El potencial de los combustibles sostenibles de aviación (SAF) en las Américas

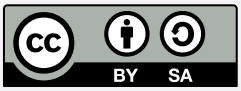
Cierre de brechas de rendimiento, recuperación de tierras degradadas y saldo exportable agroindustrial

Mgtr. Agustín Torroba



IICA

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2026



El potencial de los combustibles sostenibles de aviación (SAF) en las Américas:
Cierre de brechas de rendimiento, recuperación de tierras degradadas
y saldo exportable agroindustrial
elaborado por el IICA se publica bajo la
Licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir igual
4.0 IGO (CC-BY-SA 4.0 IGO)
(http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/igo/)
Creado a partir de la obra en 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 https://repositorio.iica.int/

Coordinación editorial: Valeria Piñeiro
Corrección de estilo: Unidad de idiomas IICA
Diagramado y diseño de portada: Diana Ortiz

Torroba, Agustín

El potencial de los combustibles sostenibles de aviación (SAF) en las Américas: Cierre de brechas de rendimiento, recuperación de tierras degradadas y saldo exportable agroindustrial/ San José, Costa Rica: IICA, 2026, 26p.; 21 x 16 cm.

ISBN: 978-92-9273-279-0
Publicado también en inglés

1. Biocarburante 2. Biocombustible 3. SAF 4. ATJ 5. HEFA
I. IICA II. Titulo

AGRIS	DEWEY
E70	665.779

San José, Costa Rica
2026

Resumen ejecutivo

La descarbonización de la aviación internacional **requiere una expansión sin precedentes de los combustibles sostenibles de aviación (SAF).**



Frente a este desafío, las Américas cuentan con una ventaja estructural: una base agrícola y agroindustrial de gran escala; cadenas de bioetanol y aceites vegetales consolidadas, en las que la huella de carbono se mide y certifica de manera constante; infraestructura logística; y capacidad para aumentar la oferta de materias primas mediante mejoras en materia de productividad y recuperación de suelos. En el presente trabajo se estima el potencial técnico de producción de SAF en el hemisferio a partir de tres actividades complementarias: el cierre de brechas de rendimiento en seis cultivos estratégicos, la recuperación productiva de tierras degradadas y la valorización de los flujos promedio de exportación agroindustrial del período 2021-2025.

Las Américas cuentan con una base agroindustrial sólida, logística y capacidad para ampliar materias primas destinadas a producir SAF.



De conformidad con los supuestos metodológicos adoptados, las tres actividades representan en conjunto un potencial técnico de aproximadamente 292 100 000 m³ de SAF. El cierre de brechas de rendimiento constituye el principal componente, con cerca de 153 000 000 m³ (el 52 % del total); la industrialización equivalente de los flujos promedio exportados aporta 113 200 000 m³ (el 39 %); y la recuperación productiva de tierras degradadas representa 25 900 000 m³ (el 9 %). Este volumen superaría ampliamente los requerimientos de los escenarios bajo y moderado del objetivo global ambicioso a largo plazo (LTAG) de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para 2050 y equivaldría a aproximadamente el 73 % del escenario alto, al 59 % del alto+, al 55 % del escenario máximo y al 65 % de los requerimientos de SAF de la meta de cero emisiones netas de carbono de la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA).

Este ejercicio muestra además que la expansión de los SAF se puede integrar con la seguridad alimentaria y la generación de valor agroindustrial. El cierre de brechas podría producir aproximadamente 276 800 000 t de coproductos proteicos (granos secos de destilería con solubles [DDGS] de maíz y trigo, harina de soja y torta de colza), a los que se sumarían 63 100 000 t en el escenario de tierras degradadas y 197 400 000 t asociadas a la industrialización de los flujos exportables. Con respecto a la caña de azúcar, se estima que el potencial hemisférico de cogeneración eléctrica con bagazo es de aproximadamente 35.6 TWh.

Estos resultados no proporcionan una previsión de la eficacia de la producción: su objetivo es dimensionar el gran potencial biomásico disponible por medio de tres estrategias diferentes. Desde una perspectiva de política pública, sugieren que la estrategia hemisférica debe concentrarse menos en la búsqueda de nuevas materias primas y más en la movilización sostenible de la base productiva de la que se dispone, es decir, en el cierre de las brechas de rendimiento, la recuperación de tierras degradadas y el aumento de la industrialización local de productos básicos. Las políticas nacionales de SAF se deben alinear con los criterios del Plan de Compensación y Reducción del Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA) y mantener la neutralidad respecto de las materias primas y las rutas tecnológicas, en favor de un desempeño ambiental verificable. En el ámbito internacional resulta prioritario promover dentro de la OACI un reconocimiento recíproco de metodologías de huella de carbono y certificaciones, incluidas las relativas a alcoholes, aceites y grasas ya certificados para biocombustibles terrestres como insumos intermedios de las rutas de proceso de alcohol a combustible de aviación (ATJ) e hidrogenación de ésteres y ácidos grasos (HEFA). Asimismo, fortalecer el CORSIA y evitar que los criterios de elegibilidad de materias primas operen de facto como barreras no arancelarias será determinante para convertir el potencial físico de las Américas en proyectos comerciales y lograr el acceso efectivo en los mercados internacionales (Torroba 2026).

1 Introducción: los SAF como una oportunidad agroindustrial hemisférica

En el Protocolo de Kioto y en el Acuerdo de París se consolidó el marco internacional para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En el ámbito de la aviación internacional, la OACI asumió el desarrollo de medidas sectoriales específicas, dado que estas emisiones requieren un tratamiento coordinado a escala internacional.

En este marco, la OACI no solo adoptó el LTAG de alcanzar emisiones netas de CO_2 iguales a cero en la aviación internacional para 2050, sino también desarrolló el CORSIA. Tanto la OACI como la IATA incluyen los SAF entre los instrumentos centrales para reducir las emisiones del sector (IATA 2021, CAEP 2022). Según los escenarios técnicos desarrollados para el LTAG en 2050, se podrían requerir entre 43 y 493 millones de m^3 de SAF (CAEP 2022). La magnitud del desafío resulta evidente si se considera que la producción mundial conjunta de bioetanol y biodiésel alcanzó cerca de 198 000 000 m^3 en 2025 (Torroba y Chiara 2026).

El desafío radica en crear una industria masiva que produzca SAF con la menor huella de carbono posible y al menor costo plausible. Ambas variables determinan el costo por tonelada de CO_2 abatida y, en consecuencia, condicionan la velocidad de adopción de los SAF frente a otras opciones de cumplimiento y descarbonización, como la cancelación de unidades de emisiones elegibles en el marco del CORSIA (Torroba 2026).

Las tecnologías dirigidas a producir SAF a partir de aceites y grasas (HEFA) y alcoholes (ATJ) se encuentran entre las rutas con mayor madurez tecnológica y comercial. Además, las cadenas de aceites y alcoholes presentan un elevado grado de desarrollo: materias primas como la soja, la colza y la palma se han consolidado en la producción de biodiésel, lo que demuestra su disponibilidad, competitividad en costos y capacidad para alcanzar bajas huellas de carbono. Algo similar ocurre con los cereales (principalmente el maíz y, en menor medida, el trigo) y la caña de azúcar: son cadenas que actualmente producen bioetanol, cuentan con infraestructura industrial y pueden escalar hacia SAF, lo que permite reducciones sustanciales de emisiones frente a los combustibles fósiles.

La experiencia en biocombustibles y la infraestructura existente ofrecen una ventaja para escalar la producción de SAF.

Es posible extrapolar algunas lecciones aprendidas en el desarrollo de los biocombustibles líquidos para el transporte terrestre a la naciente industria de SAF, en particular en relación con las materias primas que pueden abastecer esta nueva cadena de valor en el corto y mediano plazo. De acuerdo con la evidencia disponible (Torroba y Chiara 2025), las cadenas agrícolas antes mencionadas se han consolidado en la producción de biocombustibles terrestres por su abundancia, competitividad en cuanto a costos y capacidad de reducir emisiones. Estas materias primas coinciden con las rutas tecnológicas de SAF con mayor madurez, por lo que presentan ventajas para escalar frente a otras opciones todavía incipientes, como algunas rutas lignocelulósicas o basadas en algas.



En las Américas la necesidad de ampliar masivamente la producción de SAF representa una gran oportunidad para las cadenas agrícolas y agroindustriales, especialmente para las que muestran un mayor potencial. En el hemisferio se concentran la producción mundial de etanol (85 %), los grandes exportadores de maíz, soja, trigo, derivados de caña de azúcar, alcoholes y aceite de soja y canola, y un fuerte potencial nacional de intensificación sostenible. A diferencia de otras regiones, las Américas no disponen de una promesa tecnológica aislada, sino de una plataforma agroindustrial en operación, con productores, logística, puertos, plantas de molienda, ingenios, destilerías y sistemas de certificación de sostenibilidad que se pueden adaptar al mercado de los SAF.

En este documento se analiza el potencial regional de producción de SAF a partir de tres actividades complementarias. La primera es el cierre de las brechas de rendimiento en seis cultivos agrícolas estratégicos, a saber: maíz, trigo, caña de azúcar, soja, palma y colza, según la metodología desarrollada por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). La segunda es la estimación de las oportunidades asociadas con la recuperación productiva de tierras degradadas, a partir del ejercicio técnico incluido en la publicación intitulada *Llamado a la acción para promover la recuperación de suelos en las Américas como base para un sector agrícola más productivo y resiliente* (IICA 2025). La tercera es la cuantificación del potencial implícito en los flujos actuales de exportación de materias primas agroindustriales. Las tres actividades responden a una misma pregunta: ¿cuál es la escala de biomasa y productos intermedios que las Américas podría transformar en SAF a través de cadenas en operación? Mediante dicho ejercicio no se obtiene un pronóstico de producción, sino el potencial disponible.

2 Marco metodológico

Como ya se mencionó, por medio del ejercicio se calcula un potencial técnico de oferta de materias primas y SAF. Se trata de cuantificar la biomasa o los productos agroindustriales adicionales o ya comercializados y, posteriormente, de aplicar coeficientes homogéneos de transformación a las rutas ATJ y HEFA. Los resultados, que expresan un potencial técnico acorde con los supuestos definidos, se deben considerar como una herramienta para comparar órdenes de magnitud, identificar cadenas prioritarias y orientar estudios posteriores de factibilidad, sostenibilidad, costos e infraestructura.

2.1. Cierre de brechas de rendimiento

En el presente documento se replica la metodología de Torroba y Chiara (2025), que sigue las siguientes referencias:

BASES DE DATOS

Se evalúan las brechas de rendimiento de los principales cultivos que hoy se destinan a la producción de biocombustibles: el maíz, la caña de azúcar, el trigo, la soja (aceite), la palma (aceite) y la colza (aceite).

En función de la cobertura de los insumos pertinentes, se trabajó con dos bases de datos. Una de ellas es la del Atlas Mundial de la Brecha de Rendimiento (GYGA)[1] (UNL y WUR 2025), que se empleó en relación con los siguientes cultivos:

	Cobertura de producción	Área cubierta
Maíz	76 %	86 %
Trigo	60 %	65 %
Soja	95 %	95 %

Con respecto al resto de los cultivos, se utilizaron los datos de Our World in Data (OWD)[2]. Cabe notar que en estas bases de datos se aplican diferentes metodologías, lo que imposibilita su comparación; por lo tanto, en este documento, cuando se hace referencia a la caña de azúcar, el aceite de palma y el aceite de colza, se utilizan solo los datos de OWD. Al igual que en la base de datos del GYGA, en la de OWD las brechas de rendimiento estimadas se miden en t/ha. Los valores negativos han sido reemplazados por cero, lo que significa que se ha logrado el rendimiento alcanzable. En relación con la caña de azúcar, se utilizan como fuentes de datos Mueller et al. (2012) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO 2025). Según la base de datos de OWD, los rendimientos alcanzables se basan en evaluaciones del año 2000, debido a lo cual, antes de ese año el rendimiento real alcanzable pudo haber sido menor y, posteriormente, mayor.

[1] Disponible en https://www.yieldgap.org/web/guest/coverage-and-data-download.

[2] Disponible en https://ourworldindata.org/crop-yields.

DEFINICIONES

- **Potencial de rendimiento limitado por el agua (YW).** En los cultivos de secano este constituye el parámetro de referencia más relevante. El crecimiento del cultivo se ve limitado por el suministro de agua y, por lo tanto, en él influyen el tipo de suelo y la topografía del campo. Se utiliza como punto de referencia para estimar las brechas de rendimiento solo en los cultivos de secano, por lo que no se muestra en relación con los cultivos de regadío.

- **Rendimiento promedio (YA).** Se trata del rendimiento promedio logrado por los agricultores en una región determinada, de conformidad con las prácticas de gestión dominantes y las propiedades del suelo.

- **Brecha de rendimiento (YG).** Esta brecha se expresa en t/ha cosechada con contenido de humedad estándar. La YG es la diferencia entre el YW (en cultivos de secano) y el YA. Se basa en el YW simulado, en el que se utiliza el manejo agronómico óptimo como entrada (es decir, la madurez del cultivo, la fecha de siembra y la densidad de la plantación). Las fechas óptimas de siembra, la densidad de las plantas y la madurez de los cultivos se basan en las prácticas dominantes utilizadas actualmente por los agricultores; sin embargo, dichos factores difirieron de las prácticas actuales cuando hubo evidencia sólida del uso de un valor óptimo, como la mostrada en documentos de investigación de campo que indican que se obtienen mayores rendimientos con fechas de siembra diferentes de las utilizadas en la actualidad por los productores. En estos casos la fecha óptima de siembra y la madurez del cultivo se determinan dentro de las limitaciones de tiempo de la secuencia de cultivos dominante (p. ej., las superficies donde se siembra más de un cultivo en el mismo campo cada año).



AÑOS DE REFERENCIA

En este documento se emplearon los promedios del período comprendido entre 2006 y 2023, a fin de reflejar la aplicación de tecnologías comparables. El cálculo se restringe a los países de las Américas incluidos en las bases. La producción adicional de cada cultivo se obtiene de multiplicar la brecha de rendimiento (t/ha) por el área cosechada correspondiente. El supuesto central es la superficie constante: el aumento proviene de una mejora de la productividad en tierra agrícola ya cultivada y no de una expansión de la frontera agropecuaria. A esa producción incremental se aplican los coeficientes de transformación indicados en la sección 2.4 para obtener el volumen potencial de SAF.

2.2. Recuperación productiva de tierras degradadas

En el segundo bloque se replica el escenario agrícola incluido en el anexo técnico del documento intitulado Llamado a la acción para promover la recuperación de suelos en las *Américas como base para un sector agrícola más productivo y resiliente* (IICA 2025). En este ejercicio, que parte de un punto de referencia de la base de datos FAOSTAT 2022, se estima que 334 400 000 ha agrícolas presentan algún grado de degradación: 223 600 000 ha de pasturas y 110 800 000 ha de tierras agrícolas bajo sistemas convencionales de labranza. En términos de los incrementos de producción de granos, el componente relevante está constituido por las pasturas degradadas sometidas a un proceso progresivo de recuperación.

En la metodología se considera un ciclo de rehabilitación de diez años. Cada año el equivalente al 10 % de las pasturas degradadas se destina de manera temporal a la producción de granos (maíz y soja) antes del establecimiento de pasturas mejoradas. Paralelamente, una fracción de las áreas restauradas se destina a sistemas silvopastoriles. En el documento original no se atribuyen aumentos de rendimiento a las tierras agrícolas que pasan de la labranza convencional a la labranza cero, por lo que el incremento de los granos se deriva de modo exclusivo de ese uso temporal de las pasturas durante su recuperación. Con respecto a las Américas, a través del ejercicio se estima la existencia de 22 359 000 ha temporales y una producción adicional anual de 112 600 000 t de maíz y soja[3], con base en rendimientos regionales medios de la FAOSTAT (IICA 2025). El escenario modela la capacidad productiva mediante el uso de dichas ha temporales, que se corresponden con el 10 % de las pasturas degradadas totales.

La recuperación de tierras degradadas permite sumar biomasa mediante un uso agrícola temporal, integrado a la restauración de pasturas.

En este trabajo se toma esa producción adicional de maíz y soja para convertirla en SAF. Con respecto a la soja, se aplica el contenido de aceite especificado en los coeficientes técnicos y la ruta HEFA, mientras que, en relación con el maíz, se aplica la conversión a etanol y luego a ATJ. El aceite técnico de maíz recuperado se incorpora en el potencial por medio de la ruta HEFA. El resultado obtenido no supone la conversión permanente de la totalidad de la tierra recuperada a la agricultura, ya que se conserva la lógica de rotación temporal del ejercicio de los suelos. En el escenario se asume que dicho porcentaje de tierras utilizadas en rotación para obtener las cantidades de maíz y soja descritos se mantiene constante.

2.3. Saldo exportable agroindustrial

En la tercera actividad se utilizan los flujos de exportación como indicador observable de escala, competitividad y capacidad logística. No se interpreta el saldo exportable como "materia prima ociosa", sino como un volumen que ya encuentra demanda internacional y que, en condiciones económicas adecuadas, podría ser objeto de una mayor industrialización doméstica. El escenario cuantifica a cuánto SAF equivaldría transformar esos flujos con las mismas tecnologías y coeficientes aplicados en el resto del documento. Para evitar que un año excepcional condicione los resultados, se utiliza como base el promedio anual de las exportaciones correspondientes al período 2021-2025. Este promedio se calcula para cada producto y luego se convierte a SAF, a través de los coeficientes técnicos definidos en la sección 2.4.

[3] En el presente documento se entiende que el 50 % corresponde a la producción de soja y 50 % a la de maíz.

Se consideran las siguientes partidas del Sistema Armonizado (HS): maíz 100590; trigo 100199 o la partida 1001, cuando se requiere una mayor cobertura; soja 1201; aceite de soja 1507; azúcar de caña o remolacha 1701; aceite de palma crudo 151110; colza 1205; aceite de colza 1514; y aceite de maíz crudo 151521. Con respecto a cada producto, se agregan las exportaciones de los países de las Américas registradas en Trade Map, del Centro de Comercio Internacional. Con el objetivo de reducir el efecto de las variaciones interanuales, para cada producto se emplea el promedio anual del período 2021-2025. Cuando se parte de un grano o una semilla oleaginosa, se aplica primero el rendimiento industrial de aceite o etanol. Cuando la mercancía ya es aceite o etanol, se aplica directamente el coeficiente HEFA o ATJ, según corresponda. En el caso del azúcar (HS 1701), se adopta un coeficiente operativo de 0.64 m^3 de etanol por tonelada de azúcar antes de aplicar la conversión ATJ. Los datos de exportación de etanol fueron tomados de Torroba y Chiara 2026.



Mediante el uso de las exportaciones (en lugar de la producción total) se introduce deliberadamente un criterio conservador en torno a la escala efectivamente movilizada por el comercio. Aun así, se trata de un escenario contrafactual: el volumen exportado tiene actualmente otros destinos y su eventual transformación en SAF dependería de precios relativos, contratos, disponibilidad de capacidad industrial, requisitos de sostenibilidad y demanda doméstica.

2.4. Coeficientes técnicos de conversión

Para asegurar la consistencia entre los tres bloques, todas las magnitudes se transforman por medio de un conjunto común de coeficientes técnicos. En las rutas basadas en alcohol el maíz se convierte en etanol a razón de 0.42 m^3 de etanol por tonelada de grano y el trigo a 0.361 m^3/t. En la caña de azúcar se utiliza un rendimiento de referencia de 80 L/t molida. En el caso del azúcar comercializado con la partida HS 1701 se aplica un coeficiente de 0.64 m^3 de etanol/t de azúcar. Este valor se deriva de la conversión estequiométrica de la sacarosa: el máximo teórico es de aproximadamente 538 kg de etanol/t de sacarosa, equivalentes a 682 L, considerando una densidad del etanol cercana a 0.789 kg/L. Dado que las fermentaciones industriales alcanzan rendimientos inferiores al máximo teórico, se adopta 640 L/t como valor operativo intermedio dentro de un rango aproximado de 620 a 650 L. El etanol se transforma

Los coeficientes comunes de conversión permiten comparar el potencial de distintas materias primas y rutas tecnológicas.

posteriormente a SAF a través de un coeficiente de ATJ de 0.60 m³ de SAF por m³ de etanol. En las rutas oleaginosas, la conversión HEFA es de 0.83 t de SAF/t de aceite y se adopta una densidad del SAF de 0.76 t/m³, de modo que el volumen se obtiene como: SAF (m³) = aceite (t) × 0.83 / 0.76.

En relación con la colza, se emplea 42 % de aceite en semilla y 98 % de eficiencia de extracción. En cuanto a la soja, 18 % de aceite. A efectos de la dimensión multiproducto, la soja genera aproximadamente 80 % de harina proteica y la colza 47 % de torta proteica. En el caso del maíz, por cada t procesada, se consideran como coproductos alternativos 0.32 t de burlanda seca o 0.90 t de burlanda húmeda y 1.1 % de aceite de maíz. En cuanto al trigo se consideran 0.33 t de DDGS/t de grano. Estos coproductos no se suman al SAF potencial, pero son relevantes para interpretar los efectos agroindustriales y de seguridad alimentaria de las rutas analizadas. Con respecto a la dimensión energética de la caña, se toma como referencia el potencial global de aproximadamente 81 TWh de electricidad a partir de bagazo (Torroba y Chiara 2025). Dado que las Américas representan aproximadamente 44 % de ese potencial en el ejercicio de referencia, se asigna al hemisferio un potencial teórico de 35.6 TWh. Esta cifra se presenta como coproducto energético y no se adiciona al volumen de SAF.

TABLA 1. Coeficientes técnicos de conversión utilizados en el ejercicio.

Cadena / variable	Coeficiente aplicado	Unidad / observación
Maíz → etanol	0.42	m³ de etanol/t de maíz
Maíz → burlanda seca	0.32	t/t de maíz, alternativa a burlanda húmeda
Maíz → aceite de maíz	1.1 %	t de aceite/t de maíz
Trigo → etanol	0.361	m³ de etanol/t de trigo
Trigo → DDGS	0.33	t/t de trigo
Etanol → SAF (ATJ)	0.60	m³ de SAF/m³ de etanol
Aceite → SAF (HEFA)	0.83	t de SAF/t de aceite
Densidad SAF	0.76	t/m³
Colza → aceite	42 % × 98 %	Contenido de aceite × eficiencia de extracción
Colza → torta proteica	47 %	Torta/semilla procesada
Soja → aceite	18 %	Aceite/soja procesada
Soja → harina proteica	80 %	Harina/soja procesada
Azúcar → etanol	0.64	m³ de etanol/t de azúcar
Bagazo → electricidad	35.6 TWh	Potencial teórico para las Américas (44 % de 81 TWh globales)

2.5. Alcance y límites del ejercicio

Los tres bloques miden la disponibilidad física potencial, no la elegibilidad automática según el CORSIA u otros marcos regulatorios. En esta etapa no se modelan la huella de carbono específica de cada país o planta, el costo de producción, el precio relativo de las materias primas, la inversión requerida, las restricciones de hidrógeno, la capacidad de refinación, los límites de mezcla, la certificación ni la velocidad de adopción tecnológica. La utilidad del ejercicio radica en mostrar la escala máxima técnicamente convertible.

3 El potencial regional

Los resultados muestran que la principal fortaleza de las Américas no proviene de una única materia prima, sino de la combinación de la productividad agrícola, la tierra recuperable, la infraestructura agroindustrial y los excedentes que ya se comercializan internacionalmente. Bajo los supuestos metodológicos adoptados, los tres bloques analizados representan un potencial técnico agregado de aproximadamente 292 100 000 m³ de SAF. Esta cifra se debe leer como un orden de magnitud y no como una previsión de producción.

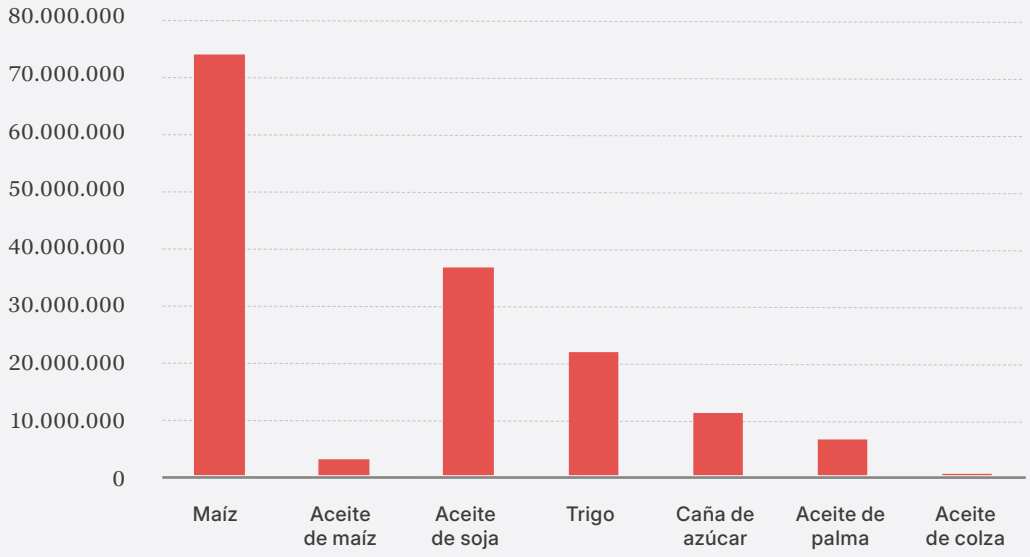
3.1. Cierre de brechas de rendimiento en seis cultivos estratégicos

El cierre de brechas de rendimiento constituye el mayor bloque individual del ejercicio: aproximadamente 153 000 000 m³ de SAF potencial en las Américas. El maíz representa cerca de 74 100 000 m³, seguido por el aceite de soja (36 700 000 m³) y por el trigo (21 800 000 m³). La caña de azúcar aporta alrededor de 10 900 000 m³, seguido por el aceite de palma (6 400 000 m³), el aceite de maíz (3 000 000 m³) y el aceite de colza (140 000 m³).



En este sentido, efectuar una lectura económica resulta importante. Esta oferta adicional no exige, por definición, una ampliación de la superficie de los seis cultivos: surge de la elevación del rendimiento de superficies ya cosechadas hasta niveles agronómicamente alcanzables. En este sentido, el potencial es compatible con una estrategia de intensificación sostenible y, al mismo tiempo, con una mayor producción de alimentos y coproductos. P. ej., en el caso de los cereales, a partir del incremento de la producción de etanol se generan DDGS, burlandas, aceite de maíz y CO_2 biogénico; en el de las oleaginosas, el aumento en la producción de aceite supone la generación de harinas y tortas proteicas.

FIGURA 1. Potencial técnico de producción de SAF en las Américas mediante el cierre de brechas de rendimiento, por materia prima (m^3 de SAF).



Fuente: Elaborado con base en Ritchie et al. 2022, Torroba y Chiara 2025, UNL y WUR 2025.

3.2. Recuperación de tierras degradadas

La recuperación de tierras degradadas constituye una segunda fuente de biomasa conceptualmente distinta del cierre de brechas. En este caso, en lugar de elevar el rendimiento de las superficies agrícolas ya cosechadas, se utiliza de manera temporal una fracción de pasturas degradadas durante su proceso de rehabilitación. Por medio de la aplicación de los rendimientos regionales y la asignación de cultivos según el ejercicio del IICA (2025), la producción adicional de maíz y soja generaría un equivalente de cerca de 25 900 000 m^3 de SAF.

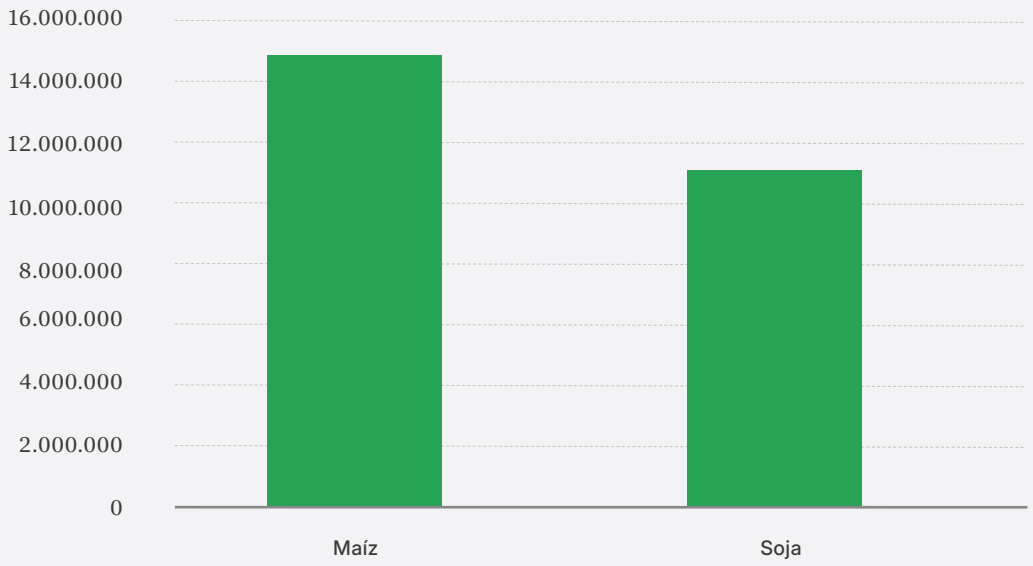
Elevar el rendimiento de los cultivos aumentaría la producción de SAF sin ampliar la superficie agrícola y generaría coproductos de valor.

Con el maíz se produce aproximadamente 14 900 000 m^3 a través de la secuencia maíz-etanol-ATJ y aceite de maíz-HEFA, mientras que con la soja se obtiene alrededor de 11 100 000 m^3 mediante la extracción de aceite y la HEFA. Aunque el

beneficio es menor que el derivado del cierre de brechas, su importancia estratégica es alta, ya que la restauración de suelos puede combinar la recuperación de la productividad pecuaria, la mejora de la salud edáfica y una fase agrícola transitoria, capaz de generar alimentos, proteína y energía renovable.

Este resultado no se debe interpretar como una conversión permanente de pasturas en agricultura, ya que el supuesto metodológico es el inverso: la agricultura forma parte del proceso de recuperación y antecede al restablecimiento de pasturas mejoradas y sistemas integrados, lo que conserva la lógica original del documento sobre suelos.

FIGURA 2. Potencial técnico de producción de SAF asociado con la recuperación productiva de tierras degradadas en las Américas, por materia prima (m³ de SAF).



Fuente: Elaborado con base en FAO 2025 e IICA 2025.

3.3. Saldo exportable: la escala ya existe

La tercera dimensión está constituida por el saldo exportable de materias primas agroindustriales. Las Américas producen grandes volúmenes de granos, azúcar y aceites y una parte sustantiva de esa oferta ya se mueve por cadenas comerciales internacionales, lo que demuestra la competitividad, disponibilidad física, infraestructura portuaria y capacidad logística de la región. En términos de SAF, estos flujos cumplen dos funciones analíticas: muestran cuáles materias primas ya operan a escala y permiten estimar el valor agregado potencial de la transformación local de una fracción de productos básicos en una molécula energética certificada.

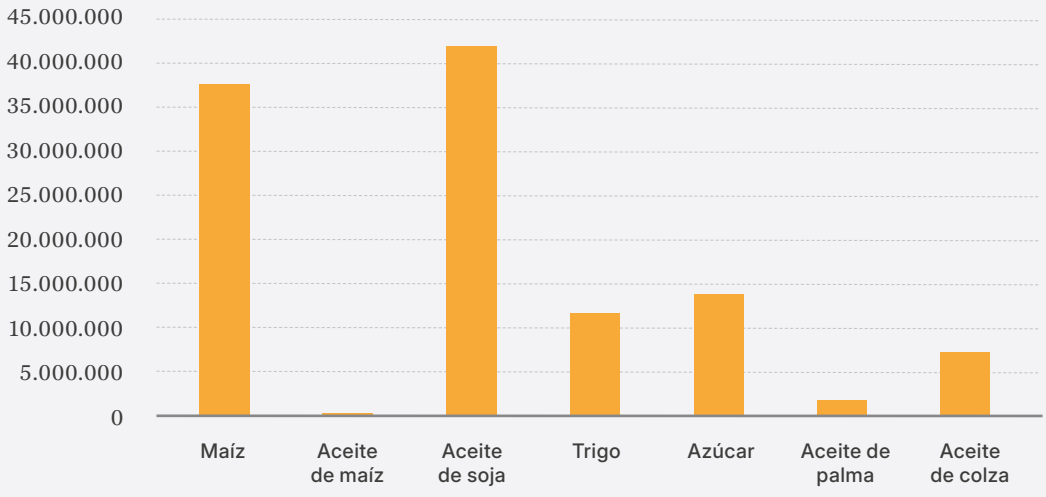
Si los volúmenes de exportación considerados en la base se transformaran de acuerdo con los coeficientes técnicos del trabajo, se obtendrían aproximadamente 113 200 000 m³ de SAF. El mayor aporte provendría del aceite de soja (41 700 000 m³), seguido por el del maíz (37 300 000 m³). El azúcar re-



presentaría alrededor de 13 700 000 m³, mientras que el trigo, el aceite de colza, el aceite de palma y el aceite de maíz supondrían 11 600 000 m³, 7 100 000 m³, 1 700 000 m³ y 220 000 m³, respectivamente.

Lo anterior no muestra la inconveniencia de exportar esos flujos, sino el tamaño de una plataforma productiva y logística que ya está en operación. En los países exportadores una estrategia de desarrollo de SAF puede suponer un problema de valorización marginal: determinar la proporción de los flujos actuales que conviene industrializar domésticamente cuando el diferencial entre el valor del producto básico y el valor del SAF (incluidos sus atributos ambientales) remunera la inversión adicional.

FIGURA 3. Equivalente técnico de SAF de las exportaciones promedio de materias primas agroindustriales de las Américas correspondientes al período 2021-2025, por producto (m³ de SAF).

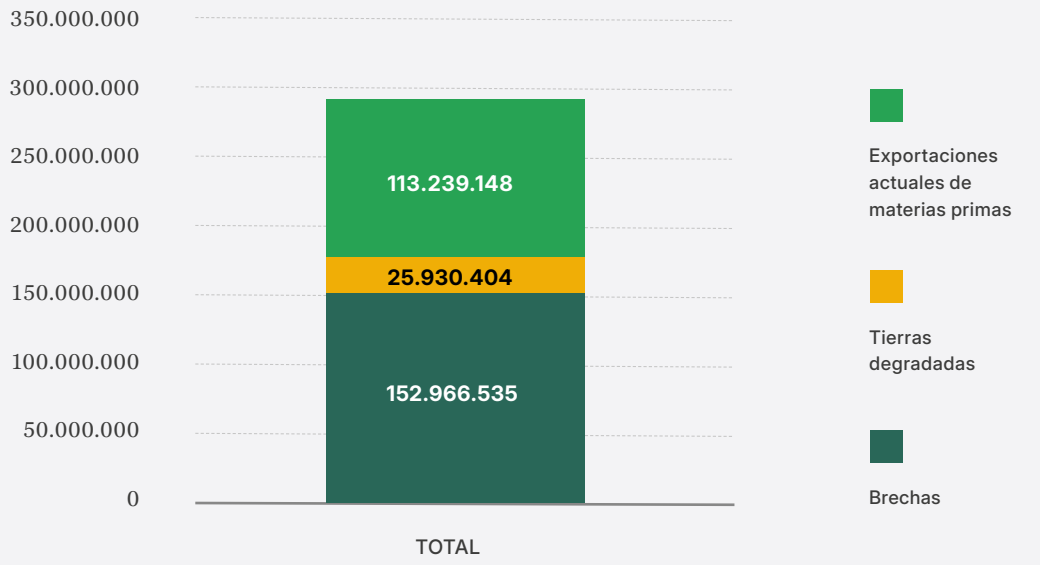


Fuente: Elaborado con base en ITC 2026.

4 Síntesis del potencial productivo por fuente

La suma de los tres bloques asciende a aproximadamente 292 100 000 m³ de SAF. El cierre de brechas de rendimiento representa 153 000 000 m³ (52 % del total), las exportaciones promedio de materias primas del período 2021-2025 equivalen a 113 200 000 m³ (39 %) y la recuperación productiva de tierras degradadas aporta 25 900 000 m³ (9 %). Esta composición es relevante porque combina dos fuentes de oferta adicional (mayor productividad y recuperación de suelos) con una tercera que refleja la escala comercial actual.

FIGURA 4. Síntesis del potencial técnico de SAF en las Américas según la fuente de biomasa o el producto agroindustrial (m³ de SAF).



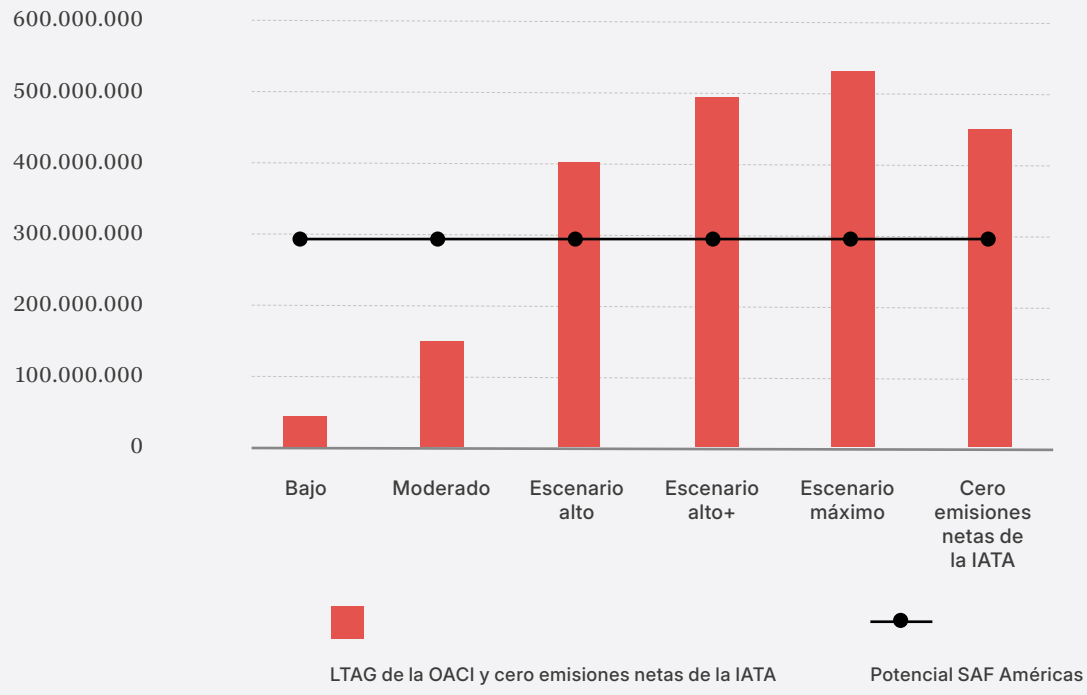


El resultado agregado permite dimensionar el orden de magnitud regional frente a los escenarios internacionales de demanda de SAF. En el siguiente gráfico se muestra que el potencial de producción de SAF de las Américas, cercano a 290 000 000 m³, superaría ampliamente los requerimientos de los escenarios bajo y moderado de los LTAG para 2050 y cubriría una parte sustantiva de los escenarios más exigentes. En términos relativos, este potencial equivaldría a aproximadamente el 73 % del escenario alto, al 59 % del alto+, al 55 % del escenario máximo y a alrededor del 65 % de la meta de cero emisiones netas de carbono de la IATA para 2050. Además, este resultado evidencia que, aun sin asumir que todo el potencial técnico se pueda materializar, las Américas podrían desempeñar un papel central en el abastecimiento global de SAF por medio de su base agroindustrial actual, el cierre de brechas de productividad, la recuperación de tierras degradadas y la valorización de saldos exportables.

El potencial técnico de las Américas cubriría una parte sustancial de la demanda mundial de SAF proyectada para 2050.

El valor de este ejercicio consiste en demostrar que la limitación hemisférica no es exclusivamente física, ya que existe una base agrícola y agroindustrial lo suficientemente grande como para que restricciones en materia de inversión, certificación, tecnología, logística y señales de demanda revistan una importancia central.

FIGURA 5. Potencial de producción de SAF (en m³) en las Américas frente a los escenarios de demanda del LTAG y la meta de cero emisiones netas de carbono de la IATA para 2050.



Fuente: Elaborado con base en IATA 2021 y CAEP 2022.

A continuación se describen los distintos supuestos de los escenarios de los LTAG en torno al desarrollo de los SAF.

Bajo	Se carece de apoyo político a los SAF.
Moderado	Existe cierto nivel de apoyo político a los SAF, pero es menor que el brindado a los biocombustibles para el transporte por carretera.
Escenario alto	Las condiciones de competencia son equitativas entre los SAF y los biocombustibles para el transporte por carretera.
Escenario alto+	Se pone énfasis en las políticas para los SAF.
Escenario máximo*	Este escenario no es asignable a una dimensión de políticas ("escenario sin fallos").

*En este escenario, creado dentro de un análisis a corto plazo, se alcanza el 100 % de la producción de SAF anunciada, con independencia del vencimiento de los planes de producción, y se destina a la producción de SAF la máxima proporción posible de la producción de la capacidad anunciada, independientemente de si la empresa ha mencionado o no los SAF en sus anuncios.

SUBPRODUCTOS: MÁS ALIMENTOS Y ENERGÍA A PARTIR DE LAS MISMAS MATERIAS PRIMAS

La expansión de la producción de SAF a partir de materias primas agrícolas no implica solo una mayor oferta de energía renovable sostenible. Los procesos de transformación del maíz, el trigo, la soja y la colza generan de forma simultánea coproductos de alto valor, destinados principalmente a la alimentación animal, mientras que la industrialización de la caña de azúcar permite además generar electricidad con el bagazo.



De acuerdo con los escenarios analizados, el cierre de brechas de rendimiento podría generar alrededor de 276 800 000 t de coproductos proteicos, principalmente DDGS de maíz y trigo, harina de soja y torta de colza. A ello se suma un potencial teórico para las Américas de aproximadamente 35.6 TWh de electricidad a partir del bagazo de caña, equivalente al 44 % de los 81 TWh estimados globalmente en el ejercicio de

cierre de brechas. En el escenario asociado con la recuperación de tierras degradadas, la producción adicional de maíz y soja permitiría obtener cerca de 63 100 000 t de coproductos para alimentación animal. Finalmente, si una parte del actual saldo exportable de granos fuera industrializada antes de su exportación, se podrían generar alrededor de 197 400 000 t adicionales de estos productos.

Indicador principal	Cantidad	Unidad
Coproductos proteicos por cierre de brechas	276.8	Millones de t
Coproductos proteicos por tierras degradadas	63.1	Millones de t
Coproductos proteicos por exportaciones promedio	197.4	Millones de t
Electricidad potencial con bagazo	35.6	TWh

De conformidad con lo anterior, el desarrollo del SAF puede constituir también una estrategia de agregación de valor agroindustrial, capaz de producir simultáneamente combustibles renovables, alimentos de alto contenido proteico (537 000 000 t) y bioelectricidad, entre otros coproductos.

5 Articulación tecnológica: HEFA y ATJ

Las dos rutas tecnológicas utilizadas en el ejercicio reflejan la propia estructura agroindustrial de las Américas. La HEFA, que hoy constituye la ruta más madura comercialmente para SAF, se adapta a los aceites vegetales, las grasas animales y los aceites usados. En el continente sus bases agrícolas de mayor escala son la soja, la colza/canola y la palma, a las que se suma el aceite recuperable de maíz.

Por otra parte, el ATJ tiene un valor estratégico singular para el hemisferio porque se puede impulsar sobre las cadenas de etanol más desarrolladas del mundo. Varios países del hemisferio concentran una infraestructura que incluye producción agrícola, plantas de etanol, transporte, almacenamiento y experiencia regulatoria. Por lo tanto, el maíz, el trigo y la caña de azúcar se pueden incorporar en los SAF sin necesidad de partir de una cadena de abastecimiento.

De acuerdo con lo anterior, la coexistencia de la HEFA y el ATJ constituye una ventaja comparativa. Las Américas pueden implementar una estrategia que combine alcoholes y aceites según su disponibilidad regional, costo e intensidad de carbono, así como la madurez de los proyectos.

HEFA es la ruta tecnológica más madura, seguida de ATJ

6 Implicancias para una estrategia hemisférica

Los resultados sugieren que una estrategia hemisférica de SAF se debe fundamentar en una premisa básica: las Américas no enfrentan un problema de disponibilidad de materias primas, sino el desafío de transformar su actual base agrícola y agroindustrial en una oferta de SAF competitiva, certificada y financiable. La política pública, por lo tanto, no se debe concentrar exclusivamente en identificar nuevas materias primas, sino en crear las condiciones que permitan movilizar de forma sostenible su potencial.

Una primera línea de acción consiste en fortalecer las políticas orientadas a cerrar brechas de rendimiento, recuperar tierras degradadas y aumentar la agroindustrialización de productos básicos. Los resultados de este trabajo muestran que una parte significativa del potencial regional se puede aprovechar sin una expansión equivalente de la frontera agrícola. Incrementar la productividad de cultivos ya establecidos, recuperar la capacidad productiva de suelos degradados y transformar localmente una mayor proporción de granos, aceites, azúcar y alcoholes permitiría ampliar la disponibilidad de insumos para SAF y, al mismo tiempo, generar coproductos, empleo, inversión y un mayor valor agregado.



En segundo lugar, las políticas nacionales de regulación y promoción de SAF deben seguir los criterios de sostenibilidad del CORSIA y mantener el criterio de neutralidad respecto de las materias primas y las rutas tecnológicas. Una regulación excesivamente prescriptiva sobre materias primas o tecnologías puede excluir cadenas eficientes y elevar de manera innecesaria los costos de descarbonización. Para las Américas resulta muy importante mantener la posibilidad de utilizar alcoholes a través del ATJ y aceites y grasas mediante la HEFA, siempre que el uso de los combustibles producidos genere reducciones de emisiones y que estos cumplan criterios de sostenibilidad verificables.

Una tercera prioridad debe ser impulsar, particularmente en el ámbito de la OACI, el establecimiento de mecanismos de reconocimiento recíproco de metodologías de huella de carbono y certificaciones de sostenibilidad. En numerosos países las cadenas

de aceites y grasas utilizadas para producir biodiésel y los alcoholes destinados a la elaboración de bioetanol ya cuentan con sistemas de medición, verificación y certificación de emisiones. Estos productos pueden constituir insumos intermedios para la producción de SAF por medio de la HEFA y el ATJ. Cuando las metodologías utilicen métricas, límites de sistema y mecanismos de monitoreo, reporte y verificación equivalentes, se debe procurar que esos atributos ambientales sean reconocidos por el CORSIA, a fin de reducir duplicaciones de certificación, costos de transacción y barreras al financiamiento (Torroba 2026).

En paralelo, resulta necesario fortalecer el CORSIA para que genere una señal económica más consistente con el despliegue de los SAF. En propuestas previas se han planteado tres líneas principales: establecer un piso efectivo al precio del carbono para el cumplimiento de dicho plan, a través de unidades elegibles o un mecanismo equivalente; introducir progresivamente una participación mínima de combustibles elegibles para el cumplimiento del CORSIA (o limitar la proporción de obligaciones que se pueden satisfacer de forma exclusiva mediante unidades de compensación); y avanzar hacia principios más homogéneos de cumplimiento y penalización entre Estados. Estas medidas tienen como fin aumentar la previsibilidad de la demanda, mejorar la bancabilidad de los proyectos y reducir los incentivos al arbitraje regulatorio (Torroba 2026). Los países de las Américas están representados en la OACI, por lo que podrían proponer medidas en esta dirección para que, en términos de SAF, se pase de la oportunidad a la realidad.

La combinación de HEFA y ATJ permite aprovechar aceites y alcoholes de cadenas agroindustriales ya desarrolladas en las Américas.

Finalmente, los países de las Américas deben adoptar posiciones hemisféricas comunes en los foros internacionales para evitar que los criterios de elegibilidad de materias primas se transformen en barreras no arancelarias al comercio de SAF o de sus insumos. Los criterios de sostenibilidad deben priorizar resultados ambientales verificables (en particular, la reducción efectiva de emisiones de ciclo de vida) por sobre exclusiones generales basadas en el origen agrícola de la materia prima. Este principio adquiere especial relevancia frente a marcos como el Reglamento (UE) 2023/2405 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de octubre de 2023 Relativo a la Garantía de unas Condiciones de Competencia Equitativas para un Transporte Aéreo Sostenible, cuyos criterios de elegibilidad pueden restringir la entrada de determinadas materias primas agrícolas en el mercado europeo. Para una región con ventajas comparativas en materia de maíz, caña de azúcar, soja, palma y colza evitar la fragmentación regulatoria resulta clave, a fin de que la sostenibilidad opere como un atributo verificable del producto y no como una restricción a *priori* en torno a su origen.

En conjunto, una estrategia hemisférica debe combinar un aumento en la productividad, la recuperación de la base de recursos, una mayor industrialización, la neutralidad tecnológica y el reconocimiento recíproco de certificaciones y reglas internacionales que remuneren efectivamente la reducción de emisiones. Según este enfoque, la ventaja de las Américas no radicaría únicamente en disponer de biomasa abundante, sino en convertir sus cadenas agroindustriales en una plataforma competitiva para abastecer el mercado mundial de SAF.



7 Consideraciones finales

En las Américas el potencial de producción de SAF es estructural, no marginal. La región combina una base agrícola de gran escala, cadenas de biocombustibles líquidos consolidadas, la capacidad para aumentar los rendimientos sin ampliar necesariamente la superficie cultivada, tierras degradadas con oportunidades de recuperación productiva y flujos exportables que reflejan la competitividad y la infraestructura disponible en la región. De conformidad con los supuestos planteados en este trabajo, estas tres fuentes suman un potencial técnico cercano a los 292 000 000 m³ de SAF.

Las Américas podrían alcanzar un potencial técnico cercano a 292 millones de m³ de SAF mediante tres fuentes complementarias.

El cierre de brechas constituye el componente de mayor magnitud y, al mismo tiempo, el que mejor ilustra una característica central de la bioeconomía: **generar más energía no implica necesariamente producir menos alimentos.** La mejora de los rendimientos permite ampliar la producción agrícola en la misma superficie y, a partir de su industrialización, generar simultáneamente SAF y coproductos alimentarios o forrajeros de alto valor, como DDGS, harina de soja y torta de colza. A esta vía se suma la **recuperación productiva de tierras degradadas,** que ofrece una fuente

adicional de biomasa sin plantear una conversión permanente a nuevas superficies agrícolas. En el escenario analizado la incorporación temporal del maíz y la soja forma parte del proceso de rehabilitación de pasturas degradadas, que combina la restauración de la capacidad productiva, la producción de alimentos y la generación de energía renovable.

El saldo exportable aporta una tercera dimensión complementaria. Una parte relevante de la escala agroindustrial necesaria para desarrollar SAF ya existe en las Américas: en la actualidad productores, plantas de procesamiento, cadenas de almacenamiento, corredores logísticos y puertos movilizan grandes volúmenes de granos, aceites, azúcar y alcoholes, debido a lo cual el desafío no radica únicamente en expandir la producción primaria, sino también en determinar en qué países y cadenas resulta eficiente **agroindustrializar una mayor proporción de los productos básicos que hoy se exportan,** por medio de la incorporación de nuevos eslabones de transformación y la captura en el ámbito local de una mayor proporción del valor agregado. En conjunto, el cierre de brechas, la recuperación de tierras degradadas y una mayor industrialización del saldo exportable constituyen tres vías distintas, pero complementarias, para ampliar la oferta potencial de SAF en el hemisferio.

Las Américas pueden convertir su potencial de SAF en ventaja al articular biomasa, infraestructura, certificación y acceso a mercados.

De conformidad con lo anterior, el siguiente paso por dar no es hallar una única materia prima "ganadora", sino convertir este potencial regional en carteras de proyectos por país y cadena, lo que exige la integración de la disponibilidad de biomasa, la medición de la huella de carbono, el costo de oportunidad, la infraestructura, la disponibilidad de hidrógeno, la certificación y el acceso a demanda de largo plazo. Si estas condiciones se cumplen, las Américas pueden pasar de ser grandes proveedoras de productos básicos y biocombustibles terrestres a ocupar una posición central en el abastecimiento global de SAF.

Además, los resultados influyen claramente en el diseño de políticas: el desarrollo de SAF en las Américas no requiere abandonar las cadenas agroindustriales en operación, sino mejorar su productividad, recuperar recursos degradados y profundizar en su transformación industrial. Las políticas nacionales deben ser consistentes con el CORSIA y tecnológicamente neutrales, a fin de que los alcoholes, los aceites y las grasas puedan competir como insumos para el ATJ y la HEFA en función de su costo, disponibilidad y desempeño de ciclo de vida.

En el plano internacional convertir esta ventaja productiva en acceso efectivo en los mercados requiere avanzar en el reconocimiento recíproco de metodologías de medición de huella de carbono y certificaciones, fortalecer las señales económicas y las reglas de cumplimiento del CORSIA y evitar que la elegibilidad de materias primas se convierta en una barrera no arancelaria. Una posición hemisférica coordinada en la OACI y otros foros permitiría reducir la fragmentación regulatoria y defender un principio central para la región: la sostenibilidad se debe evaluar según resultados ambientales verificables, no de acuerdo con exclusiones generales de materias primas o rutas tecnológicas (Torroba 2026).

Referencias

CAEP (Comité sobre la Protección del Medioambiente y la Aviación, Canadá). 2022. Informe de factibilidad de un objetivo ambicioso a largo plazo (LTAG) de reducción de las emisiones de CO2 de la aviación civil internacional (en línea). Montreal, Canadá, OACI. 15 p. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/LTAG/Documents/REPORT%20ON%20THE%20FEASIBILITY%20OF%20A%20LONG-TERM%20ASPIRATIONAL%20GOAL_sp.pdf.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2025. FAOSTAT (en línea). Roma. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://www.fao.org/faostat/es/#home.

IATA (Asociación de Transporte Aéreo Internacional, Estados Unidos de América). 2021. Comunicado n.º 66: cero emisiones netas de CO_2 en 2050 (en línea). Boston. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://www.iata.org/contentassets/dcd25da635cd4c3697b5d0d8ae32e159/2021-10-04-03-es.pdf.

IATA (International Air Transport Association, Canadá). 2025. Sustainable aviation fuel (SAF): production estimates and decarbonization contribution.

IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica). 2025. Llamado a la acción para promover la recuperación de suelos en las Américas como base para un sector agrícola más productivo y resiliente en las Américas: IICA/CE/Doc. 787 (25). San José, Costa Rica.

ITC (International Trade Centre, Suiza). 2026. Trade Map: trade statistics for international business development (en línea). Ginebra. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://www.trademap.org/Index.aspx.

Mueller, ND; Gerber, JS; Johnston, M; Ray, DK; Ramankutty, N; Foley, JA. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management (en línea). Nature 490:254-257. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://doi.org/10.1038/nature11420.

Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea. 2023. Reglamento (UE) 2023/2405 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de octubre de 2023 relativo a la garantía de unas condiciones de competencia equitativas para un transporte aéreo sostenible (ReFuelEU Aviation) (en línea). Diario Oficial de la Unión Europea 2405. 31 oct. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302405.

Ritchie, H; Rosado, P; Roser, M. 2022. Crop yields (en línea). Reino Unido, Global Change Data Lab. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://ourworldindata.org/crop-yields.

Torroba, A. 2026. Fortalecer el CORSIA para acelerar el despliegue de los combustibles sostenibles de aviación (SAF) (en línea). San José, Costa Rica, IICA. 33 p. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://repositorio.iica.int/server/api/core/bitstreams/1bf81564-9e3b-4a42-bdb3-be29272a5cd6/content.

Torroba, A; Chiara, A. 2025. Cerrando las brechas de rendimiento agrícola: una alternativa clave y sostenible en la oferta de biocombustibles líquidos: la agricultura como recurso ambiental (en línea). San José, Costa Rica, IICA. 70 p. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://repositorio.iica.int/server/api/core/bitstreams/bb52cced-7e19-4818-8dd9-64e0d66dc51a/content.

Torroba, A; Chiara, A. 2026. Estado de los biocombustibles líquidos en las Américas 2026. San José, Costa Rica, IICA. 136 p. Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://repositorio.iica.int/server/api/core/bitstreams/0e075324-bf55-4b98-b08d-aba26e4c6a6b/content.

UNL (University of Nebraska-Lincoln, Estados Unidos de América); WUR (Wageningen University & Research, Países Bajos). 2025. Global Yield Gap Atlas (en línea). Consultado el 14 de septiembre de 2026. Disponible en https://www.globalyieldgap.org/web/guest/home.

