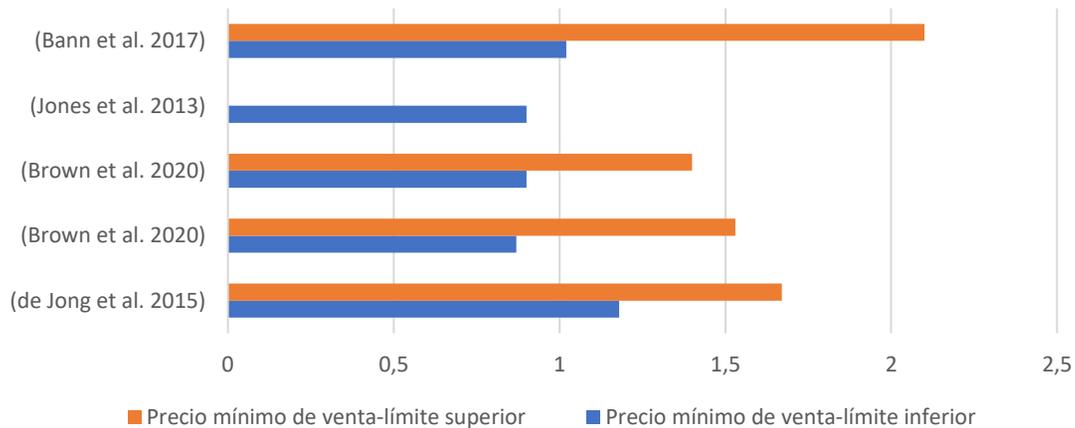
**Gráfico 8.** Costos estimados de producción de la tecnología de pirólisis, bioaceite y mejoramiento (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Asimismo, de acuerdo con varios autores, el MSFP se halla entre USD 0.87/l y USD 2.1/l.

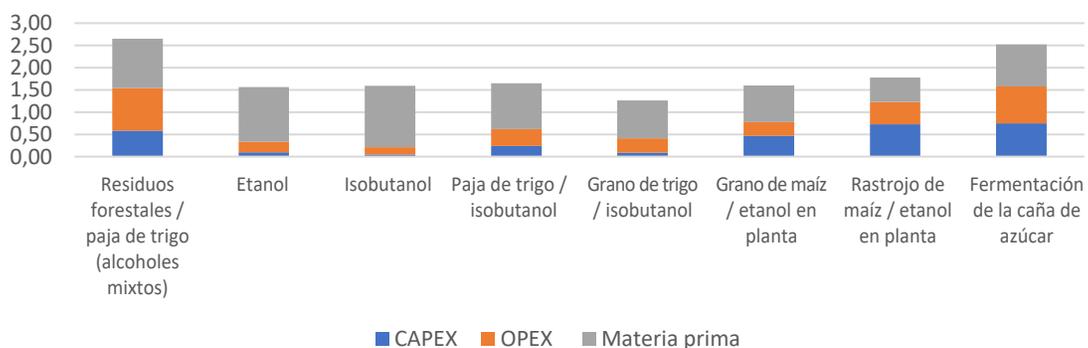
**Gráfico 9.** MFSP de la tecnología de pirólisis, bioaceite y mejoramiento (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

En el caso de la tecnología de ATJ, se puede observar una marcada variabilidad en los costos asociados a las materias primas. En la mitad de los escenarios (p. ej., etanol, isobutanol, paja de trigo y granos de trigo y de maíz) estos costos llegan a exceder significativamente a los demás, en un horizonte entre el 62 % y el 87 %. En el resto de los casos (p. ej., residuos forestales, grano y rastrojo de maíz y fermentación de la caña de azúcar), los costos de las materias primas descienden hasta un rango entre el 31 % y el 51 %, mientras que los de capital ascienden desde un tope máximo del 15 % en los casos anteriores, hasta un rango entre el 22 % y el 41 %.

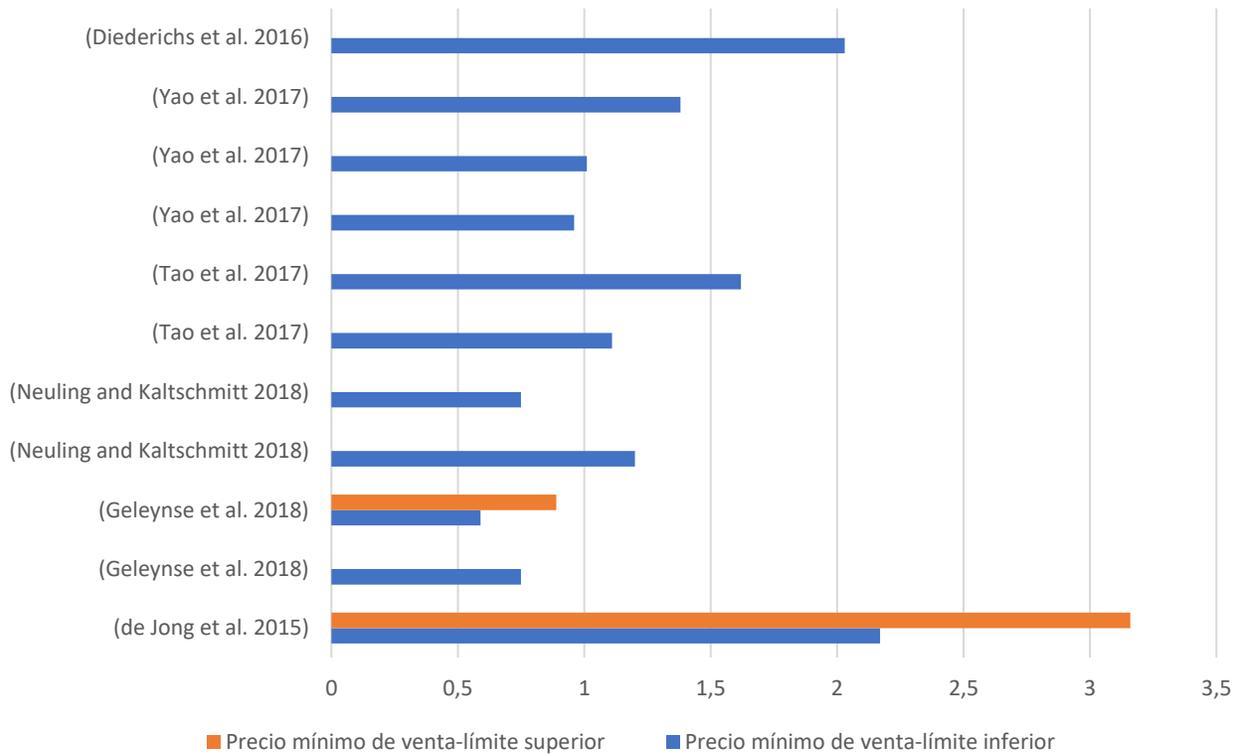
**Gráfico 10.** Costos estimados de producción de la tecnología de ATJ (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Con respecto al MFSP, las estimaciones de diversos autores coinciden en un rango desde los USD 0.59/l hasta los USD 2.03/l. En este caso, el único precio estimado que excede diametralmente el rango en la tecnología de ATJ es el producido a partir de la fermentación de la caña de azúcar, tazado en USD 3.16/l en su límite superior (de Jong et al. 2015).

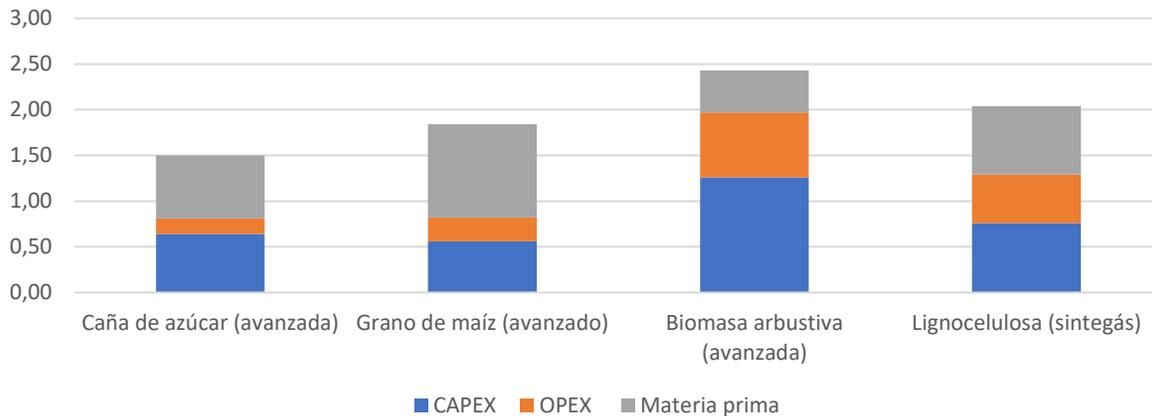
**Gráfico 11.** MFSP de la tecnología de ATJ (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

En el caso de la fermentación avanzada, persiste una relación de costos de capital-materias primas relativamente equilibrado. Por un lado, en los escenarios de la caña de azúcar (avanzada) y la lignocelulosa (sintegás) como fuentes de biomasa, la relación resulta muy igualitaria, siendo los porcentajes comparados de 43 % y 46 % y de 37 % y 37 %, según el escenario. Por otra parte, los escenarios del grano de maíz (avanzado) y la biomasa arbustiva (avanzada) son diametralmente distintos, siendo el primero intensivo en costos de materias primas (55 %) y el segundo, en capital (52 %).

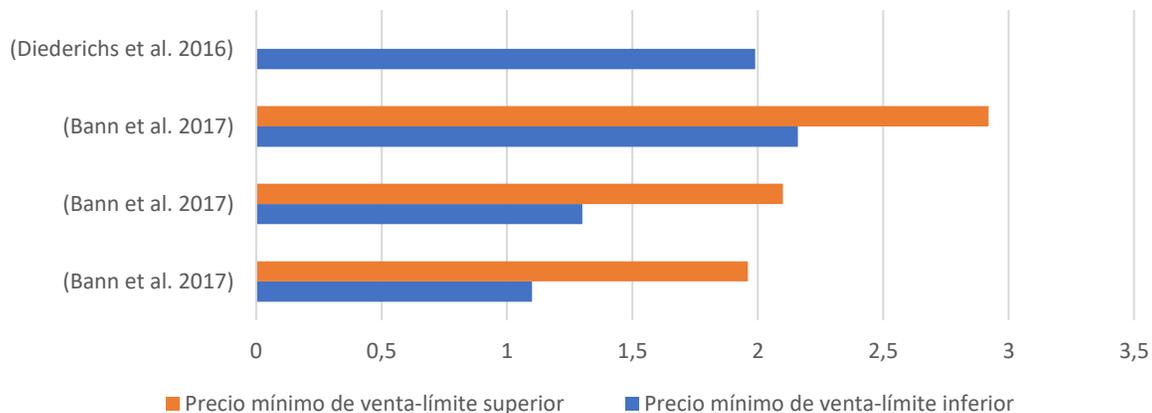
**Gráfico 12.** Costos estimados de producción de la tecnología de fermentación avanzada (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

De conformidad con lo anterior, los precios mínimos de venta se trazan entre un mínimo de USD 1.1/l y un máximo de USD 2.92/l.

**Gráfico 13.** MFSP de la tecnología de fermentación avanzada (en USD/l).

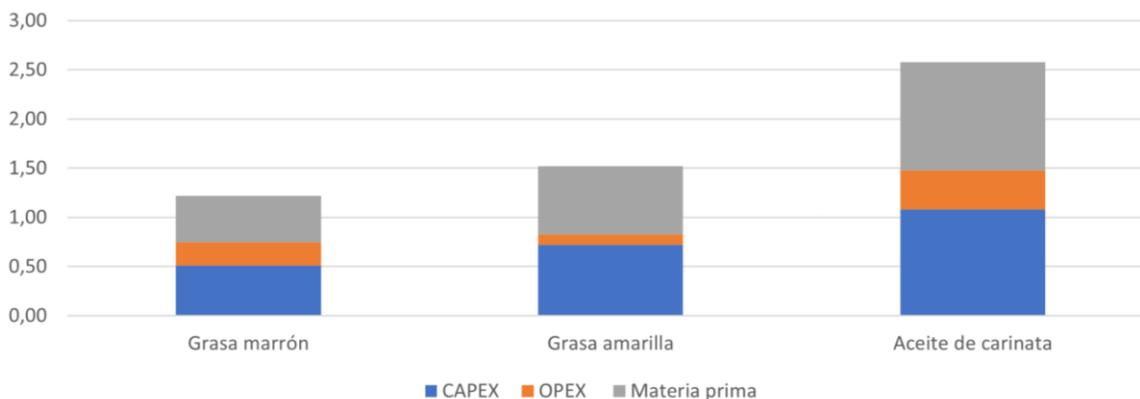


**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Como sucede en la tecnología de pirólisis y mejoramiento del bioaceite, en la de hidrotermólisis catalítica las materias primas no llegan a representar más del 50 % del total de los costos; sin embargo, en esta última, a diferencia de las anteriores, se presenta una variabilidad menor. Entre la materia prima con la cuota más baja y la que tiene la más alta se presenta una diferencia de tan solo

6 % (39 % y 45 %), mientras que los costos de capital representan el 42 % y el 47 %, respectivamente.

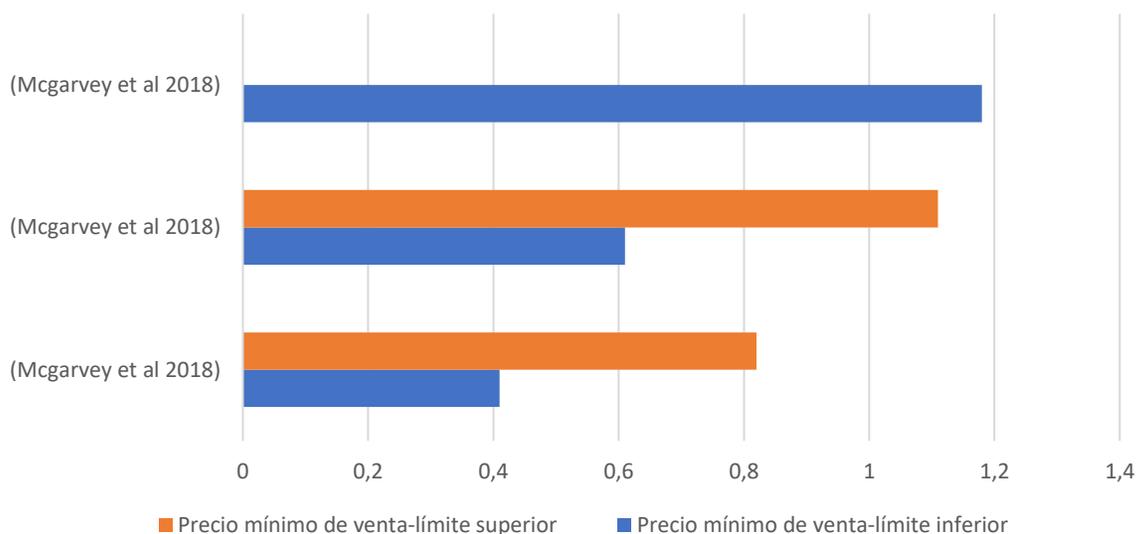
**Gráfico 14.** Costos estimados de producción de la tecnología de hidrotérmólisis catalítica (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

El espectro de los precios mínimos de la hidrotérmólisis catalítica se posiciona entre los más bajos del conjunto de tecnologías presentado en este documento. De acuerdo con McGarvey y Tyner (2018), el precio mínimo de venta se cotiza entre los USD 0.41/l y USD 1.18/l, siendo la diferencia neta de USD 0.77.

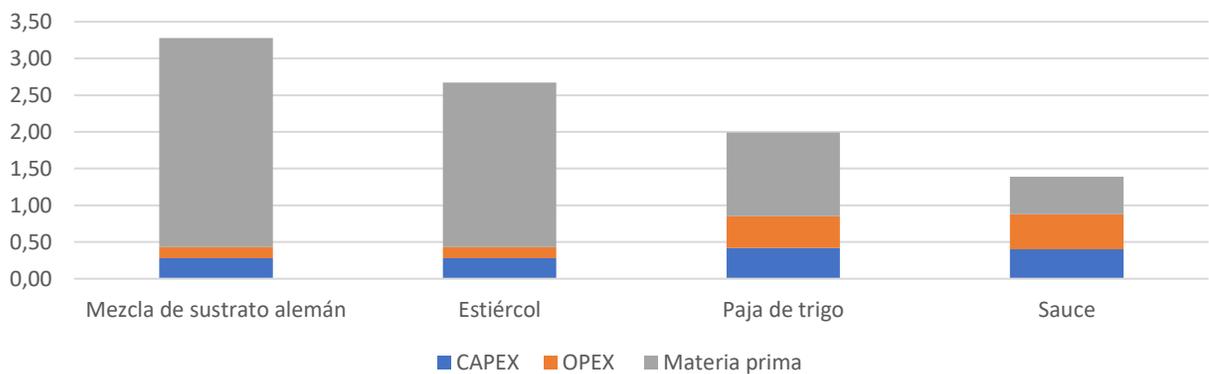
**Gráfico 15.** MFSP de la tecnología de hidrotérmólisis catalítica (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

En el proceso de producción con la tecnología de bioconversión del gas natural en combustibles líquidos (Bio-GtL) las estructuras de costos son bastante heterogéneas entre sí. En algunos casos las materias primas concentran un elevado porcentaje de los costos totales (mezcla de sustrato alemán y estiércol), con valores de hasta 87% y 84%, respectivamente, frente a unos costos de capital bastante menores, que no llegan a alcanzar ni siquiera los USD 0.50/l. En los casos restantes (paja de trigo y sauce) se observa una reducción de los costos de las materias primas y un aumento de los costos de operación y capital.

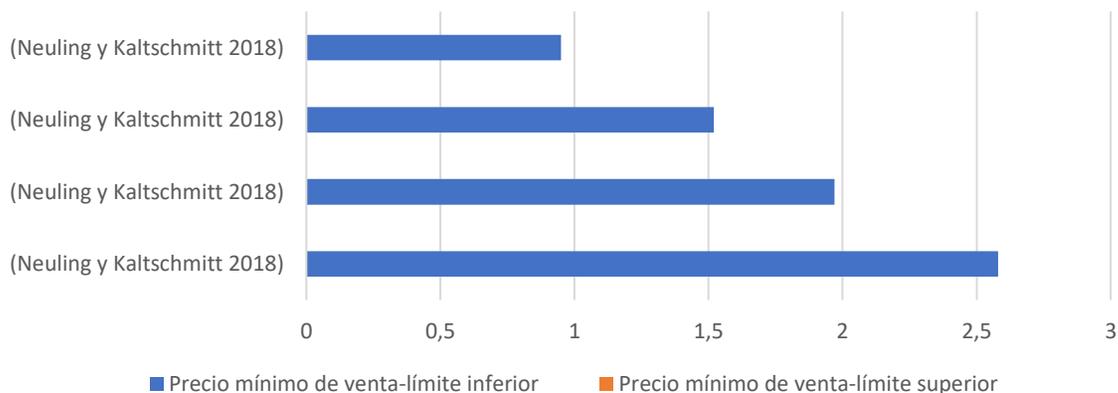
**Gráfico 16.** Costos estimados de producción de la tecnología de Bio-GtL (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

En el caso de la tecnología de Bio-GtL los precios mínimos de venta se encuentran entre los USD 0.95/l y los USD 2.58/l.

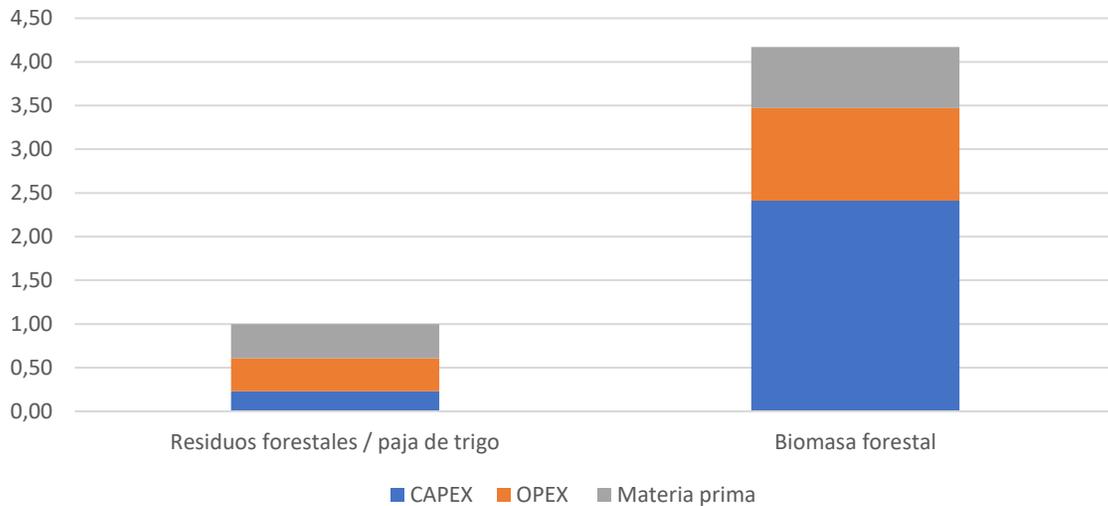
**Gráfico 17.** MFSP de la tecnología de Bio-GtL (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

En la licuefacción hidrotermal (HTL) los costos estimados de las materias primas no exceden el 40 % en ninguno de los dos casos, aun cuando el costo del capital correspondiente a los residuos forestales y a la paja de trigo es diametralmente inferior al de la biomasa forestal.

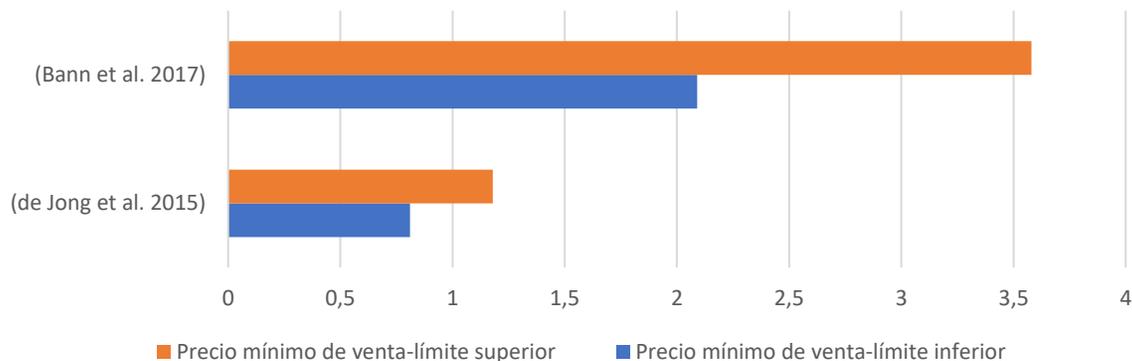
**Gráfico 18.** Costos estimados de producción de la tecnología de HTL (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

De conformidad con la documentación de los precios mínimos de venta, la tecnología de HTL presenta uno de los intervalos más altos, entre la banda baja y alta, el cual llega a ser de USD 2.77/l. Estas bandas se cotizan entre los USD 0.81/l y los USD 3.58/l.

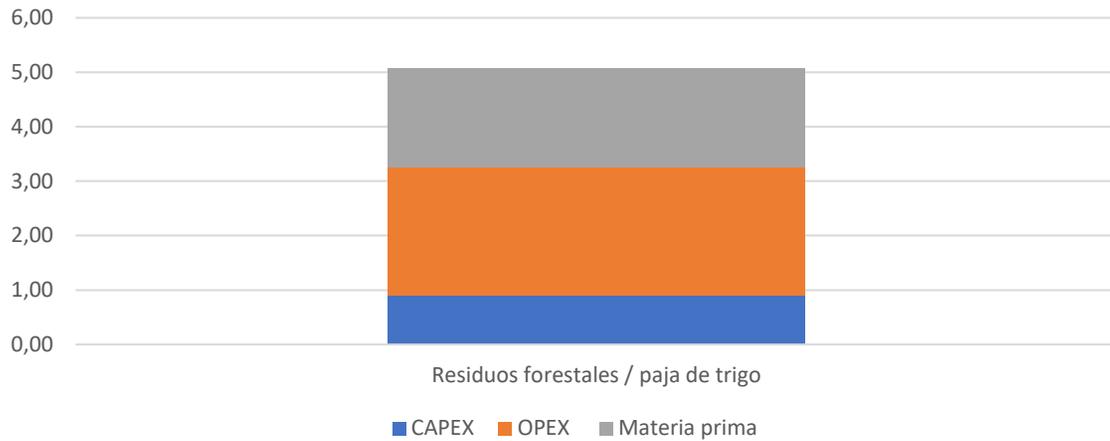
**Gráfico 19.** MFSP de la tecnología de HTL (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

En el caso de las SIP se ha publicado poca información que hace referencia a una estructura de costos de los residuos forestales y/o la paja de trigo.

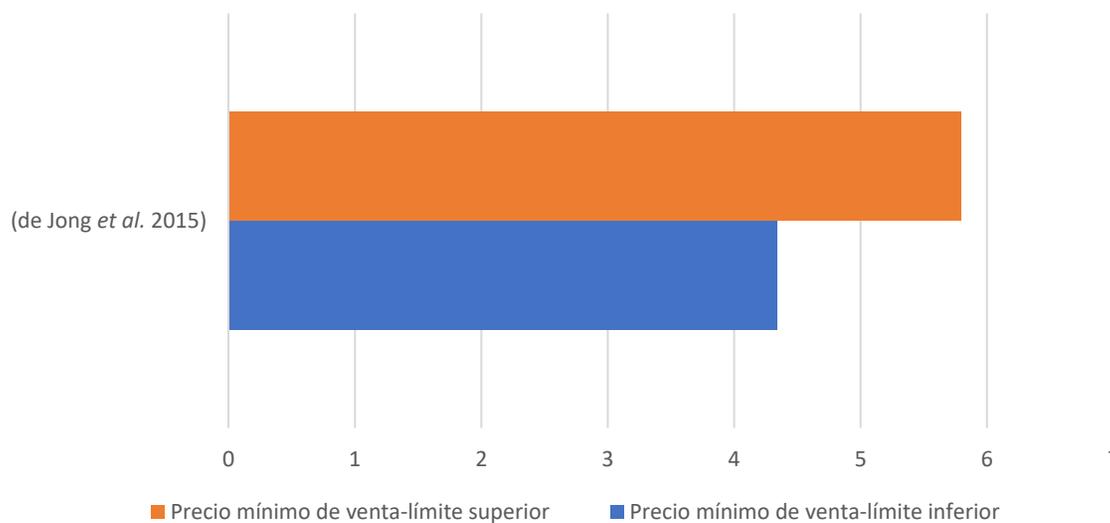
**Gráfico 20.** Costos estimados de producción de la tecnología de SIP (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Tomando como referencia una única fuente de materias primas vinculada con el proceso tecnológico de SIP, los precios mínimos de venta de esta tecnología se posicionan como los más altos, en comparación con los de las restantes, ya que se hallan entre los USD 4.34/l y los USD 5.79/l.

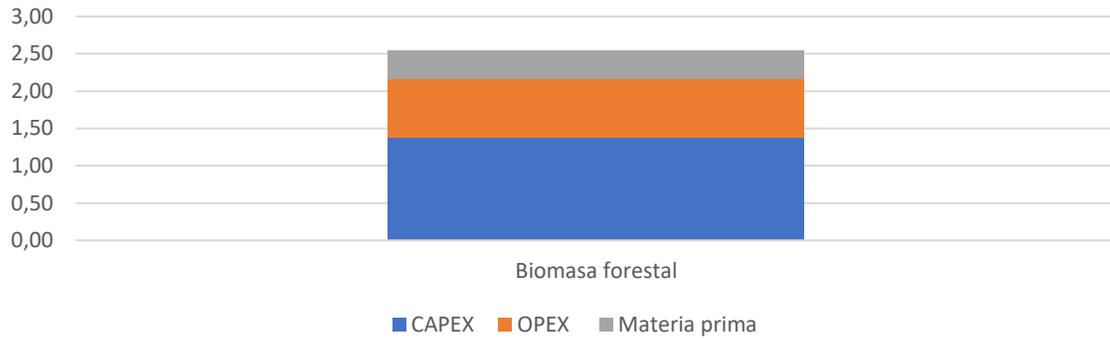
**Gráfico 21.** MFSP de la tecnología de SIP (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Al igual que en la producción con la tecnología SIP, la fundamentada en la tecnología de reformado en fase acuosa (APR) solo contempla una materia prima como recurso base; no obstante, el porcentaje de costos de la materia prima es aún menor, dado que constituye tan solo el 15 % del total de la estructura de costos.

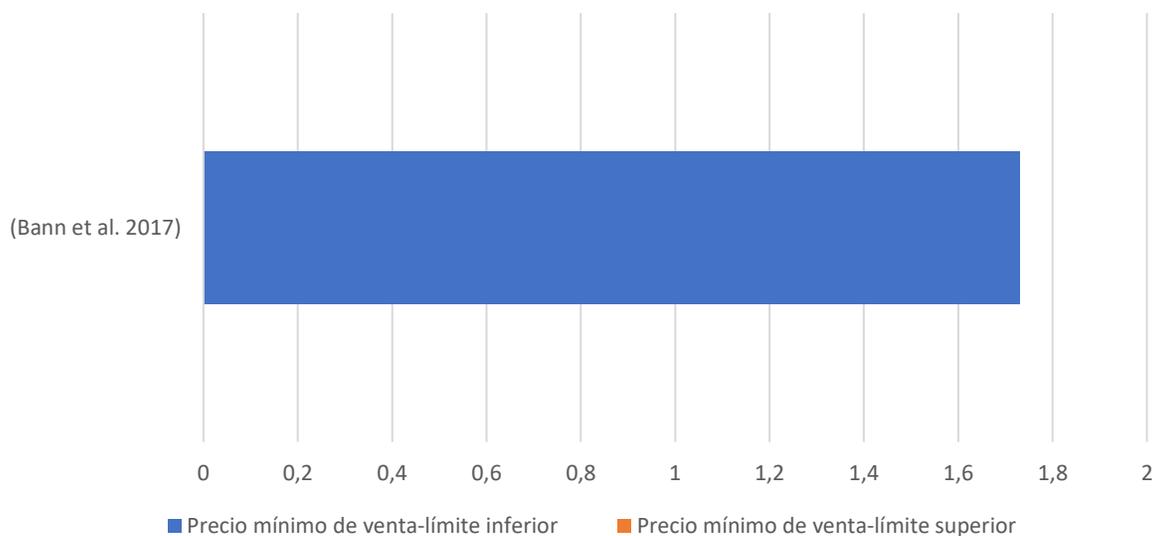
**Gráfico 22.** Costos estimados de producción de la tecnología de APR (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

A diferencia de los demás casos, con respecto a la tecnología de APR solo se dispone de una referencia de precio mínimo de venta, lo que imposibilita documentar un rango en concreto. El precio estimado se cotiza en los USD 1.73/l.

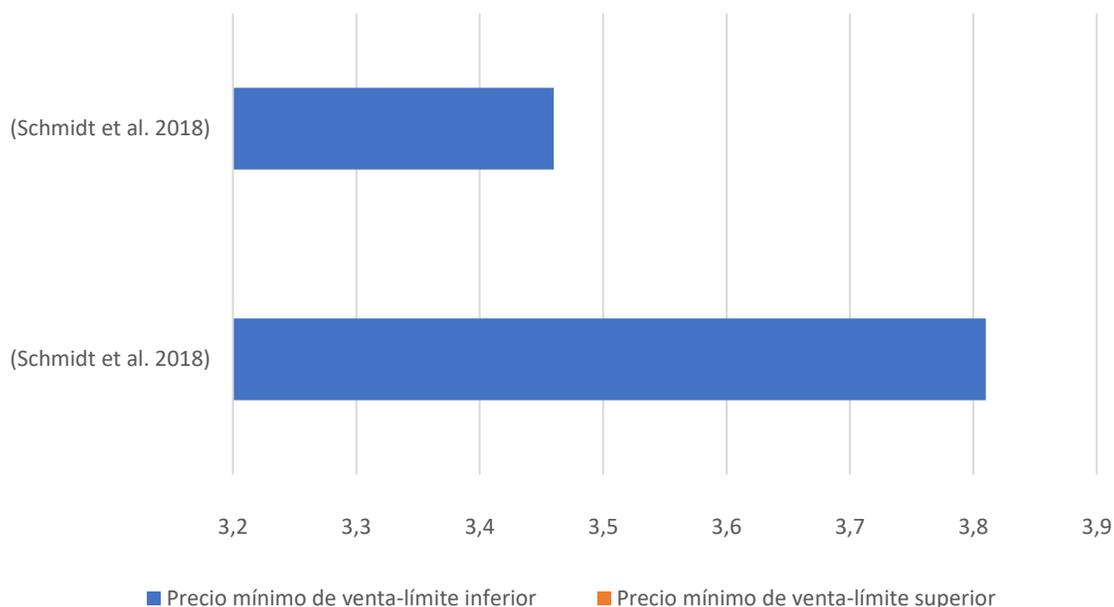
**Gráfico 23.** MFSP de la tecnología de APR (en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Finalmente, entre la gama de tecnologías detalladas, las tecnologías de potencia a X (PtX) y FT cotizan un precio mínimo de venta que va desde los USD 3.46/l hasta los USD 3.81/l.

**Gráfico 24.** MFSP de las tecnologías de PtX y FT (en USD/l).

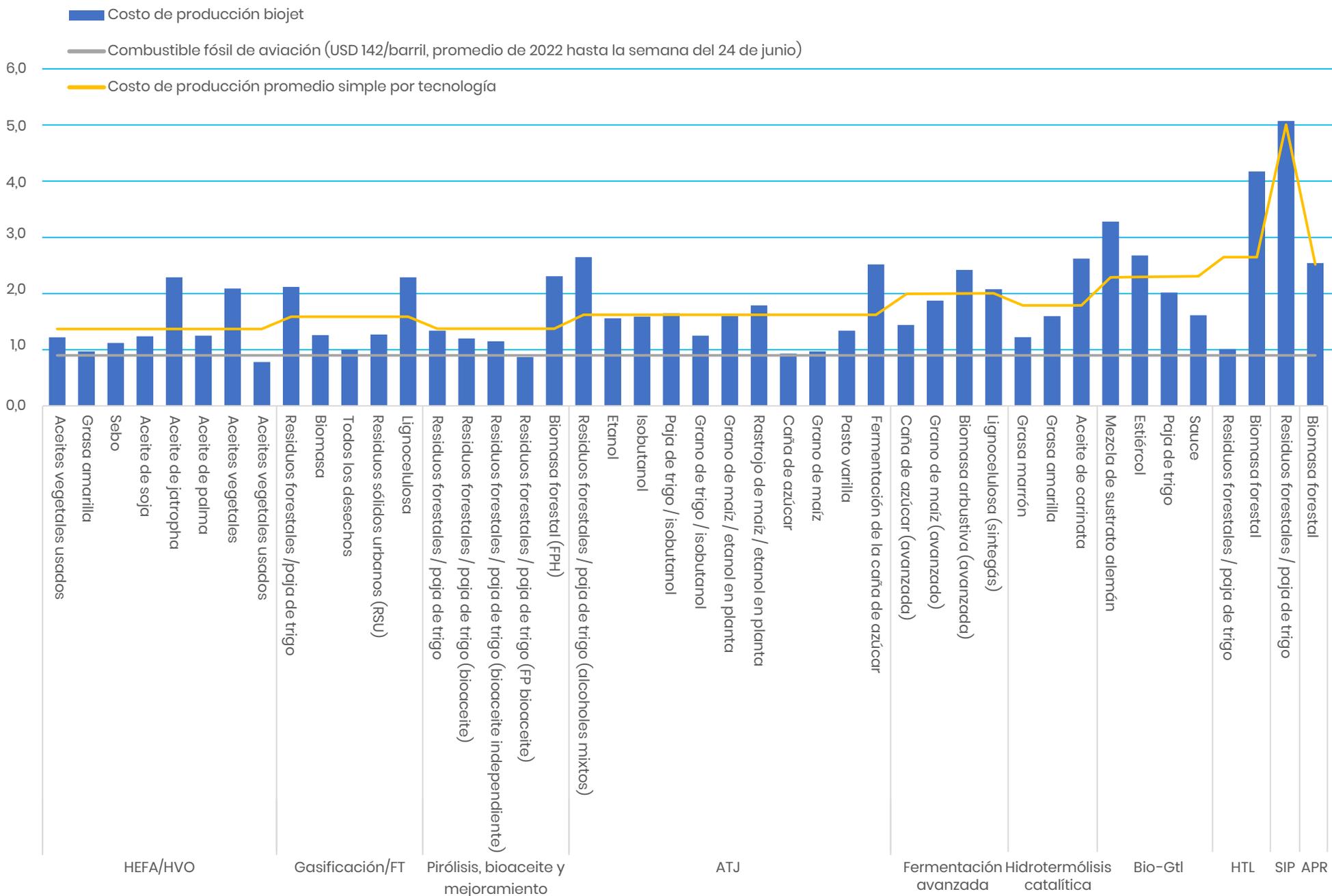


**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021.

Los costos de producción del *biojet* son muy variables, según las materias primas y las tecnologías utilizadas. Con los precios actuales de los combustibles fósiles de aviación (promedio de 2022 hasta la semana del 24 de junio) y las materias primas más competitivas, algunas tecnologías podrían llegar a producir *biojet* a precios similares de indiferencia<sup>18</sup>; no obstante, la elevada volatilidad en el precio del petróleo no asegura la competitividad en el largo plazo. Por ello será necesario continuar recorriendo la curva de ganancia de eficiencia y productividad en las distintas tecnologías para procurar producir *biojet* de la forma más económica posible.

<sup>18</sup>Según otras estimaciones de costos de producción de CAS, como las presentadas por el FEM (2020), dichos costos son mayores que los presentados en este trabajo. A continuación se detallan los costos estimados por dicho estudio, así como las curvas de aprendizaje calculadas.

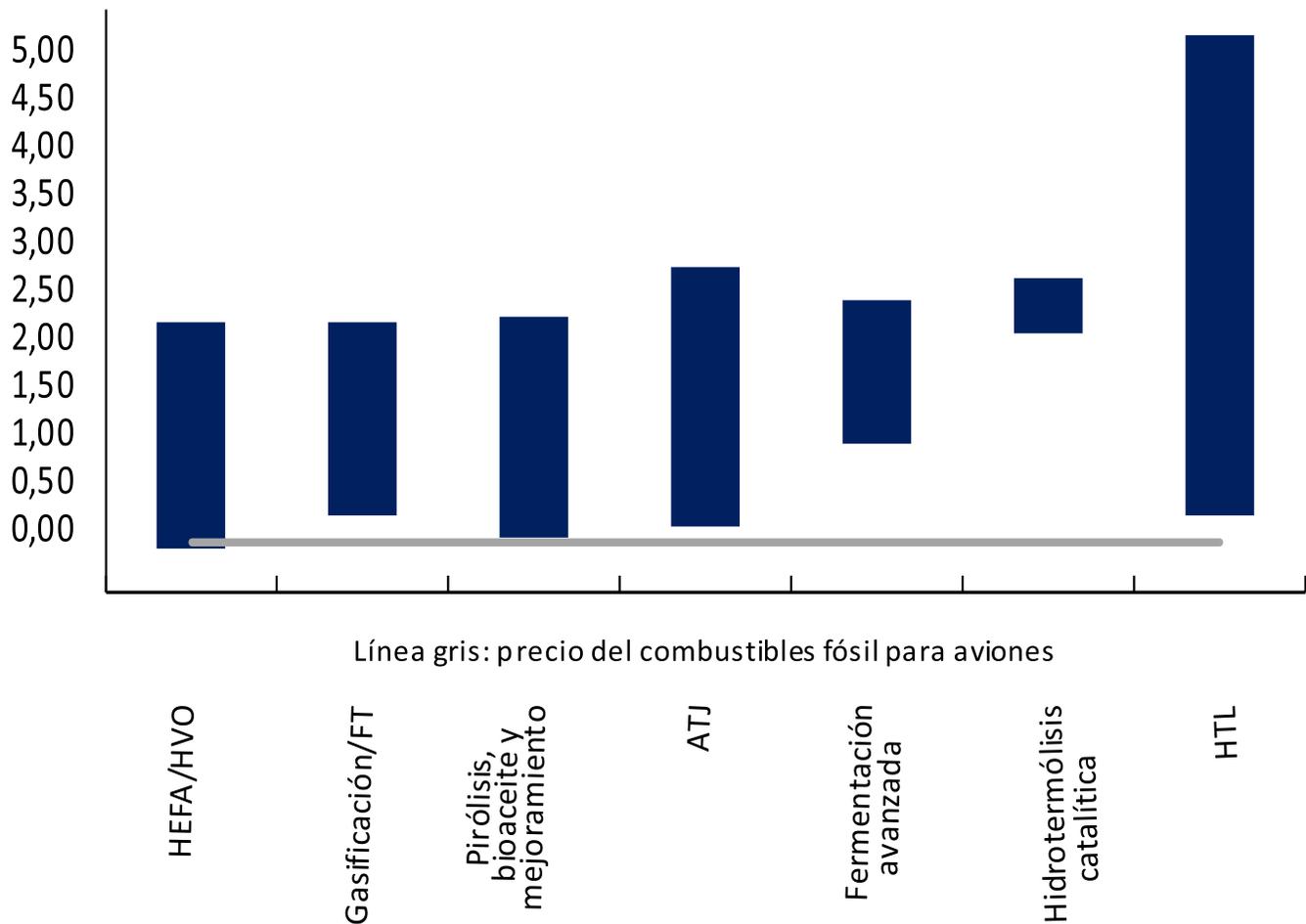
**Gráfico 25.** Costos de producción del *biojet*, de acuerdo con los distintos tipos de tecnología y materias primas, comparados con los de la producción de combustible fósil de aviación (promedio de 2022 hasta la semana del 24 de junio de 2022, en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021 e IATA 2022a.

En la siguiente ilustración se puede observar cómo, a pesar de que los precios del combustible fósil de aviación son elevados, los precios de las distintas opciones de CAS suelen ser bastante más altos.

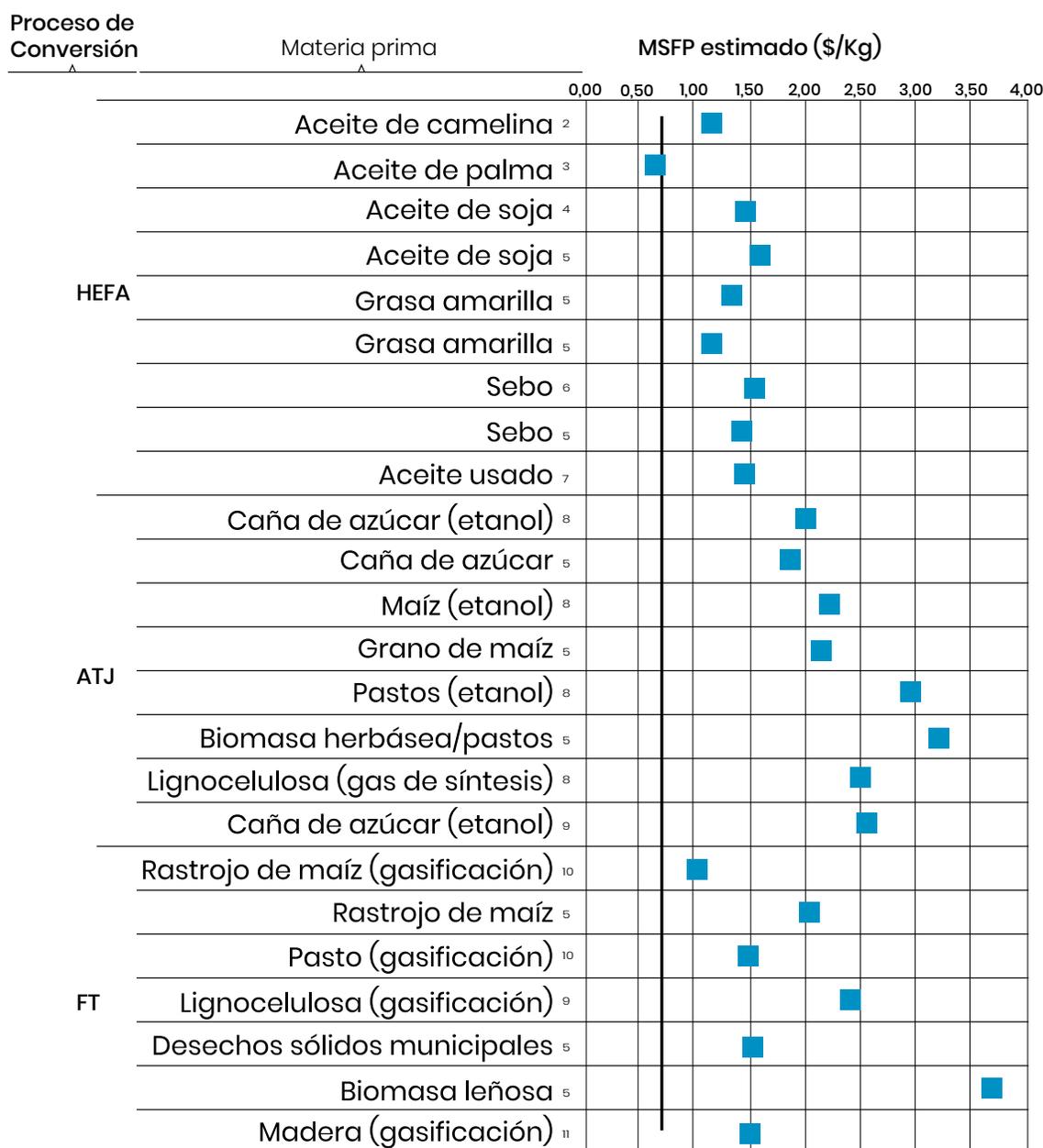
**Gráfico 26.** Rangos de costos de producción del *biojet* de acuerdo con los distintos tipos de tecnología y materias primas, en comparación con los del *jet* fósil (promedio de 2022 hasta la semana del 24 de junio de 2022 en USD/l).



**Fuente:** Elaborado con base en IRENA 2021 e IATA 2022a.

Alternativamente, la OACI (2017) había provisto datos sobre los precios mínimos de las distintas alternativas tecnológicas para producir CAS. En dicho informe ya se destaca que “Los recientes análisis técnicoeconómicos presentados en la figura muestran que actualmente algunas formas de producción se están acercando a la paridad en precio con los combustibles fósiles”.

**Tabla 6.** MFSP estimados para diversas formas de producción de CAS (puntos cuadrados), en comparación con el precio promedio correspondiente a un período de tres años del queroseno para reactores con origen en la costa estadounidense del golfo de México (línea continua).



**Fuente:** Tomado de OACI 2017:3.

En la siguiente tabla se brindan detalles acerca de los factores determinantes y las principales restricciones para la reducción de costos de CAS, según diferentes rutas tecnológicas.

**Tabla 7.** Costos y limitaciones en la producción de CAS según la ruta.

Ruta	HEFA	ATJ	Gasificación/FT	Energía (o poder) a líquido (PtL)
Factores determinantes de costos	<p>El precio de la materia prima representa la mayor parte del costo de producción y su mercado se basa en la disponibilidad de materia prima.</p> <p>El costo de H<sub>2</sub> (verde) presenta la mayor oportunidad para mejorar el costo de producción de HEFA.</p>	<p>La refinación del etanol en combustible para aviones supone el mayor costo. Ambos pasos (producción de etanol y producción de CAS) son intensivos en cuanto al gasto de capital, con una potencial disminución en la refinación debido a los efectos del aprendizaje.</p>	<p>El costo de producción de la gasificación/FT refleja en gran medida el costo de capital.</p>	<p>Los costos de las rutas que emplean la reacción de desplazamiento inverso del gas de agua (RWGS) y la configuración de coelectrólisis con celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC) dependen en gran medida del costo de la electricidad para la producción de hidrógeno o la coelectrólisis. Ambas rutas de PtL también son intensivas en gasto en capital (CAPEX) y dependen del precio del CO<sub>2</sub> sostenible.</p>
Restricciones de reducción de costos	<p>El suministro limitado de materia prima y los obstáculos para</p>	<p>Los gastos operativos del paso de etanol a CAS siguen siendo</p>	<p>El CAPEX para construir un gasificador sigue siendo alto, incluso</p>	<p>A pesar de dicha caída, el costo de la electricidad verde sigue siendo sustancial.</p>

	<p>incrementar su disponibilidad (en particular de los aceites), constituyen el principal factor limitante para reducir los costos.</p>	<p>relativamente altos. La producción de etanol presenta un alto grado de madurez, con pocas posibilidades de reducir sus costos.</p>	<p>después de una fuerte caída esperada entre 2025 y 2030.</p>	<p>El CAPEX del FT, la RWGS y las SOEC presentan un potencial de reducción limitado.</p>
--	---	---	--	--

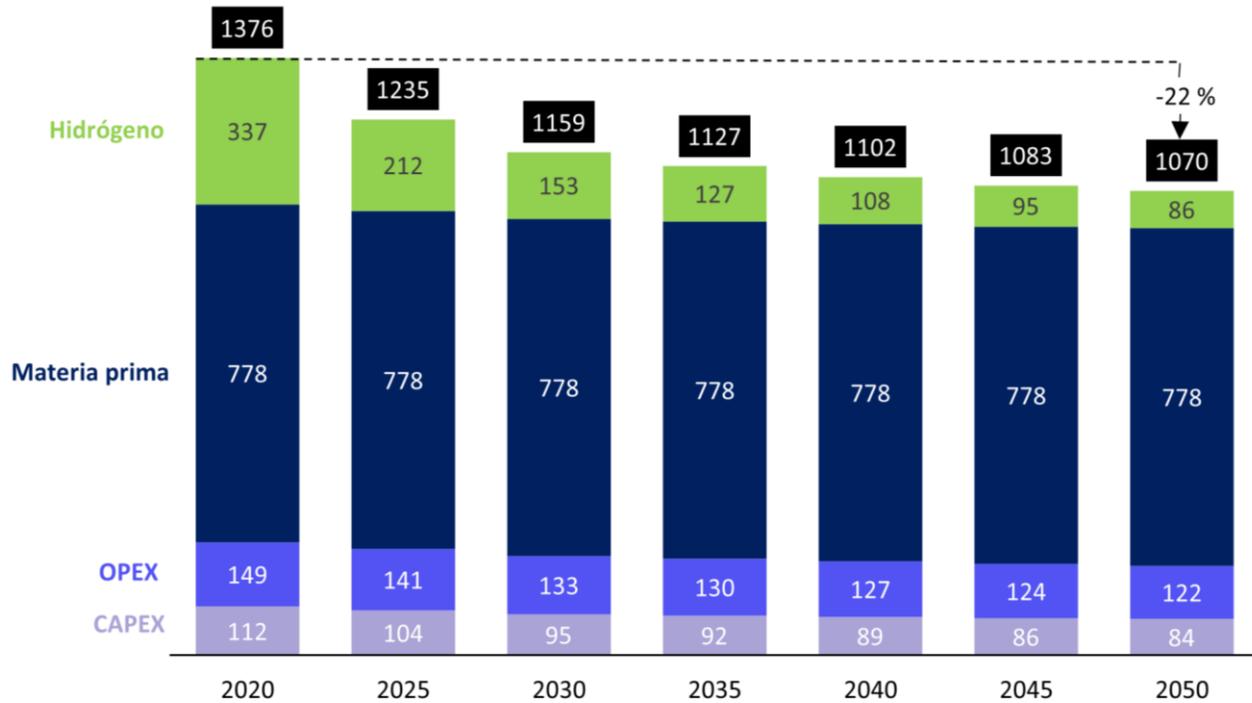
**Fuente:** Elaborado con base en FEM 2020.

Es posible que la de HEFA siga siendo la ruta más eficiente hasta 2030, ya que tiene el costo más competitivo, debido a la relativamente poca inversión que supone su tecnología probada. El principal desafío que plantea su uso es el costo de la materia prima, cuya reducción resulta improbable. Además, los costos de producción dependen principalmente del costo de la materia prima, que actualmente presenta importantes oscilaciones. En el caso de ATJ, la tecnología cuenta con la ventaja de la alta capacidad de producción de alcohol en plantas ya amortizadas que actualmente dedican su producción a bioetanol combustible. Ello permitiría licuar inicialmente los costos de amortización del capital en la primer etapa productiva del proceso.

De acuerdo con el informe del FEM (2020) intitulado Cielos limpios para el mañana<sup>19</sup>, los costos totales de producción por tonelada métrica de CAS a partir de HEFA podrían disminuir de alrededor de USD 1400 a aproximadamente USD 1100 (dólares constantes) hasta 2050. Debido a la caída de los costos de producción y a la disponibilidad de materia prima sostenible, los HEFA producidos en cualquier parte del mundo podrían cubrir el 100 % de la demanda europea de combustible para aviones por menos de USD 1500/t hasta 2030.

<sup>19</sup> Cabe destacar que en el informe del FEM se presentan rangos de costos mayores a los proporcionados en este documento. En las siguientes curvas de reducción estimada de costos se incluyen valores intertecnológicos promedio, lo que lleva a incrementar los costos de las opciones más eficientes.

**Gráfico 27.** Curva de los costos estimados de producción de CAS a través de la ruta tecnológica de HEFA (de 2020 a 2050 en USD/t).



**Fuente:** Elaborado con base en FEM 2020.

**Nota:** Se supone que los costos se han asignado de manera uniforme a todos los subproductos. Este modelo se elaboró en el contexto de Europa, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).

Con respecto al:

1. Hidrógeno, se toma como base la energía solar. El H<sub>2</sub> se utiliza a USD 7.5/kg y USD 1.90/kg en 2020 y 2050, respectivamente.
2. La materia prima, los costos pueden variar mucho según el tipo, generalmente de USD 600/t a USD 950/t. El aceite de cocina usado se presenta a USD 750.
3. Al CAPEX, se produce una disminución del 15 % en 2030 y de más de 12 % en 2050.
4. Al rendimiento y la salida del combustible, el rendimiento para la salida total del producto es de 90 %<sup>20</sup>, mientras que la cuota en la salida del producto es de 46 % (FEM 2020).

En cuanto a la gasificación por FT, en dicho informe del FEM (2020) se destaca que en la actualidad el CAPEX representa más del 80 % de los costos de producción correspondientes al uso de residuos municipales sólidos como materia prima. Aunque estos desechos no tienen un valor monetario, sí poseen un valor agregado derivado de la eliminación de los flujos de residuos urbanos.

Se calcula que en la actualidad los costos totales de producción podrían disminuir alrededor de USD 1900/t, en 2030, USD 1600/t, y en 2050, USD 1400/t, es decir, se estima una disminución del 24 %, incluso suponiendo que la demanda de los RSU suba hasta obtener un costo.

Además, el uso de residuos municipales sólidos como materia prima supone beneficios significativos. En primer lugar, los residuos sólidos presentan desafíos crecientes en las zonas urbanas alrededor del mundo, donde la tierra es escasa y los residentes están preocupados por la posible liberación en los vertederos de metano, CO<sub>2</sub>, olores nocivos en el aire y contaminantes para los recursos acuíferos; p. ej., el Gobierno del Reino Unido está aumentando los impuestos sobre vertederos a GBP 95/t (alrededor de USD 123/t), lo que causa que los RSU tengan un costo negativo como materia prima.

En segundo lugar, en regiones donde los impuestos sobre vertederos son bajos o inexistentes, especialmente en aquellos donde se carece de los recursos para usarlos o manejarlos, los RSU generalmente carecen de un valor económico.

El contexto regional puede suponer beneficios o desafíos adicionales a su uso, pero, en general, los RSU son una materia prima fácilmente disponible y de bajo costo.

Existe una probabilidad de que, con el tiempo, la demanda de RSU para la producción de combustible y en otros sectores industriales puede aumentar, lo que podría incrementar el valor de los RSU y sus costos, equiparándolos con los de las materias primas tradicionales.

Por otra parte, la gasificación de residuos forestales y de otros residuos celulósicos requiere menores inversiones de capital; sin embargo, los costos de

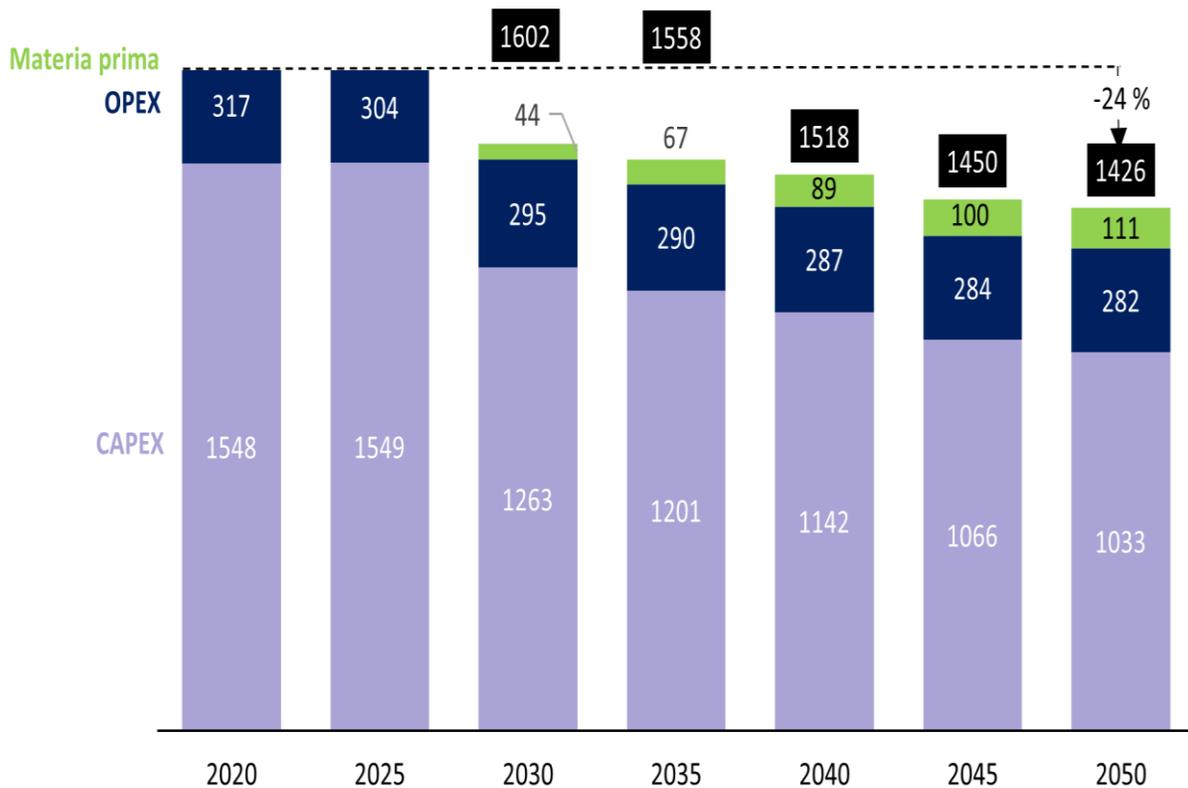
---

<sup>20</sup> Esto significa que el producto total constituye el 90 % del insumo de la materia prima.

la materia prima pueden variar entre USD 33/t y USD 220/t, dependiendo de la región. Los costos de producción por tonelada métrica podrían caer en USD 2100 actualmente, USD 1800 en 2030 y USD 1550 en 2050.

Incluir la captura de carbono en la producción podría reducir en más del 100 % las emisiones de GEI de los ciclos de vida –generando una tasa negativa de dichas emisiones– a un costo incremental relativamente bajo. Este proceso aumentaría en alrededor de 6 % el costo del combustible. En una típica planta con reacción FT, p. ej., la eliminación y captura de una parte del CO<sub>2</sub> del gas de síntesis ya es un requisito para reducir la extensión y el costo del proceso FT y aumentar su rendimiento.

**Gráfico 28.** Curva de costos estimados de la producción de CAS mediante la ruta tecnológica de gasificación/FT (de 2020 a 2050 en USD/t).



**Fuente:** Elaborado con base en FEM 2020.

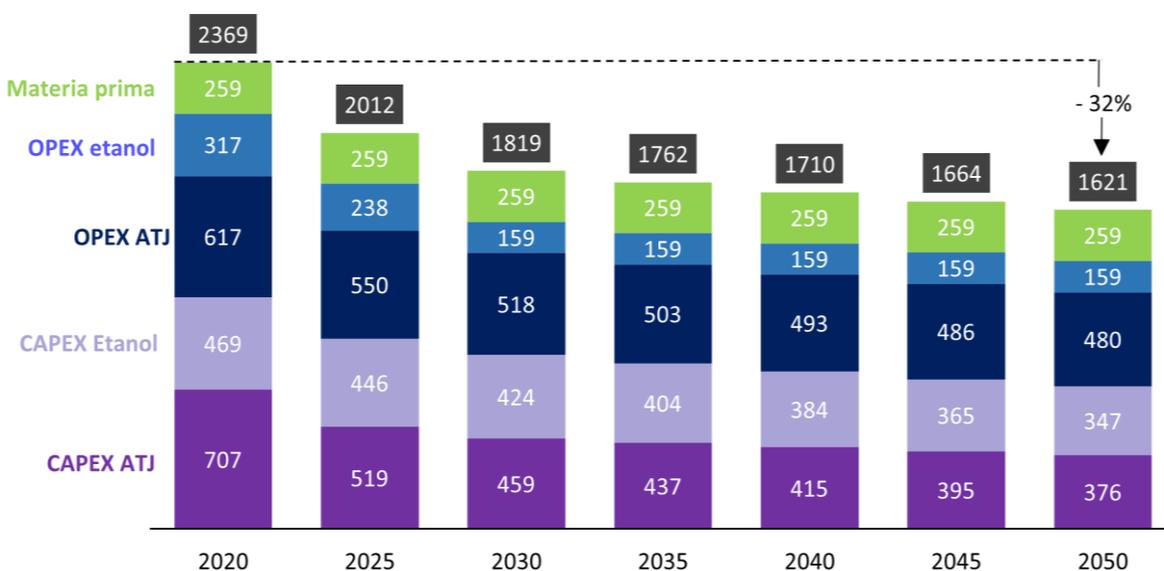
**Nota:** Se supone que los costos se han asignado de manera uniforme a todos los subproductos. Este modelo se elaboró en el contexto de Europa, según la OCDE.

En relación con:

1. La materia prima, se supone que el costo de los RSU es de 0 USD/t, lo que podría cambiar con el tiempo.
2. El CAPEX, se producirá una disminución del 4 % anual entre 2025 y 2030 y una del 1 % después de 2030.
3. El rendimiento y la salida del combustible, el rendimiento para la salida total del producto es de 20 %, mientras que la cuota en la salida del producto es de 60 % (FEM 2020).

En la vía de ATJ los costos de la materia prima presentan una amplia variabilidad, impulsada principalmente por el costo del etanol. Los costos de la producción del etanol deberían caer alrededor de 1 % por año, mientras que los CAPEX deberían bajar aproximadamente 35 % hasta 2030 y continuar disminuyendo alrededor del 1 % por año a partir de entonces, reduciendo los costos de producción de CAS por tonelada métrica alrededor de USD 2400 actualmente, USD 1800 en 2030 y USD 1600 en 2050.

**Gráfico 29.** Curva de costos estimados de la producción de CAS por medio de la ruta tecnológica de ATJ (de 2020 a 2050 en USD/t).



**Fuente:** Elaborado con base en FEM 2020.

**Nota:** Se supone que los costos se han asignado de manera uniforme a todos los subproductos. Este modelo se elaboró en el contexto de Europa, de conformidad con la OCDE..

En términos de:

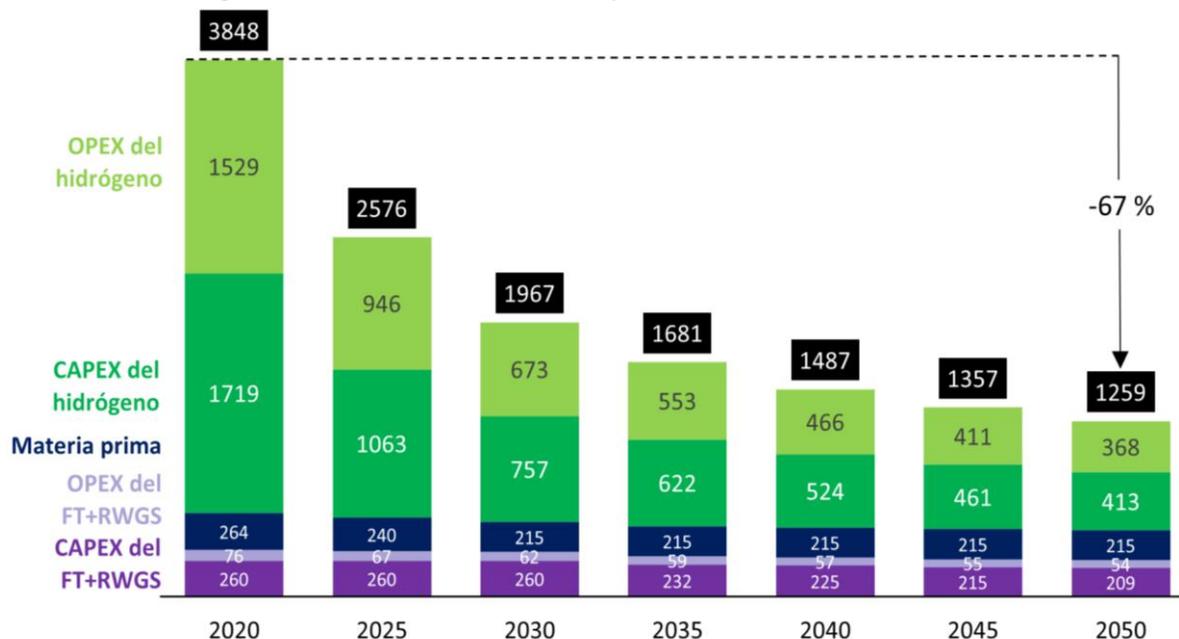
1. La materia prima, los costos pueden variar mucho según el tipo utilizado: de USD 33/t a USD 220/t. El bagazo de caña de azúcar se muestra a USD 33/t.
2. El CAPEX del ATJ, se prevé una disminución del 35 % para 2030 y luego una del 1 % anual. La producción de etanol presentará una reducción del 1 % anual.
3. El rendimiento y la salida del combustible, el rendimiento por producto total es de 13 %, mientras que la cuota de combustible en la salida del producto es de 77 %.

En las rutas de PtL los costos de factores operativos y de entrada representan en la actualidad entre el 80 % y el 90 % de los costos de producción, dependiendo del proceso de producción específico, mientras que la RWGS tiene altos costos de hidrógeno en función de la electricidad y el CAPEX. Debido a la coelectrólisis, se incurre en costos de electricidad directamente comparables, que varían mucho según la fuente de energía y la región y cuya caída significativa está prevista.

Es probable que el costo de un megavatio hora de energía solar disminuya de USD 59 en la actualidad a USD 33 en 2030 y USD 18 en 2050. El hidrógeno creado a través de la energía solar cuesta USD 7.30/kg, pero dicho precio podría caer a USD 3.20/kg en 2030 y hasta USD 1.70/kg en 2050. Asimismo, el CO<sub>2</sub> industrial, materia prima necesaria para todas las rutas de PtL, ahora cuesta alrededor de USD 80/t, pero este precio podría caer a alrededor de USD 65/t en 2030.

Dadas estas disminuciones en los costos de procesamiento y materia prima, en la actualidad los gastos de producción de CAS en estas vías deberían descender a algo más de USD 3800/t, a menos de USD 2000/t en 2030 y a USD 1300/t en 2050.

**Gráfico 30.** Curva de costos estimados de producción de CAS por medio de la ruta tecnológica de electrólisis acuosa y RWGS PtL (de 2020 a 2050 en USD/t).



**Fuente:** Elaborado con base en FEM 2020.

**Nota:** Se supone que los costos se han asignado de manera uniforme a todos los subproductos. Este modelo se elaboró en el contexto de Europa, de conformidad con la OCDE.

Con respecto a:

1. La electrólisis del agua + la RWGS, los costos de H<sub>2</sub> pueden variar mucho según la fuente de energía y la región. En el caso del H<sub>2</sub> basado en la energía solar, los costos son USD 7.3/kg, USD 3.3/kg y USD 1.7/kg en 2020, 2030 y 2050, respectivamente.
2. La materia prima, el CO<sub>2</sub> industrial se halla a USD 81/t y a USD 66/t en 2030.
3. El CAPEX del FT y la RWGS, se muestra una disminución anual de 1 % después de 2030.
4. El rendimiento y la salida del combustible, el rendimiento del CO<sub>2</sub> es de 17 % y la cuota del combustible en la salida del producto es de 60 % (FEM 2020).

De acuerdo con la OACI (2017:4), algunos de los costos de producción de CAS:

Pueden reducirse directa o indirectamente mediante las siguientes iniciativas relacionadas con la tecnología:

- a) utilización de instalaciones preexistentes, es decir, infraestructura existente que no se utiliza o está infrautilizada, como por ejemplo, refinerías de petróleo antiguas o instalaciones de producción de combustible alternativo existentes;
- b) ubicación con infraestructura existente, por ejemplo, situar la producción de AAF cerca de instalaciones de producción de combustibles convencionales para aprovechar la producción de hidrógeno y las instalaciones para la mezcla;
- c) explorar exhaustivamente e identificar recursos de materias primas con el objetivo de aumentar el volumen disponible de combustibles sostenibles para la aviación (SAF);
- d) mejorar la recuperación de aceites renovables y los procesos de conversión;
- e) crear coproductos de mayor valor;
- f) mejorar la eficiencia de los procesos que convierten materia prima y productos intermedios en SAF;
- g) desarrollar tecnologías avanzadas para la producción de SAF;
- h) reducir la distancia y el número de las rutas de transporte;
- i) continuar realizando estudios de rendimiento, ensayos de combustibles y ensayos en vuelo.



4

Aspectos

institucionales y

políticas públicas

## Capítulo 4.

### Aspectos institucionales y políticas públicas

La construcción de institucionalidad y la formulación de políticas públicas son dos condiciones necesarias para desarrollar significativamente la producción y el consumo de CAS. En varios informes recientes se han evaluado los tipos de políticas requeridos para aumentar la producción y el uso del biocombustible de aviación (FEM 2020), considerando puntos específicos de una regulación que puede trascender las fronteras nacionales.

Es importante recordar que, de conformidad con el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, es la OACI la institución encargada de abordar las emisiones de GEI procedentes de la industria de la aviación internacional. Esta indicación se basa en que en dicho protocolo, por su carácter transfronterizo, se eximió a la aviación de realizar contribuciones nacionales, y se asignó la responsabilidad de “limitar o reducir” las emisiones de este sector a la OACI (ONU Cambio Climático 2018a y 2018b). Por otra parte, la aviación civil nacional, los vuelos privados y la aviación militar sí están comprendidos dentro de los objetivos de mitigación nacionales. Esto explica en gran medida por qué las instituciones vinculadas con la aviación civil han sido una de las principales impulsoras de la descarbonización del sector.

### Institucionalidad nacional y temas por normar

En el ámbito nacional la institucionalidad pública relativa a los biocombustibles líquidos en general suele ser transversal a varias entidades gubernamentales (Torroba 2021). A pesar de que la institucionalidad asociada con los biocombustibles de aviación se encuentra en pleno desarrollo, en algunos casos aún es incipiente. Además, se presume que sus actores presentan similitudes y diferencias con respecto a los de otros biocombustibles como el biodiésel y el bioetanol.

Entre los nuevos actores que posiblemente se vinculen con esta temática se destacan:

- Los organismos encargados de la administración civil de aviación,

- Los organismos responsables de la regulación de los sistemas nacionales/locales de aeropuertos,
- Las administraciones de los aeropuertos involucrados y
- Los organismos a cargo de la administración de aviación no civil (militares, vuelos particulares, etc.).

Entre los actores que guardan relación con otros biocombustibles líquidos y que podrían intervenir en la industria de los biocombustibles de aviación se pueden mencionar:

- Los ministerios y las secretarías de Energía. Estas dependencias estatales, que abordan diversos temas con respecto a los combustibles fósiles y a otros biocombustibles, han venido estableciendo una relación con nuevas energías renovables y son firmes candidatos para abordar temas relativos a los biocombustibles de aviación como los siguientes:
  - Condiciones de calidad (especificaciones y mezclas obligatorias o no con combustible para aviones);
  - Cuestiones de seguridad en toda la cadena de valor, desde su producción hasta su uso;
  - Los sistemas de precios –en los distintos eslabones de la cadena, que va de la generación al consumo– y la comparación de precios/costos de los de base fósil frente a los renovables; y
  - La competencia con otros biocombustibles.
- Los ministerios/las secretarías de Agricultura e instituciones complementarias (de desarrollo rural e investigación y desarrollo [IyD], entre otras) que incorporan el uso de la biomasa en la producción de biocombustibles de aviación. De acuerdo con Torroba (2021), los temas tratados por estas oficinas públicas en materia de biodiésel y bioetanol que podrían ser abordados también en relación con los biocombustibles de aviación son:
  - La relación precio/costo de las biomásas alternativas y sus destinos productivos alternativos;

- La identificación de los impactos de la producción de biocombustibles de aviación en los esquemas productivos agrícolas;
  - Las aprobaciones y los reglamentos en materia de genética vegetal para destinos específicos;
  - La identificación y protección de zonas prioritarias en materia de biodiversidad;
  - La implementación de una gestión específica de la producción de materias primas para no alterar la biodiversidad ni los servicios ecosistémicos;
  - El ordenamiento territorial debido a la expansión de fronteras, dadas las presiones ejercidas sobre el sector agrícola para suministrar biomasa destinada a la producción de alimentos y energía; y
  - El desarrollo de nuevos cultivos.
- Los ministerios/secretarías de Producción y sus organismos técnicos asociados (especialmente los institutos de IyD y de tecnología industrial) en temas relacionados con:
    - El desarrollo de empresas de biocombustibles para la aviación como un nuevo sector industrial;
    - Sistemas de promoción industrial para fortalecer/impulsar el establecimiento de instalaciones productivas; e
    - Investigaciones en materia de rutas tecnológicas.
  - Los ministerios/las secretarías de Economía y/o Finanzas. En este caso, los temas de la agenda podrían ser:
    - Aspectos fiscales y/o impositivos: el costo fiscal y los eventuales beneficios impositivos asociados con el desarrollo de los biocombustibles de aviación en sus múltiples etapas;

- Aspectos tributarios: la creación o la modificación de impuestos sobre los combustibles fósiles y biocombustibles, en respuesta a las demandas medioambientales globales (impuesto al CO<sub>2</sub>, mercados de carbono, etc.);y
- El posible impacto en la balanza comercial, especialmente en los países importadores de combustibles fósiles de aviación.
- Los ministerios/las secretarías de Ambiente, en el ámbito de los cuales se destacan los siguientes temas:
  - El impacto ambiental de nuevos proyectos de CAS;
  - La huella de carbono y aspectos vinculados a las emisiones comparativas de GEI; y
  - Los efectos de la incorporación de nuevos procesos productivos que requieren biomasa en la biodiversidad.

En el desarrollo de la institucionalidad relativa a los biocombustibles tradicionales una diferencia sustancial entre los dedicados al transporte terrestre y los dedicados al sector de la aviación es que se debe complementar la institucionalidad pública nacional/estatal a través de la coordinación de políticas y acuerdos supranacionales. Especialmente en los vuelos internacionales, con respecto a los cuales ya existen mecanismos como el CORSIA, la utilización de biocombustibles alternativos a los fósiles, con posibles precios y mecanismos de promoción diferenciales, supondrá coordinaciones y acuerdos supranacionales, no necesariamente requeridos en el caso de los biocombustibles para el transporte terrestre.

La OACI y numerosas aerolíneas han sido grandes impulsoras de los biocombustibles de aviación, ya que los consideran como una de las mejores opciones para descarbonizar el transporte aéreo y cumplir con las metas ambientales fijadas. En este sentido, debido a la existencia de instituciones y regulaciones internacionales, cabe resaltar de nuevo la importancia de avanzar en la coordinación supranacional en el uso de estos biocombustibles<sup>21</sup>.

---

<sup>21</sup> La IRENA (2021) destaca que, a diferencia del transporte por carretera, en el que la producción y el uso de combustibles con bajo contenido de carbono han sido promovidos por los Gobiernos, el impulso a los combustibles de aviación con bajo contenido de carbono proviene de las aerolíneas, sus clientes y los fabricantes de equipos originales (como Boeing y Airbus), que buscan formas de descarbonización económicamente viables. Como resultado, el sector de la aviación ha estado apoyando el desarrollo del biocombustible para aviones de varias maneras, p. ej., mediante inversiones significativas en instalaciones de producción, acuerdos de compra a largo plazo, etc.

Otro aspecto relacionado con la institucionalidad es la generación en varios países de iniciativas privadas, públicas y públicas-privadas que respaldan distintos aspectos de la producción, el consumo y la investigación de los CAS. En el anexo 1 se brindan detalles al respecto.

## Políticas nacionales

En la actualidad varias naciones han empezado a desarrollar políticas para fomentar el uso de CAS y de combustibles de aviación con bajas emisiones de carbono. Se destacan los casos de las legislaciones ya aprobadas en Noruega, Reino Unido, Indonesia y California (Estados Unidos), mientras que, en Alemania, Francia, España, Portugal y Finlandia, el resto de los Estados Unidos, Brasil y Bélgica aún están en desarrollo (OACI 2022).

En la siguiente tabla se presentan las normativas aprobadas en los países, así como las iniciativas supranacionales.

**Tabla 8.** Normativa implementada en materia de CAS.

País	Normativa
Brasil	<p>Por medio del Programa Nacional de Bioqueroseno se ordena a las agencias e instituciones federales que proporcionen recursos a los proyectos asociados con los CAS, p. ej., el de incentivos fiscales.</p> <p>Se implementó la política RenovaBio para fomentar la descarbonización de todos los combustibles. El Comité de Combustibles Futuros está explorando más incentivos a la producción y uso de CAS.</p>
Colombia	<p>El Gobierno nacional aprobó la Ley 2169 de 2021, en cuyo artículo 12 se hace un llamado a los ministerios de Energía y de Transporte a impulsar el desarrollo y uso de CAS. Por otra parte, el Consejo Nacional de Políticas Económicas y Sociales publicó el documento 4045 sobre política de transición energética, en el que se establecen lineamientos para el Ministerio de Energía sobre el desarrollo de un plan de diseño, evaluación y análisis para la creación de la norma nacional para el fomento y uso de CAS.</p>

<p>Noruega</p>	<p>En la normativa, que entró en vigencia en 2020, se indica que el 0.5 % de los CAS debe ser mezclado con el combustible fósil de aviación. Se espera modificar la legislación para aumentar paulatinamente dicho porcentaje, hasta llegar a 30 % de CAS en la mezcla en 2030.</p>
<p>Reino Unido</p>	<p>Esta política pública, formulada en 2012 con el título Obligación de Uso de Combustible Renovable en el Transporte, constituye un incentivo económico.</p> <p>No es sino hasta el 19 de enero de 2021 que en ella se incluye el tema del combustible de aviación, de acuerdo con lo cual se recompensa la producción de CAS con los mismos incentivos económicos que se otorgan a los vehículos de carretera.</p> <p>En 2022 se creó la estrategia Jet Zero, cuyo fin es aumentar el apoyo a los CAS, creando una demanda segura y creciente en el Reino Unido a través de un mandato según el cual al menos el 10 % del combustible para aviones debe ser producido a partir de fuentes sostenibles para 2030, lo que permite impulsar una industria nacional de CAS, respaldada por el nuevo Fondo de Combustibles Avanzados de GBP 165 000 000.</p>
<p>Indonesia</p>	<p>La normativa indonesia fue una de las primeras en este tema. Entró en vigencia en 2013 como el Plan de Acción Estatal para reducir las emisiones de GEI en el sector de la aviación. Su objetivo es obtener una mezcla de 5 % de CAS en 2025. Además, mediante el Decreto n.º 517k/73/DJE/2014, se ha formado un grupo de trabajo denominado ABRETF, en apoyo a la ejecución de dicho plan.</p>
<p>California, Estados Unidos</p>	<p>El Estándar de Combustibles bajos en Carbono (LCFS) es un incentivo económico para acreditar rutas y proyectos en la medida en que estos utilicen combustibles de baja intensidad en carbono, lo que propicia la implementación de un número mayor de alternativas de energías renovables, la independencia del petróleo y una mejor calidad del aire.</p> <p>El LCFS constituye un complemento en el plano estatal de la Norma sobre Combustibles Renovables; no obstante, este programa federal no se centraba en los combustibles de aviación, sino de manera general en el sector de los transportes<sup>22</sup>. A fines de agosto de 2022 se aprobó un proyecto de ley para incentivar la producción y el uso de CAS y lograr una nueva meta para que estos constituyan el 20 % del combustible de aviación consumido en el estado en 2030.</p>

<p>Oregón, Estados Unidos</p>	<p>El Programa de Combustibles Limpios de Oregón, que se puso en marcha en 2016, incide de diferentes maneras en la disminución de emisiones de GEI: 1) el proceso de producción de biocombustibles se lleva a cabo de manera limpia; 2) las formas renovables de diésel, gas natural, propano y electricidad han surgido como reemplazos comercialmente viables y rentables de sus versiones fósiles; 3) se reduce el costo de los combustibles bajos en carbono y se crea un incentivo financiero para descarbonizar el sector del transporte. El año de referencia para el programa es 2015 y el estándar para ese año es de 10 % de etanol mezclado con gasolina y de 5 % de biodiésel mezclado con diésel. La regla actual requiere una reducción del 10 % en la intensidad de carbono promedio de los niveles de 2015 en 2025. Cabe destacar que este programa incluye no solo los sustitutos de la gasolina y el diésel, sino también el combustible alternativo para aviones.</p>
<p>China</p>	<p>La política y la acción de desarrollo ecológico de la aviación civil de China, adoptada en 2022, tiene como objetivo implementar 50 kilotoneladas de CAS para 2025, así como la realización de pruebas de rendimiento de CAS, una certificación de aeronavegabilidad y la exploración de nuevos caminos para su desarrollo.</p>
<p>Internacional</p>	<p>El CORSIA, un plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional, permite que las aerolíneas reduzcan sus requisitos de compensación con el uso de combustibles elegibles, que incluyen CAS y combustibles de aviación con bajas emisiones de carbono.</p>

**Fuente:** Elaborado con base en OACI 2022.

---

<sup>22</sup> Tiene como fin que el combustible para transporte vendido en los Estados Unidos contenga un volumen mínimo de combustibles renovables. Se deriva de la Ley de Política Energética de 2005 y fue ampliada por medio de la Ley de Seguridad e Independencia Energética de 2007.

## **El biocombustible para la aviación en los Estados Unidos**

El Gobierno de los Estados Unidos ha desarrollado la iniciativa Gran Desafío de los Combustibles Sostenibles para la Aviación, dirigida a colaborar con la industria para lograr una mayor sostenibilidad, reducir los costos y expandir la producción de CAS, a través de la generación de 3 billones de galones de CAS por año, con una reducción de al menos 50 % de las emisiones del ciclo de vida de los GEI con respecto a los combustibles convencionales hasta 2030 y de 100 % del uso de los combustibles previstos o de la producción anual de 35 billones de galones hasta 2050.

Este enfoque se explica en detalle en el Plan de Acción Climática de la Aviación 2021, en el que se establecen las estrategias del Gobierno para fomentar la innovación e impulsar el cambio en el ecosistema de la aviación en el país, alcanzando así el objetivo de cero emisiones netas de GEI en la aviación hasta 2050. En dicho plan se reconoce el papel crucial de los CAS en la reducción de los GEI y en el crecimiento del sector de la aviación desvinculado de las emisiones de carbono. En este sentido, el desarrollo de tecnologías innovadoras para producir CAS es precisamente lo que permitirá a los Estados Unidos cumplir sus objetivos climáticos y posicionarse como líder mundial en los mercados emergentes de CAS. Además, los CAS constituyen un componente crítico de la estrategia nacional de la OACI.

La reducción de las emisiones de GEI es una parte crucial de esta iniciativa. Para ello se debe actuar en diferentes puntos del ciclo de vida de los CAS, lo que resulta fundamental, ya que estos son combustibles de hidrocarburos que emiten dióxido de carbono cuando se queman en el motor del avión. De acuerdo con lo anterior, la medida en que cualquier CAS posibilita la reducción de emisiones depende del perfil de las emisiones de su ciclo de vida, teniendo en cuenta la producción, el transporte y la combustión del CAS, así como los efectos indirectos asociados a estos. Este gran desafío requiere una reducción de las emisiones de los combustibles durante su ciclo de vida de al menos 50 %, en relación con el combustible para aviones, para lo cual la iniciativa dispone de flujos de trabajo y acciones dedicadas a reducir las emisiones de la producción, la mezcla y la distribución de los CAS.

Para lograr su implementación exitosa se requiere una estrecha colaboración entre las agencias del Gobierno Federal de los Estados Unidos, en particular, entre el USDOE, el Departamento de Agricultura, el Departamento de Transporte, su Administración Federal de Aviación y la Agencia de Protección Ambiental. Las funciones de cada una de estas agencias se detallan en la iniciativa. También se ha establecido un grupo de

trabajo interinstitucional sobre CAS, que trabaja en el marco del Consejo para la Investigación y el Desarrollo de la Biomasa para permitir la coordinación con representantes de un conjunto más amplio de agencias gubernamentales.

De manera similar se estableció un equipo interagencial, conformado por representantes de agencias gubernamentales, laboratorios, universidades, organizaciones no gubernamentales y las industrias de la aviación, la agricultura y la energía, a fin de desarrollar una hoja de ruta que asegure la alineación de acciones del Gobierno y de la industria y coordina las políticas gubernamentales para cumplir los objetivos del Gran Desafío. Su fin es desarrollar un enfoque coordinado de las acciones federales para reducir las emisiones, eliminar el riesgo de la tecnología, reducir barreras y establecer cadenas de suministro y mercados. Esto se está llevando a cabo con actividades que apoyan la producción a corto plazo para cumplir los objetivos de 2030, así como con la innovación continua en respaldo de la producción futura para cumplir los objetivos de 2050.

En conclusión, esta iniciativa y su hoja de ruta están dirigidas al logro de reducciones sustanciales de emisiones de GEI, mediante la investigación, el desarrollo y el despliegue de CAS en el corto y el largo plazos. Se trata de un plan para emprender acciones sustanciales y brindar asistencia continua en el corto y el largo plazos.

## Normativa en desarrollo

En la siguiente tabla se describe la normativa en desarrollo en materia de CAS.

**Tabla 9. Normativa en desarrollo.**

País	Normativa en desarrollo (metas por implementar)
Reino Unido	<p>Se propuso la introducción de una obligación para los proveedores de combustible de reducir la huella de carbono del combustible de aviación utilizado en el Reino Unido, lo que se logrará por medio de un mayor uso de CAS.</p> <p>El país está buscando argumentos sobre:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● La necesidad de formular un mandato en torno a los CAS;</li> <li>● Una ambición de alto nivel y el diseño del mandato propuesto para los CAS;</li> <li>● Criterios de elegibilidad de combustibles;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interacciones entre las políticas de CAS y otras políticas nacionales e internacionales; y</li> <li>• Principios de cumplimiento, notificación y verificación que guiarán la creación del esquema.</li> </ul>
Regional (UE)	La iniciativa RefuelEU es un mandato propuesto para el uso de CAS de 2 % en 2025 a 63 % en 2050.
Estados Unidos	<p>Dentro de la Ley de Combustible de Aviación Sostenible-Ley de Cielos Sostenibles se establece un incentivo fiscal de hasta USD 2 por cada galón producido de CAS. Este proyecto de ley, presentado por la Casa Blanca, tiene como objetivo crear un programa de subvenciones de USD 1 000 000 000 durante cinco años para ampliar el número de instalaciones que producen CAS y construir la infraestructura de apoyo necesaria.</p> <p>El crédito fiscal de CAS, que forma parte de la agenda Reconstruir Mejor, ayudará a reducir costos y a ampliar rápidamente la producción nacional de estos combustibles. Requiere la reducción de al menos el 50 % de las emisiones de GEI del ciclo de vida y ofrece un mayor incentivo si se realizan reducciones mayores.</p> <p>Dentro de la Ley de Paridad de Combustible de Aviación Sostenible y Diésel Renovable de 2022 se exige a la Agencia Internacional de la Energía que: 1) brinde información acerca de la producción estadounidense y las importaciones extranjeras de diésel renovable y CAS, incluida la relativa al tipo, el origen y el volumen de las materias primas empleadas en la producción de estos combustibles; 2) permita que las instalaciones de producción de diésel renovable y CAS califiquen para recibir las garantías de préstamo del Título XVII del USDOE, en virtud de la Ley de Política Energética de 2005; y hacer que el diésel renovable exento cumpla con las mismas especificaciones técnicas del diésel a base de petróleo de la sección de etiquetado de la Ley de Seguridad e Independencia Energética de 2007.</p>
Canadá	La Norma sobre Combustibles Limpios obliga a los proveedores primarios de combustibles fósiles líquidos (es decir, a los productores e importadores) a reducir la intensidad de carbono de sus combustibles fósiles líquidos utilizados en Canadá a partir de los niveles de intensidad de carbono de 2016. En 2022 el requisito de reducción de la intensidad de carbono comenzará en 2.4 gCO <sub>2</sub> e/MJ y

	aumentará gradualmente hasta alcanzar 12 gCO <sub>2</sub> e/MJ en 2030. Para lograrlo, los productores de combustible deben brindar soluciones innovadoras y nuevas opciones de combustible a los consumidores.
Francia	Se estableció un hoja de ruta de CAS para alcanzar un suministro del 1 % en 2022, del 2 % en 2025 y del 5 % en 2030, con un enfoque en las materias primas avanzadas.
Alemania	En la legislación nacional para la reducción de emisiones de GEI de los combustibles (a fin de transponer la Segunda Directiva sobre Energías Renovables [RED II]) y la Estrategia Nacional de Hidrógeno se prevé el establecimiento de una subcuota energética relativa a los CAS del 2 % en 2030 solo para la PtL-queroseno.
Suecia	Se espera alcanzar la neutralidad en carbono en 2045. Se elaboró una propuesta legislativa de mandato de reducción de GEI del 0.8 % en 2021, que aumentaría gradualmente hasta llegar a 27 % en 2030.
Dinamarca	Se encuentra en estudio una obligación de mezcla de CAS.
Portugal	Se elaboró la Hoja de Ruta para la Neutralidad en Carbono, con un enfoque integrado para la descarbonización del transporte, incluida la aviación.
España	Se promulgó la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de Cambio Climático y Transición Energética, en la que se establece un 2 % de CAS como objetivo de suministro en 2025. Se está planificando el establecimiento de varias nuevas biorrefinerías y se hace hincapié en los desechos y residuos.
Países Bajos	Una hoja de ruta relativa a los CAS está en desarrollo, con un mandato combinado en los ámbitos nacional y de la UE. Se centra en el uso de materias primas avanzadas.
Finlandia	Se tiene la meta de alcanzar la neutralidad en carbono en 2035, para lo cual se estableció un aumento de la obligación de CAS para alcanzar el 30 % en 2030.
Brasil	Se formuló una propuesta para establecer un mandato de reducción de emisiones a través del uso de CAS a partir de enero de 2027. En este sentido, las emisiones de las aerolíneas de Brasil deberán disminuir el 1 % de las emisiones totales del sector en 2026, con la posibilidad de aumentar este porcentaje a 10 % mediante el uso directo de CAS.

Japón	Los funcionarios del Gobierno japonés están trabajando en planes para reducir las emisiones de carbono de las aerolíneas nacionales. Se espera que, para 2030, sus aviones funcionen con un 10 % de biocombustibles.
Nueva Zelanda	De conformidad con el Mandato de Biocombustibles Sostenibles, los proveedores deben reducir las emisiones de GEI de los combustibles para el transporte en un porcentaje que se define cada año. Esta obligación se aplica a todos los combustibles para el transporte, incluido el destinado a la aviación nacional. Asimismo, los biocombustibles deben cumplir con los criterios de sostenibilidad para garantizar que no tienen un impacto negativo en la producción de alimentos ni en la biodiversidad indígena. Para demostrar dicho cumplimiento, los proveedores de combustible deben preparar informes anuales. Habrá sanciones por incumplimiento, aunque existe cierta flexibilidad para los proveedores de combustible, incluida la capacidad para intercambiar reducciones de emisiones entre sí, que pueden diferir por dos años.
Columbia Británica, Canadá	Reglamento de requisitos de combustibles renovables y bajos en carbono. El Estándar de Combustibles bajos en Carbono de la Columbia Británica (BC-LCFS) establece objetivos de intensidad de carbono que disminuyen cada año. En la actualidad la ley no reconoce las reducciones de GEI en los sectores de combustibles marinos y de aviación, por lo que se está considerando expandir el BC-LCFS para incluir estas reducciones, brindar apoyo a los sectores de combustibles con bajas emisiones de carbono, así como desarrollar dos clases de combustible adicionales: para aviones y marino.

**Fuente:** Elaborado con base en OACI 2022.

## El caso de la UE

En 2009 se impulsó uno de los mayores instrumentos en materia de biocombustibles de la UE: la Directiva sobre Energías Renovables (RED) (UE 2009). En 2018 esta se modificó, haciendo un especial énfasis en los combustibles de aviación, lo que incentivó la utilización de combustibles renovables en los

sectores aéreo y marítimo por medio de la aplicación de un multiplicador de 1.2 a la contribución de dichos combustibles a la consecución de los objetivos de la Comunidad Europea (UE 2018).

Cabe destacar que a través de la RED no se regulan las actividades de las compañías productoras de biocombustibles, sino se les indica a los países miembros de la UE las políticas en materia de biocombustibles que deben aplicar para cumplir con los objetivos medioambientales establecidos. Es por ello que en la UE han proliferado normativas en torno a los biocombustibles, lo que permite el establecimiento de la demanda de este tipo de productos en el mercado.

La importancia de descarbonizar el sector del transporte en la UE radica en el cumplimiento de su objetivo estratégico de reforzar la identidad y la cooperación, permitiendo que su ciudadanía pueda viajar por la región de forma rápida y fluida. De hecho, este sector aporta 5 % al producto interno bruto europeo y brinda empleo a aproximadamente 10 millones de trabajadores (Comisión Europea 2020).

De acuerdo con el Parlamento Europeo (2021), la conectividad aérea constituye un pilar de la movilidad de la ciudadanía europea y propicia el desarrollo de las regiones y el crecimiento de la economía. Esta interrelación ha provocado que las emisiones de GEI del sector del transporte aumenten con el tiempo y representen una cuarta parte del total de la región. Esta dinámica insostenible ha despertado preocupaciones y presiones internacionales, por lo que la UE ha desarrollado políticas en materia de biocombustibles para disminuir las emisiones de carbono y la dependencia de las energías fósiles (USDA y GAIN 2022a).

Si bien la transición podría resultar un desafío, las oportunidades que ofrecen los biocombustibles son mayores, entre ellas, la modernización de las cadenas de valor de la industria europea, la reducción de disparidades, la creación de nuevos productos/servicios y, por tanto, la generación de nuevas fuentes de empleo. Llevar a término la transición permitiría ubicar a la región como líder global en la materia en la medida en que los demás Estados continúen avanzando hacia una movilidad sostenible.

La UE ha incorporado paulatinamente los combustibles avanzados en su legislación. En un principio se formó la RED, que fue ampliada mediante la RED II,

en la que se establece una política general para la producción y promoción de la energía derivada de biocombustibles avanzados. Además, el 14 de junio de 2018 esta fue reformulada para otorgar un límite de 7 % a los biocombustibles convencionales y establecer un objetivo creciente para los biocombustibles avanzados producidos con subproductos agrícolas y forestales de 0.2 % en 2022 y 3.5 % en 2030 (USDA y GAIN 2022a).

Cabe destacar que, de conformidad con la política de la UE, los combustibles avanzados son los derivados de los residuos de las materias primas previamente calificadas para tal fin, p. ej., el diésel renovable derivado de hidrogenación, antes conocido como HVO, el cual es un combustible directo que puede reemplazar de manera total al diésel fósil y, con algunas modificaciones, puede usarse como combustible para aviones (Comisión Europea 2020).

Existe una amplia posibilidad de que, con la RED II, los requisitos de la cadena de suministro libre de deforestación y los mandatos de combinación correspondientes a los combustibles de aviación sean modificados como resultado de la implementación del Pacto Verde Europeo (USDA y GAIN 2022a y 2022b).

En 2019 la Comisión Europea, uno de los órganos que conforman la estructura supranacional de la UE, presentó la iniciativa denominada Pacto Verde Europeo, que tiene como objetivo lograr que la UE alcance la neutralidad en carbono en 2050. Durante el período 2021-2022 se propusieron reformas legislativas para llevar a cabo esta iniciativa (USDA y GAIN 2022b). Cabe reconocer que, para que esta cumpla su objetivo, el mercado de los biocombustibles deberá disponer de un marco normativo que propicie y regule su incorporación como el reglamento RefuelEU Aviation.

Dicho pacto, en conjunto con la Ley Europea del Clima, está dirigido a cumplir el objetivo regional de reducir en 55 % las emisiones de GEI en 2030. Bajo este panorama normativo, la propuesta ReFuelEU Aviation resulta esencial para la aviación, ya que:

Pretende acelerar la producción, distribución y utilización de CAS, imponiendo a los proveedores de carburorreactores para aviones la obligación de suministrar una proporción cada vez mayor de combustible de aviación mezclado con CAS en todos los aeropuertos de la UE, y exigiendo a las compañías aéreas que

augmenten el uso de combustibles de aviación sostenibles en pasos graduales prefijados (CESE 2021:3).

Según el Comité Económico y Social Europeo (2021), esta propuesta de reglamento es fundamental para garantizar la sostenibilidad de la aviación, pero debe evitar efectos distorsionadores en el mercado de este sector.

De hecho, de acuerdo con el Parlamento Europeo (2021), los altos niveles de conectividad aérea de la UE tienen un mejor funcionamiento cuando el mercado del transporte aéreo permite un juego equitativo, donde todos los agentes del mercado pueden operar sobre la base de la igualdad de oportunidades. Las distorsiones del mercado pueden poner en desventaja a los operadores de aeronaves o aeropuertos frente a los competidores y esto puede resultar en una pérdida de competitividad de la industria. En este sentido, los efectos distorsionadores en el mercado no solo representarían afectaciones para la industria de la aviación, sino también una pérdida de conectividad empresarial y social para la ciudadanía europea.

Para poner en marcha el Pacto Verde Europeo y cumplir los objetivos climáticos de cara al 2030, en junio de 2020 la UE adoptó el Reglamento sobre Taxonomía, en el que las actividades económicas europeas se clasifican en tres categorías, según las condiciones generales que deben cumplir para calificar como ambientalmente sostenibles: 1) sostenibles, 2) de transición y 3) habilitadoras. Cabe mencionar que las actividades relativas a la bioenergía, en particular las asociadas con los biocombustibles cuya base se deriva de cultivos y biomasa forestal, son clasificados por la Comisión Europea como actividades sostenibles. Además, en 2021 se adoptó una taxonomía para inversiones ecológicas (USDA y GRAIN 2022a).

Se prevé que, debido al establecimiento de diferentes normativas, la producción de biocombustibles aéreos se verá reforzada por el impulso de la oferta y la demanda de CAS en la UE, especialmente los biocombustibles avanzados y electrocombustibles. Aunado a ello, según Airlines for Europe et al. (2021), cuanto más avance la industria de los biocombustibles en la región, mayores serán la producción de CAS y las reducciones de CO<sub>2</sub>. Además, habrá una disminución de sus costos.

En el ámbito de los biocombustibles para la aviación se enfrentan varios desafíos, como la dependencia del sector aéreo de los combustibles fósiles y lo infructuoso de los esfuerzos realizados hasta el momento. Sobre este segundo punto, en 2011 se lanzó la ruta de vuelo europeo de biocombustibles avanzados, cuyo objetivo era producir 2 500 000 000 l de biocombustibles sostenibles para el sector de la aviación civil de la UE en 2020; sin embargo, dos años antes se determinó que el avance logrado era escaso, en comparación con la meta prevista (USDA y GAIN 2022a). Se estima que esta situación se debió a tres necesidades puntuales:

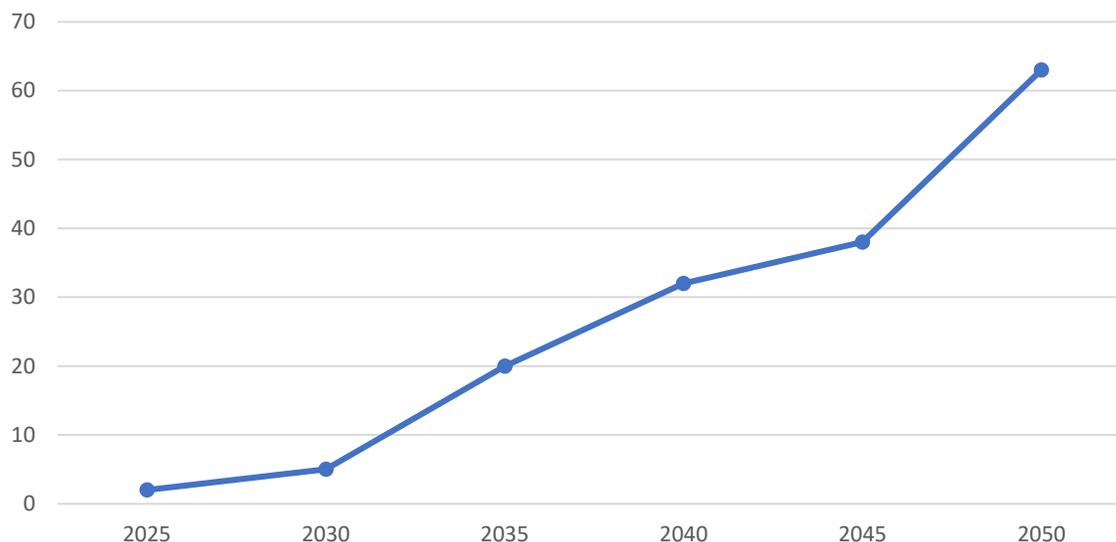
- Una inversión para ampliar la producción a escala comercial,
- La armonización de las políticas de biocombustibles en los Estados Miembros y
- La instalación de un número mayor de plantas de biocombustibles.

Con respecto a este último punto, se hace especial énfasis en el establecimiento de contratos de compra de biocombustibles a mediano y largo plazos; p. ej., se destaca que la empresa SkyNRG tiene un acuerdo de compra para entregar biocombustibles de aviación a Royal Dutch Airlines durante diez años. Además, SkyNRG, en cooperación con Lanzatech, planea construir una planta de etanol a partir de desechos para su uso como biocombustible de aviación. La planta producirá aproximadamente 38 000 000 l/año y se espera que entre en funcionamiento en 2024 (USDA y GAIN 2022a).

Desde 2019 la UE ha aumentado su producción de biocombustibles en general y, aunque sufrió un decrecimiento provocado por la crisis sanitaria del COVID-19, el consumo de bioetanol y biodiésel disminuyó en un porcentaje menor que el de combustibles fósiles, según los lineamientos establecidos en la estrategia de movilidad y el Pacto Verde Europeo, en el marco de los cuales en 2035 se pretende disponer de aviones que generen cero emisiones y, en 2050, reducir el 90 % de las emisiones del sector del transporte (Comisión Europea 2020, USDA y GAIN 2022a).

En el siguiente gráfico se muestra que en 2050 los biocombustibles de aviación constituirán el 63 % del total de combustibles aéreos utilizados por la UE, lo que refleja una clara transición hacia el uso de energías limpias.

**Gráfico 31.** Consumo porcentual esperado de CAS para cumplir las metas de descarbonización de la UE (% como total del combustible de aviación consumido).



**Fuente:** Elaborado con base en Comisión Europea 2021.

Ahora bien, aunque como bloque la UE ha desarrollado diferentes acuerdos y estrategias regionales, algunos de sus Estados Miembros llevan la delantera; p. ej., Noruega y Suecia dictaron una legislación en apoyo a la producción y uso de los biocombustibles sostenibles para aviación, Francia está discutiendo un mandato al respecto para su introducción en el corto plazo y Alemania, los Países Bajos y España han celebrado debates acerca de las leyes en esta materia (Torroba 2021).

De hecho, Suecia se destaca por ser un país líder en la aviación sostenible, ya que tuvo como objetivo introducir en 2021 un mandato de reducción de emisiones de GEI en el combustible de aviación. Al respecto, se había indicado que “El nivel de reducción será de 0.8 % en 2021 y aumentará gradualmente hasta llegar a 27 % en 2030” (Biofuels International, citado por Torroba 2021:89).

No obstante, se considera que, debido a los esfuerzos de la UE como bloque, sus Estados Miembros han avanzado de forma individual en la temática. Gracias a la RED II se han establecido o se prevé establecer normativas ambiciosas; p. ej., tanto Noruega como Finlandia esperan que en 2030 el 30 % del combustible aéreo empleado sea CAS, los Países Bajos, el 14 %, y Francia, el 5 %.

Por medio de esta normativa se espera que los vuelos provenientes de todos los Estados Miembros de la UE se lleven a cabo con combustibles mezclados con CAS y que la proporción de CAS aumente hasta representar el 63 % del combustible total en 2050.

Estas situaciones sobrepasan la capacidad de acción de cada Estado per se. Se debe optar por sistemas de gobernanza global para regular los desafíos actuales debido a que 1) lo local no puede controlar lo global de manera autónoma y 2) los Estados no son la única fuente de autoridad y poder.

De acuerdo con Galpin y Mehr (2019), la industria aérea en la UE “Genera más del 2 % de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono y más del 3 % de las emisiones de gases de efecto invernadero”, motivo por el cual algunos Estados Miembros formularon políticas públicas para gravar con un impuesto a los vuelos que salen de su territorio. En Francia se le llamó impuesto ecológico y equivale a 7 %.

En este sentido, la política pública ejecutada por Francia no es significativa; no obstante, si el impuesto se aplica uniformemente en todos los países, habría un efecto positivo en el medioambiente y en la reconfiguración de la industria aeronáutica, al incentivar la implementación de nuevos combustibles como los CAS.

Empero, cada país posee intereses, valores e ideas a los que puede apelar con respecto a la implementación de tal impuesto, debido a lo cual su gestión se fundamenta en instituciones internacionales con legitimidad en la materia como la OACI, que regulan bienes públicos globales como el medioambiente. Esta realidad es parte de una gobernanza global en la que las instituciones internacionales, los Estados, las sociedades y los demás actores multilaterales pueden homologar sus políticas hacia agendas comunes.

Esta situación demuestra la importancia de aplicar medidas conjuntas en los planos regional y global con respecto a una actividad que trasciende las fronteras. Utilizar las bases de la gobernanza global permite a los Estados en general implementar políticas públicas que posibiliten una homogeneidad normativa y que eviten que intereses específicos se antepongan a las necesidades ecosistémicas. Es menester recalcar que los avances normativos en la industria de la aviación surgen en el contexto de la Convención Marco de

las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Acuerdo de París y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible; sin embargo, si los Gobiernos se alejan de estos postulados e implementan normativas para regular la aviación a través de las MBM, se produciría una duplicación de esfuerzos estatales/regionales, lo que puede afectar directamente su eficacia y eficiencia. Tal apreciación es compartida por la OACI, que propuso una alianza mundial entre los Gobiernos, el sector privado y la sociedad civil que dio origen al CORSIA, la única medida en materia de mercado mundial que se aplicará a las emisiones de CO<sub>2</sub> de la aviación internacional, a fin de evitar un mosaico de MBM y de garantizar que las emisiones de CO<sub>2</sub> de la aviación internacional se contabilicen una sola vez (OACI 2019a).

En síntesis, las demandas supranacionales pueden llegar a materializarse mediante normativas en forma de acuerdos, convenios u otros instrumentos del derecho internacional, complementadas con políticas nacionales o regionales en las que se establezcan medidas para contribuir al cumplimiento de dichas normativas. Un claro ejemplo de ello ha sido el CORSIA, en el que se muestran las preocupaciones mundiales por el alto nivel de CO<sub>2</sub> generado por el sector del transporte y que ha sido complementado con políticas nacionales y regionales como el Nuevo Pacto Verde de Estados Unidos y el Pacto Verde de la UE.

## Políticas públicas en América Latina

De acuerdo con la OACI (2017), América Latina y el Caribe (ALC) se ha caracterizado por llevar a cabo diferentes iniciativas en materia de biocombustibles alternativos para la aviación; no obstante, carece de políticas públicas o marcos estratégicos específicos sobre el tema, por lo que, retomando la premisa de gobernanza global, la OACI ha propuesto gestionar un intercambio de ideas y experiencias para desarrollar de forma concreta políticas públicas en esta materia en la región.

En este sentido, la institucionalidad de ALC se fundamenta en la creación de tratados, convenios interinstitucionales e intersectoriales y la investigación pública y privada; sin embargo, se requiere un instrumento para promover la organización de los actores públicos y privados, a fin de estructurar una cadena productiva de biocombustibles aéreos.

## Casos específicos

**Tabla 10.** Acciones en materia normativa realizadas en ALC.

País	Acciones
Argentina	Se promovió la asociación interinstitucional e intersectorial por medio del Convenio Marco de Cooperación Técnica para el Desarrollo de Biocombustible Aeronáutico, lo que posibilita la participación de instituciones públicas y privadas. El principal objetivo de dicho convenio fue analizar la viabilidad económica y de sostenibilidad de un proyecto de biocombustible aeronáutico en el ámbito nacional. Se incorporó como un elemento de análisis un programa de incentivos para pequeños y medianos productores relacionado con mecanismos de financiamiento.
República Dominicana	A través del Instituto Dominicano de Aviación Civil se estableció una hoja de ruta interinstitucional sobre el uso y la producción de combustibles alternativos para la aviación.
Bolivia	Se realizaron inversiones en plantas piloto para la experimentación sobre biocombustibles como el biodiésel a partir de soja, palmera negra, piñón ( <i>Jatropha</i> ) y ricino ( <i>Ricinus comunis</i> ), así como para su producción.
México	<p>Se han efectuado investigaciones en materia de cultivos agrícolas con potencial para la producción de biocombustibles (<i>higuerilla</i> y <i>Jatropha</i>) y se han instrumentado esquemas en apoyo a los productores agrícolas que abastecen la nascente industria de los combustibles alternativos mediante paquetes tecnológicos para la producción de insumos bioenergéticos y su incorporación en la cadena de valor, lo que propicia su participación como socios en esta rama de la agroindustria.</p> <p>A inicios de la primera década del siglo XXI se realizaron diagnósticos y mapeos de rutas para los combustibles alternativos de aviación, así como vuelos comerciales y de demostración usando este tipo de biocombustibles. Se empezó a operar el Clúster de Bioturbosina (programa de investigación interinstitucional), cuyo objetivo es establecer con solidez la industria de biocombustibles aéreos en el país por medio de diversas fuentes de biomasa, la construcción de dos plantas de producción, el desarrollo de capacidades para asegurar la sostenibilidad a lo largo de la cadena de suministro y la generación de información y modelos que contribuyan a la viabilidad económica de los combustibles alternativos.</p>

**Fuente:** Elaborado con base en OACI 2017.

### **Algunas consideraciones para la formulación de políticas públicas de CAS**

De acuerdo con Fernandes (2020), para impulsar la instauración de los CAS los Estados Miembros deben desarrollar políticas públicas en la materia, principalmente porque han prevalecido aquellas que favorecen a los combustibles renovables terrestres sobre los de aviación; por lo tanto, resulta esencial equiparar los niveles establecidos de producción de CAS con los de otros combustibles renovables.

Aunque el CORSIA constituye un mecanismo para incentivar la producción en el largo plazo, podría resultar insuficiente para acreditar todos los beneficios del ciclo de vida completo del CAS; por consiguiente, se deben considerar políticas específicas de CAS con nuevos incentivos no solo para su producción, sino también para su consumo. La formulación correcta de las políticas públicas permite el desarrollo de la industria, debido a que impulsan el uso constante, creciente y generalizado de CAS.

La OACI et al. (2018) brindan consideraciones por tomar en cuenta con respecto a la creación y la puesta en marcha de un programa o normativas/políticas públicas en materia de combustibles de aviación.

En primera instancia, se debe hacer un inventario para determinar la disponibilidad y cantidad de materias primas requerida para la producción de CAS, considerando los costos de recolección y recuperación de residuos grasos y lignocelulosa. Posteriormente, se requiere mapear tanto las materias primas potenciales por cultivar rentablemente en el Estado, así como los terrenos, los actores involucrados e incluso las restricciones para su desarrollo. Además, se deben considerar la infraestructura y el costo de producción estimado con respecto a las materias primas consideradas en el inventario y las potenciales, así como seleccionar materias primas competitivas, tomando en cuenta la madurez de la tecnología disponible, el nivel de desempeño y la disponibilidad local de equipos, servicios, capacidades de mantenimiento y soporte en general.

En segunda instancia, se deben evaluar las vías de producción factibles para procesar estas materias primas, a través de un estudio de prefactibilidad de una planta agroindustrial que considere los costos reales y previstos y el desempeño. Además, se debe definir la inversión requerida para evaluar el costo final de producción.

En tercer lugar, se debe hacer una previsión de la demanda de CAS en dos vías: primero, en términos del mercado local, analizando la logística de transporte, precios, costos y operadores, entre otros elementos y, segundo, en términos del mercado potencial en países vecinos y una eventual entrada en el mercado global en el corto, el mediano y el largo plazos.

En cuarta instancia, se debe desarrollar una evaluación integrada de la posible oferta y demanda de CAS, mediante la creación y evaluación de escenarios de producción que consideren su uso, comercio y producción, así como la demanda de materia prima, etc. También se deben considerar escenarios alternativos de combustibles convencionales y costos de CAS y buscar mecanismos que mejoren su competitividad económica y estimulen su producción, p. ej., ajustes en el régimen tributario de combustibles de aviación y la inclusión de mandatos, incentivos fiscales, subvenciones, impuestos al carbono y objetivos de reducción de fósiles.

En quinto lugar, se requiere considerar los recursos humanos disponibles para realizar las acciones anteriores, así como para ejecutar un programa dirigido a fomentar de forma permanente la IyD en materia de CAS y, por último, formular estrategias de difusión y comunicación para informarle al público lo que se realiza dentro del programa.

Finalmente, de acuerdo con Fernandes (2020), los programas o las normativas/políticas públicas se deben basar en los rendimientos y la provisión de apoyo a largo plazo.

**Fuente:** Elaborado con base en OACI et al. 2018 y Fernandes 2020.

En conclusión, ALC se posiciona como una región con un gran potencial para crear institucionalidad y promover políticas públicas para la producción y el consumo de *biojet* en particular y de CAS en general.

## Anexos

Según las bases de datos del Marco Mundial para los Combustibles Alternativos de la Aviación, desde 2006 hasta finales de 2014 se pusieron en marcha más de 83 iniciativas de múltiples actores para avanzar en el desarrollo de los combustibles de aviación sostenibles (CAS). Estas estuvieron dirigidas a la investigación, la evaluación de posibilidades de producción, el establecimiento de cadenas de valor y de redes y la coordinación entre los actores nacionales.

Estas numerosas iniciativas demuestran un creciente interés y un mayor compromiso de muchos Estados, industrias y organizaciones en materia de carburantes sostenibles para reactores. Además, ponen de manifiesto los numerosos retos a los que se enfrenta el mercado comercial de los CAS, lo que refleja la necesidad permanente de llevar a cabo este tipo de actividades.

### **Anexo 1.** Cadena de produ. nórdica de combustible de aviación sostenible (CAS).

Nombre de la iniciativa	Descripción	Socios
<p>Consejo Nórdico de Ministros 2016. Perspectivas nórdicas sobre el uso de combustible sostenible avanzado en la aviación</p>	<p>Diversos actores establecieron una asociación dirigida a facilitar el desarrollo y la adopción de CAS en la región, por medio de actores de toda la cadena de suministro, investigadores, agricultores, proveedores de tecnología, inversores, entidades reguladoras, productores y proveedores de petróleo para encontrar las mejores y más eficientes soluciones energéticas.</p>	<p>Compañías aéreas (Scandinavian Airlines System [SAS], Finnair, Norwegian Air Shuttle, Icelandair, Air Greenland, Malmo Aviation y Atlantic Airways), aeropuertos (Copenhagen Airports, Swedavia, Avinor, Finavia e Isavia), autoridades de transporte de Dinamarca, Suecia y Finlandia, así como Airbus y Boeing, y organizaciones (Brancheforeningen Dansk Luftfart, Svenskt Flyg, Svenska Flyg-Branschen, NHO Luftfart y</p>

		la Asociación Internacional de Transporte Aéreo)
Noruega 2015. Gardermoen Biohub	Gardermoen Biohub es un proyecto efectuado en colaboración cuyo objetivo es suministrar CAS en el aeropuerto de Gardermoen (Noruega). El biocombustible es producido por Neste y suministrado desde la principal granja de combustible de Gardermoen. Se puso en marcha el 22 de enero de 2016. Es la primera vez que se suministra CAS a través de la infraestructura aeroportuaria disponible.	SkyNRG Nordic, Avinor, Statoil, SAS, Royal Dutch Airlines (KLM), Lufthansa, Neste y Air BP
UE 2011. Ruta Europea de Biocombustibles Avanzados (EUABF)	Se trata de una iniciativa de la Comisión Europea, ejecutada en colaboración con Airbus y productores de combustible alternativo para aviones. Su objetivo para 2020 era utilizar 2 000 000 t de biocombustibles de aviación al año en el sector de la aviación civil de la UE, mediante la identificación de vías y acciones para establecer la producción en la UE.	Comisión Europea, Airbus, Airfrance, KLM, Biomass Technology Group, British Airways, Lufthansa, Neste Oil y Honeywell UOP
UE 2012. Iniciativa hacia el queroseno sostenible para la aviación (ITAKA)	Este proyecto de investigación tiene como objetivo apoyar el desarrollo de CAS en Europa, en particular para cumplir los objetivos a corto plazo de la EUABF. Se centra en la camelina, plantada como cultivo de rotación en regiones áridas (sin impactos del cambio directo o indirecto del uso del suelo), la cual es la materia prima más	Comisión Europea, Servicios y Estudios para la Navegación Aérea y la Seguridad Aeronáutica, Airbus Group, École Polytechnique Federale de Lausanne, Embraer, Universidad Metropolitana de Manchester, Neste y SkyNRG

	<p>prometedora que se puede cultivar y procesar oportunamente en la UE. En la actualidad existen grandes plantaciones en España y Rumanía y se ha iniciado su producción de prueba para generar biocombustibles.</p> <p>De hecho, como parte de la iniciativa ITAKA, Neste está produciendo 4000 t de biocombustible sostenible para aviones a base de camelina española.</p>	
<p>Alemania 2011. Iniciativa de Aviación para las Energías Renovables en Alemania (AIREG)</p>	<p>AIREG es una iniciativa alemana conformada por representantes de las industrias petrolera y de la aviación, instituciones de investigación y otros socios que actúan para apoyar el desarrollo de biocombustibles sostenibles para aviones.</p> <p>Entre sus logros a la fecha se incluyen la publicación de una estrategia para una aviación respetuosa con el clima en Alemania, el trabajo continuo para alcanzar el objetivo de uso de 10 % de combustibles alternativos en 2025 y la firma de un acuerdo bilateral entre Estados Unidos y Alemania para el desarrollo de combustibles sostenibles.</p>	
<p>Países Bajos 2013. Bioport Holland</p>	<p>Varios representantes de la industria de la aviación y del combustible alternativo para aviones de los Países Bajos, así como de las instituciones</p>	<p>KLM, SkyNRG, el aeropuerto de Schiphol, Neste Oil, el puerto de Rotterdam, el secretario de Estado de Infraestructuras y Medio</p>

	<p>gubernamentales interesadas en la materia conformaron un grupo de acción para impulsar el desarrollo de biocombustibles sostenibles para aviones. Así surgió Bioport Holland, que trabaja para fortalecer el mercado de CAS y asegurar una producción continua para Europa por medio de la creación de una demanda a largo plazo, nuevas tecnologías de conversión y una producción con precios competitivos.</p>	<p>Ambiente y el ministro de Economía de los Países Bajos</p>
<p>Estados Unidos 2012. Iniciativa de Biocombustibles Sostenibles para la Aviación del Medio Oeste (MASBI)</p>	<p>La MASBI fue una organización de actores de la industria del biocombustible sostenible para aviones, cuyo objetivo fue lograr avances en la materia en 12 Estados del Medio Oeste. Se centró en la evaluación del potencial de los biocombustibles de la región, en particular en la materia prima, la tecnología y la comercialización, además de la elaboración de un plan en respaldo al desarrollo regional de los biocombustibles. La evaluación de este proyecto concluyó en junio de 2013 con el informe intitulado Fomentando un futuro sostenible para la aviación.</p>	<p>Sus socios han sido: United Airlines, Boeing, UOP de Honeywell, el Departamento de Aviación de Chicago y el Clean Energy Trust, US. Departamento de Agricultura, Departamento de la Marina de los Estados Unidos.</p>
<p>Reino Unido 2006. Grupo de Aviación Sostenible (SA)</p>	<p>Este grupo industrial intersectorial del Reino Unido está constituido por aerolíneas, aeropuertos, fabricantes y otras organizaciones que trabajan en favor de una estrategia nacional</p>	<p>Asociación de Operadores Aeroportuarios, ADS Group Limited, Airbus, Bata Boeing, British Airways, NATS y Virgin Atlantic</p>

	<p>largoplacista de aviación sostenible. El SA facilita iniciativas de investigación y ha realizado una serie de publicaciones, como una hoja de ruta hacia la adopción del 30 % de combustibles alternativos sostenibles en la aviación en 2050, además de informes anuales de avance en el uso de combustibles sostenibles para aviones en el país.</p>	
<p>Estados Unidos 2006. Iniciativa de Combustibles Alternativos para la Aviación Comercial (CAAFI)</p>	<p>La CAAFI es una coalición estadounidense formada por una amplia gama de representantes de compañías aéreas, la industria de la aviación, productores de combustibles y numerosas organizaciones y actores no patrocinadores, con el objetivo de promover el desarrollo de un biocombustible alternativo para aviones comercialmente viable. Esta organización es neutral desde el punto de vista de las materias primas y la tecnología. Sus esfuerzos están dirigidos a las cuatro áreas de certificación de combustible: la IyD, el medioambiente, los negocios y la economía. Entre sus principales logros se incluyen la colaboración con ASTM International para la aprobación de la vías de producción de queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch en 2009, queroseno parafínico sintético de ésteres y ácidos grasos</p>	<p>La Administración Federal de Aviación, Airlines for America, el Consejo Internacional de Aeropuertos y la Asociación de Industrias Aeroespaciales</p>

	<p>hidroprocesados en 2011, isoparafinas sintéticas en 2014 y queroseno parafínico sintético a base de alcohol para reactores y queroseno parafínico sintético Fischer-Tropsch con aromáticos derivados de la alquilación de aromáticos ligeros de fuentes distintas del petróleo en 2015. Además, desarrolló una herramienta para evaluar el nivel de preparación de los combustibles y sus materias primas.</p>	
<p>Emiratos Árabes Unidos 2014. <i>Biojet</i> Abu Dhabi (BAD)</p>	<p>BAD es una iniciativa para determinar cómo un consorcio de actores de la cadena de biocombustible de aviación puede establecer una cadena de suministro de biocombustibles en los Emiratos Árabes Unidos. Dentro de ella se elaboró el informe <i>Biojet</i> Abu Dhabi: flight path to sustainability, the roadmap, en el que se identifican posibles materias primas, vías tecnológicas y recomendaciones para desarrollar una cadena de suministro.</p>	<p>Etihad Airways, Boeing, Takreer, TOTAL y el Instituto Masdaar</p>
<p>Japón 2014. Iniciativa para la próxima generación de combustibles de aviación (INAF)</p>	<p>La INAF es un grupo de acción formado por aerolíneas japonesas, universidades, industrias petroleras y otras organizaciones con el objetivo de desarrollar un combustible comercial sostenible para aviones para su uso durante los Juegos Olímpicos de Tokio en 2020. En el marco de esta</p>	<p>Universidad de Tokio, Boeing, Japan Airlines, Nippon Cargo Airlines, Nippon Airway, aeropuerto internacional de Narita, Japan Petroleum Exploration</p>

	<p>iniciativa se elaboró una hoja de ruta para establecer una cadena de suministro en Japón.</p>	
<p>Brasil 2012. Plataforma Brasileña de Biocombustibles de Aviación (BBP)</p>	<p>La BBP es una plataforma de colaboración entre distintos actores cuyo fin es promover una mayor implementación de la IyD en torno al biocombustible de aviación y desarrollar una cadena de valor, basada en un suministro de múltiples materias primas (macauba, Jatropha, camelina, aceites y grasas residuales). Estableció una interfaz con el sector privado para la firma del Acuerdo Bilateral de Biocombustible entre Estados Unidos y Brasil y en 2014 lanzó el programa de compensación de la huella de carbono Flying Green.</p>	

**Fuente:** Nordic Council of Ministers 2016.

## Referencias bibliográficas

AFDC (Centro de Datos sobre Combustibles Alternativos, Estados Unidos de América). 2021. Renewable hydrocarbon biofuels (en línea). Consultado 23 jul. 2021. Disponible en [https://afdc.energy.gov/fuels/emerging\\_hydrocarbon.html](https://afdc.energy.gov/fuels/emerging_hydrocarbon.html).

AIE (Agencia Internacional de la Energía, Francia). 2021. Aviation (en línea). París. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.iea.org/reports/aviation>.

Airlines for Europe (A4E). 2022. The Fit for 55 Package: Summary of the positions of Airlines for Europe (A4E). A4E, Bruselas. ARA (Applied Research Associates Inc., Estados Unidos de América). 2021. Readijet: ARA's history-making sustainable aviation fuel (SAF) technology (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.ara.com/products/readijet/>.

Bann, SJ; Malina, R; Staples, MD; Suresh, P; Pearlson, M; Tyner, WE; Hileman, JI; Barret, S. 2017. The costs of production of alternative jet fuel: a harmonized stochastic assessment (en línea). Bioresource Technology 227:179-187. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.032>.

Brown, A; Waldheim, L; Landälv, I; Saddler, J; Ebadian, M; McMillan, JD; Bonomi, A; Klein, B. 2020. Advanced biofuels: potential for cost reduction (en línea). París, Francia, IEA Bioenergy. 88 p. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41\\_CostReductionBiofuels-11\\_02\\_19-final.pdf](http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_CostReductionBiofuels-11_02_19-final.pdf).

CAAFI (Iniciativa de Combustibles Alternativos para la Aviación Comercial, Estados Unidos de América). 2010. Fuel readiness level (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [www.caafi.org/information/fuelreadinesstools.html](http://www.caafi.org/information/fuelreadinesstools.html).

Cabrera, E.; de Sousa, J.M.M. 2022. Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review. Energies 2022,15, 2440. <https://doi.org/10.3390/en15072440>

CESE (Comité Económico y Social Europeo, Bélgica). 2021. ReFuelEU Aviation (en línea). Bruselas. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.eesc.europa.eu/es/our-work/opinions-information-reports/opinions/refueleu-aviation>.

Comisión Europea. 2020. Estrategia de movilidad sostenible e inteligente: encauzar el transporte europeo de cara al futuro (en línea). Bruselas, Bélgica. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0009.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_1&format=PDF).

Comisión Europea. 2021. Directorate-General for Mobility and Transport, Tsiropoulos, I., Humphris-Bach, A., Statharas, S., et al., Study supporting the impact assessment of the ReFuelEU Aviation initiative: final report. Disponible en <https://data.europa.eu/doi/10.2832/219963>

Constantinesco, L. 1995. La supranacionalidad de las comunidades europeas. In Anuario Uruguayo de Derecho Internacional 14:1955-1956.

de Jong, S; Hoefnagels, R; Faaij, A; Slade, R; Mawhood, R; Junginger, M. 2015. The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels: a comprehensive techno-economic comparison (en línea). *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 9(6):778-800. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1002/bbb.1613>.

de Jong, S; Hoefnagels, R; Wetterlund, E; Pettersson, K; Faaij, A; Junginger, M. 2017. Cost optimization of biofuel production: the impact of scale, integration, transport and supply chain configurations (en línea). *Applied Energy* 195:1055-1070. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.109>.

Diederichs, GW; Mandegari, MA; Farzad, S; Görgens, JF. 2016. Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice (en línea). *Bioresource Technology* 216:331-339. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.090>.

Duvelleroy, M. 2021. First A319neo flight with 100% sustainable aviation fuel (en línea). Toulouse, Francia, Airbus. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-first-a319neo-flight-with-100-sustainable-aviation-fuel>.

Escalante E; Ramos L; Rodriguez Coronado J; de Carvalho Júnior A. 2022. Evaluation of the potential feedstock for biojet fuel production: Focus in the Brazilian context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 153, 2022, 111716, ISSN 1364-0321. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111716>

FEM (Foro Económico Mundial, Suiza). 2020. Clean skies for tomorrow: sustainable aviation fuels as a pathway to net-zero aviation (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://www.weforum.org/docs/WEF\\_Clean\\_Skies\\_Tomorrow\\_SAF\\_Analytics\\_2020.pdf](https://www.weforum.org/docs/WEF_Clean_Skies_Tomorrow_SAF_Analytics_2020.pdf).

Fernandes, N. 2020. Aviation CO<sub>2</sub> reductions (en línea). In ICAO Stocktaking Seminar 2020: Technology, Operations, Sustainable Aviation Fuels (1, 2020, Estados Unidos de América). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.icao.int/Meetings/Stocktaking2020/Documents/ICAO%20Stocktaking%202020%20-%203.4.9%20-%20Neville%20Fernandes.pdf>.

Galpin, D; Mehr, F. 2019. Aviation taxes and their role in managing aviation's carbon footprint (en línea). Reino Unido, ICF. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.icf.com/insights/transportation/aviation-carbon-footprint>.

Geleynse, S; Brandt, K; García-Pérez, M; Wolcott, M; Zhang, X. 2018. The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-in biofuels: techno-economic evaluation (en línea). ChemSusChem 11(21):3728-3741. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1002/cssc.201801690>.

Giannelos, G; Humphris-Bach, A; Davies, A; Baxter, B; Cames, M; Kasten, P; Siskos, P; Tsiropoulos, I; Kalokyris, T; Statharas, S. 2021. Study supporting the impact assessment of the ReFuelEU Aviation initiative: final report (en línea). Bruselas, Bélgica, Comisión Europea. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/46892bd0-0b95-11ec-adb1-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-231440814>.

Gobierno Federal de los Estados Unidos. 2019. H. RES. 109, Recognizing the duty of the Federal Government to create a Green New Deal (en línea). Authenticated U.S. Government Information. 7 feb. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.congress.gov/116/bills/hres109/BILLS-116hres109ih.pdf>.

Gössling, S; Humpe, A. 2020. The global scale, distribution and growth of aviation: implications for climate change (en línea). Global Environmental Change 65. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>.

Hagen, L. 2022. Biden reframes economic agenda to “building a better America” (en línea). U.S. News & World Report, Washington D. C., Estados Unidos de América; 1 mar. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.usnews.com/news/politics/articles/2022-03-01/biden-reframes-economic-agenda-to-building-a-better-america>.

Hollinger, P. 2020. Airlines ask passengers to subsidise green fuel to help cut emissions (en línea). Financial Times, Estados Unidos de América. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [www.ft.com/content/686a8cde-cd1a-4612-97f6-f83be5b3369b](http://www.ft.com/content/686a8cde-cd1a-4612-97f6-f83be5b3369b).

IATA (Asociación de Transporte Aéreo Internacional, Canadá). 2015a. IATA sustainable aviation fuel roadmap (en línea). Montreal. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/safr-1-2015.pdf>.

IATA (Asociación de Transporte Aéreo Internacional, Canadá). 2015b. IATA 2015 report on alternative fuels (en línea). Montreal. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.iata.org/contentassets/462587e388e749eeb040df4dfdf02cb1/2015-report-alternative-fuels.pdf>.

IATA (Asociación de Transporte Aéreo Internacional, Canadá). 2019. Fact sheet 2: sustainable aviation fuel: technical certification (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>.

IATA (Asociación de Transporte Aéreo Internacional, Canadá). 2022a. Combustibles de Aviación Sostenibles. En Taller de Capacitación (1, 2022, Quito, Ecuador). Disponible en <https://onedrive.live.com/?authkey=%21AAoahL8cyKfsYaw&id=AC45D82769E15431%21117&cid=AC45D82769E15431&parId=root&parQt=sharedby&parCid=B456D87311AFD97D&o=OneUp>

IATA (Asociación de Transporte Aéreo Internacional, Canadá). 2023. Jet fuel price monitor (en línea). Montreal. Consultado 22 feb. 2023. Disponible en <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>.

Impulsado con novedoso biocombustible, lanzarán el cohete espacial más sostenible de la historia (en línea). 2021. Bioeconomía, Buenos Aires, Argentina; 22 oct. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.bioeconomia.info/2021/10/22/impulsado-con-novedoso-biocombustible-lanzaran-el-cohete-espacial-mas-sostenible-de-la-historia/>.

IEA Bioenergy. 2021. Progress in commercialization of biojet/sustainable aviation fuels (SAF): technologies, potential and challenges (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>.

IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables, Emiratos Árabes Unidos). 2021. Reaching zero with renewables: biojet fuels (en línea). Abu Dabi. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA\\_Reaching\\_Zero\\_Biojet\\_Fuels\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_Reaching_Zero_Biojet_Fuels_2021.pdf).

Jones, S; Meyer, P; Snowden-Swan, L; Padmaperuma, A; Tan, E; Dutta, A; Jacobson, J; Cafferty, K. 2013. Process design and economics for the conversion of lignocellulosic biomass to hydrocarbon fuels: fast pyrolysis and hydrotreating bio-oil pathway (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61178.pdf>.

Karatzos, S; McMillan, JD; Saddler, JN. 2014. The potential and challenges of drop-in biofuels (en línea). París, Francia, IEA Bioenergy. Consultado 8 jul. 2022. Disponible en <https://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2014/01/Task-39-Drop-in-Biofuels-Report-FINAL-2-Oct-2014-ecopy.pdf>.

La Casa Blanca. 2021. Fact sheet: Biden administration advances the future of sustainable fuels in American aviation (en línea). Washington D. C., Estados Unidos de América. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements->

[releases/2021/09/09/fact-sheet-biden-administration-advances-the-future-of-sustainable-fuels-in-american-aviation/](https://www.eia.gov/press/releases/2021/09/09/fact-sheet-biden-administration-advances-the-future-of-sustainable-fuels-in-american-aviation/).

LeViness, S; Deshmukh, SR; Richard, LA; Robota, HJ. 2014. Velocys Fischer-Tropsch synthesis technology: new advances on state-of-the-art (en línea). Topics in Catalysis 57:518–525. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11244-013-0208-x>.

Malins, C; Sandford, C. 2022. Los biocombustibles para aviación en el Estado español (en línea). s. l., Ecologistas en Acción. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2022/01/informe-biocombustibles-aviacion.pdf>.

Marker, TL. 2005. Opportunities for biorenewables in oil refineries (en línea). Estados Unidos de América, USDOE. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.osti.gov/biblio/861458>.

McGarvey, E; Tyner, WE. 2018. A stochastic techno-economic analysis of the catalytic hydrothermolysis aviation biofuel technology (en línea). Biofuels, Bioproducts & Biorefining 12(3):474-484. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.1863>.

Neuling, U; Kaltschmitt, M. 2015. Conversion routes for production of biokerosene: status and assessment (en línea). Biomass Conversion & Biorefinery 5:367–385. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-014-0154-2>.

Neuling, U; Kaltschmitt, M. 2018. Techno-economic and environmental analysis of aviation biofuels (en línea). Fuel Processing Technology 171:54–69. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.09.022>.

Nordic Council of Ministers. 2016. Sustainable jet fuel for aviation: Nordic perspectives on the use of advanced sustainable jet fuel for aviation. Nordic Council of Ministers, Dinamarca. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2016/09/FULLTEXT\\_Sustainable\\_Jet\\_Fuel\\_for\\_Aviation.pdf](http://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2016/09/FULLTEXT_Sustainable_Jet_Fuel_for_Aviation.pdf).

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2013. Informe anual del Consejo 2010 (en línea). Consultado 23 jul. 2021. Disponible en [https://www.icao.int/publications/Documents/9952\\_es.pdf](https://www.icao.int/publications/Documents/9952_es.pdf).

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2017. Nota de estudio (en línea). Conferencia sobre la Aviación y los Combustibles Alternativos (1, 2017, Ciudad de México, México). 6 p. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.icao.int/Meetings/CAAF2/Documents/CAAF.2.WP.029.1.es.pdf>.

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2019a. CORSIA eligible fuels: life cycle assessment methodology (en línea). Consultado 17 nov. 2022. Disponible en [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document\\_CORSIA%20Eligible%20Fuels\\_LCA%20Methodology.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA%20Methodology.pdf).

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2019b. CORSIA sustainability criteria for CORSIA eligible fuels (en línea). Consultado 17 nov. 2022. Disponible en <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria.pdf>.

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2019c. Resolution A40-19: consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection - Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution\\_A40-19\\_CORSIA.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution_A40-19_CORSIA.pdf).

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2021a. Chapter six: climate change mitigation: CORSIA (en línea). 250 p. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202019\\_Chapter%206.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202019_Chapter%206.pdf).

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2021b. Conversion processes (en línea). Consultado 15 nov. 2022. Disponible en <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>.

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2022. Environmental policies on aviation fuels (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Polices.aspx>.

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Estados Unidos de América); FMAM (Fondo para el Medio Ambiente Mundial, Estados Unidos de América). 2018. Sustainable aviation fuels guide (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide\\_100519.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_100519.pdf).

ONU Cambio Climático (Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Alemania). 2018a. ¿Qué es el Protocolo de Kyoto? (en línea). Bonn. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://unfccc.int/es/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/es/kyoto_protocol).

ONU Cambio Climático (Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Alemania). 2018b. El Acuerdo de París: ¿qué es el Acuerdo de París? (en línea). Bonn. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>.

Otley, T. 2021. Rolls-Royce, Airbus and Shell call for government help for net zero flying (en línea). Business Traveller, Reino Unido; 14 oct. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.businesstraveller.com/business-travel/2021/10/14/rolls-royce-airbus-and-shell-call-for-government-help-for-net-zero-flying/>.

Parlamento Europeo. 2021. Enmiendas 55-280: proyecto de opinión Jutta Paulus (PE704.620v01-00) (en línea). Estrasburgo, Francia. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/ITRE-AM-704798\\_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/ITRE-AM-704798_ES.pdf).

Pavlenko, N; Searle, S. 2021. Assessing the sustainability implications of alternative aviation fuels (en línea). ICCT. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://theicct.org/publication/assessing-the-sustainability-implications-of-alternative-aviation-fuels/>.

Poleri, A. 2021. Un Boeing 747 realizó un vuelo de prueba con combustible de aviación sostenible (en línea). AVIACIONLINE; 23 oct. Consultado 2 sep. 2022.

Disponible en <https://www.aviacionline.com/2021/10/un-boeing-747-realizo-un-vuelo-de-prueba-con-combustible-de-aviacion-sostenible/>.

ProQR (Combustibles Alternativos sin Impactos Climáticos – Cooperación Técnica Brasil-Alemania para el Desarrollo Sostenible, Brasil). 2022. Estudio sobre governança e políticas públicas de incentivo à produção de combustíveis sustentáveis de aviação (en línea). Consultado 8 jul. 2022. Disponible en <https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2022/04/Governanca-e-Politicas-Publicas-para-SAF.pdf>.

Prussi, M; Lee, U; Wang, M; Malina, R; Valin, H; Taheripour, F; Velarde, C; Staples, MD; Lonza, L; Hileman, JI. 2021. CORSIA: the first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels (en línea). Renewable and Sustainable Energy Reviews 150. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>.

Ringsred, A. 2018. The potential of the aviation sector to reduce greenhouse gas emissions using biojet fuels (en línea). Tesis Mgtr. Columbia Británica, Canadá, UBC. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://dx.doi.org/10.14288/1.0368545>.

Ríos Escalante, E; Ramos, L; Rodríguez Coronado, J; de Carvalho Júnior, A. 2022. Evaluation of the potential feedstock for biojet fuel production: focus in the Brazilian context (en línea). Renewable and Sustainable Energy Reviews 153(20): 11-16. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111716>.

Roitman, T. 2018. Perspectivas e propostas de inserção de bioquerosene de aviação no transporte aéreo de passageiros no Brasil (en línea). Tesis Mgtr. Río de Janeiro, Brasil, UFRJ. 146 p. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/Tamar\\_Roitman\\_MESTRA DO-2018.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/Tamar_Roitman_MESTRA DO-2018.pdf).

Rolls-Royce demostró en vuelo que sus motores aeronáuticos son aptos para funcionar con biocombustibles al 100 % (en línea). 2021. Bioeconomía, Buenos Aires, Argentina; 21 oct. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.bioeconomia.info/2021/10/21/rolls-royce-demostro-en-vuelo-que-sus-motores-aeronauticos-son-aptos-para-funcionar-con-biocombustibles-al-100/>.

Schmidt, P; Batteiger, V; Roth, A; Weindorf, W; Raksha, T. 2018. Power-to-liquids as renewable fuel option for aviation: a review (en línea). *Chemie Ingenieur Technik* 90(1-2):127-140. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1002/cite.201700129>.

Staples, MD; Malina, R; Olcay, H; Pearlson, MN; Hileman, JI; Boies, A; Barrett, SRH. 2014. Lifecycle greenhouse gas footprint and minimum selling price of renewable diesel and jet fuel from fermentation and advanced fermentation production technologies (en línea). *Energy & Environmental Science* (5):1545-1554. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1039/c3ee43655a>.

Starck, L; Pidol, L; Jeuland, N; Chapus, T; Bogers, P; Bauldreay, J. 2016. Production of hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA): optimisation of process yield (en línea). *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies Nouvelles* 71(1):112-140. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.2516/ogst/2014007>.

Sustainable Aviation Futures 2022. North America's sustainable aviation fuels (SAF) landscape. Disponible en <https://www.safcongressna.com/>

Tanzil, AH; Brandt, K; Wolcott, M; Zhang, X; García-Pérez, M. 2021. Strategic assessment of sustainable aviation fuel production technologies: yield improvement and cost reduction opportunities (en línea). *Biomass and Bioenergy* 145. Consultado 17 nov. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105942>.

Tao, L; Markham, JN; Hag, Z; Bidy, MJ. 2017. Techno-economic analysis for upgrading the biomass-derived ethanol-to-jet blendstocks (en línea). *Green Chemistry* 19(4):1082-1101. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1039/c6gc02800d>.

Torroba, A. 2021. Biocombustibles líquidos: institucionalidad y formulación de políticas públicas (en línea). San José, Costa Rica, IICA. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/18566/BVE21088316e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

UE (Unión Europea, Bélgica). 2009. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las

Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE (en línea). Diario Oficial de la Unión Europea 140(16). 5 jun. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=SK>.

UE (Unión Europea, Bélgica). 2018. Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de la energía procedente de fuentes renovables (en línea). Diario Oficial de la Unión Europea 328(82). 21 dic. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=ES>.

USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos); GAIN (Red Mundial de Información Agrícola, Estados Unidos de América). 2022a. Biofuels annual: European Union (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual\\_The%20Hague\\_European%20Union\\_E42022-0048.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_The%20Hague_European%20Union_E42022-0048.pdf).

USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos); GAIN (Red Mundial de Información Agrícola, Estados Unidos de América). 2022b. Biofuels annual: India (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual\\_New%20Delhi\\_India\\_IN2022-0056.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_New%20Delhi_India_IN2022-0056.pdf).

USDOE (Departamento de Energía de los Estados Unidos). 2020. Sustainable aviation fuel: review of technical pathways (en línea). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/downloads/sustainable-aviation-fuel-review-technical-pathways-report>.

Yao, G; Staples, MD; Malina, R; Tyner, WE. 2017. Stochastic techno-economic analysis of alcohol-to-jet fuel production (en línea). *Biotechnology for Biofuels* 10(18). Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0702-7>.

Zhao, X; Guolin, Y; Tyner WE. 2016. Quantifying breakeven price distributions in stochastic techno-economic analysis (en línea). *Applied Energy* 183(5):318-326. Consultado 2 sep. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.184>.

