

# 05

NOTA TÉCNICA  
FEBRERO 2025

olade

ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA | LATIN AMERICAN ENERGY ORGANIZATION | ORGANIZAÇÃO LATINO-AMERICANA DE ENERGIA | ORGANISATION LATINO-AMERICAINE D'ENERGIE

## NOTA TÉCNICA N° 5

# Una introducción al sector de los biocombustibles en América Latina y el Caribe

El rol de los biocombustibles en la descarbonización de la matriz energética



**Nos une la energía**

Este documento fue preparado bajo la dirección de  
**Organización Latinoamericana de Energía  
(OLADE)**

**Andrés Rebolledo Smitmans**  
Secretario Ejecutivo

**Gastón Siroit**  
Asesor Técnico

**Autores**  
Anabella Ruiz  
Gastón Siroit

## CRÉDITOS

La información contenida en este documento surge de bases de datos, información pública, informes de la industria e investigación de los autores. El documento está sujeto a revisiones. OLADE renuncia a cualquier responsabilidad por errores de contenido y no es responsable de ninguna acción tomada por el “Destinatario” o cualquier tercero basada en la información contenida en este documento.

Agradecemos especialmente al Dr. Jorge Hilbert por la generación de insumos que sirvieron de base para la elaboración de esta publicación. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a Alejandra Guzmán, Ángela Livino y Fabio García por sus valiosos aportes y comentarios en la revisión de este documento, los cuales contribuyeron a enriquecer su contenido.

**Primera Edición – Febrero 2025**

**Copyright © OLADE 2025**

Edición: Candelaria Quesada

Arte de tapa: Angel Bastidas

Esta publicación puede ser reproducida en su totalidad o en parte en cualquier formato con fines educativos o sin fines de lucro sin permiso especial de los titulares de los derechos de autor, siempre y cuando se haga referencia a la fuente. Ningún uso de este documento puede ser utilizado para su reventa o cualquier otro propósito comercial sin permiso previo por escrito de OLADE.

**Esta publicación debe citarse como:** A. Ruiz y G. Siroit: “Una introducción al sector de los biocombustibles en América Latina y el Caribe”, OLADE 2025.

### Contacto OLADE

Avenida Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y Fernández Salvador

Edificio OLADE – Sector San Carlos

Quito – Ecuador

Teléfonos: (593 – 2) 2598-122 / 2531-674

[www.olade.org](http://www.olade.org)

## CONTENIDO

CRÉDITOS .....	3
FIGURAS.....	5
GLOSARIO .....	6
1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. MARCO CONCEPTUAL Y PERSPECTIVAS ACTUALES.....	9
2.1. Definición y Caracterización de los biocombustibles .....	9
2.2. Los biocombustibles de bajo carbono .....	11
2.3. Análisis integral de la huella de carbono en biocombustibles .....	12
2.4. Comparativa de alternativas de reducción de emisiones en el transporte.....	14
3. ESTADO ACTUAL DEL BIOETANOL Y EL BIODIESEL EN ALC .....	17
3.1. Evolución durante 2013-2023.....	17
3.2. Situación actual .....	18
3.3. Políticas y Regulaciones Públicas.....	19
4. SOLUCIONES TECNOLÓGICAS INNOVADORAS.....	24
4.1. Combustibles Sostenibles para la Aviación (SAF) .....	24
4.2. Aceite Vegetal Hidrotratado (HVO) .....	28
5. CASO DE ÉXITO Y LECCIONES APRENDIDAS.....	31
5.1. Brasil: Un modelo de éxito de biocombustibles.....	31
5.2. Lecciones aprendidas.....	33
6. CONCLUSIONES.....	35
6.1. Síntesis de oportunidades y desafíos.....	35
ANEXOS.....	37
A. Rutas aprobadas por ASTM para la producción de SAF.....	37
B. Síntesis de Procesos .....	38
C. Macos Normativos en ALC .....	39
REFERENCIAS .....	41

## FIGURAS

Figura 1 - Criterios para clasificación de los biocombustibles.....	9
Figura 2 - Esquema de clasificación de los biocombustibles .....	10
Figura 3 - Clasificación de biocombustibles por generaciones .....	10
Figura 4 – Alternativas de reducción de emisiones en el transporte.....	15
Figura 5 - Producción mundial y regional de biocombustibles .....	17
Figura 6 - Evolución de la producción de biocombustibles en ALC .....	18
Figura 7 - Producción de biocombustibles por país.....	19
Figura 8 - Marcos regulatorios y porcentajes de mezcla de biocombustibles .....	21
Figura 9 - Mandatos de uso de bioetanol en ALC .....	22
Figura 10 - Mandatos de uso de biodiésel en ALC.....	23
Figura 11 - Tres rutas tecnológicas de SAF consideradas .....	26

## GLOSARIO

<b>ACV</b>	Análisis del Ciclo de Vida
<b>ALC</b>	América Latina y el Caribe
<b>ANP</b>	Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles de Brasil
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>AtJ</b>	Alcohol-to-Jet
<b>BNDES</b>	Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social
<b>CCS</b>	Captura y Almacenamiento de Carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>CORSIA</b>	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
<b>FOGs</b>	Fats, Oils, and Greases // Grasas, Aceites y Sebos
<b>FT</b>	Hidro procesamiento de Fischer - Tropsch
<b>GEI</b>	Gases de Efecto Invernadero
<b>gCO<sub>2</sub>eq/MJ</b>	Gramos de Dióxido de Carbono equivalente por Mega Joule
<b>HEFA</b>	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids // Esteres Hidroprocesados y Ácidos Grasos
<b>HVO</b>	Hydrotreated Vegetable Oil // Aceite Vegetal Hidrotratado
<b>IATA</b>	Asociación Internacional de Transporte Aéreo
<b>ISCC</b>	International Sustainability and Carbon Certification
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de Nitrógeno
<b>OACI</b>	Organización de Aviación Civil Internacional
<b>OMI</b>	Organización Marítima Internacional
<b>PNDV</b>	Programa Nacional de Diésel Verde
<b>ProBioQAV</b>	Programa Nacional de Combustible Sostenible para la Aviación
<b>PtL</b>	Power-to-Liquid
<b>RSB</b>	Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles
<b>SAF</b>	Combustible Sostenible de Aviación

## 1. INTRODUCCIÓN

La transición energética hacia un futuro sostenible requiere la incorporación de alternativas renovables y de bajas emisiones que reemplacen paulatinamente a los combustibles fósiles. En este sentido, América Latina y el Caribe (ALC) se encuentra en una posición estratégica para liderar esta transformación, gracias a su abundante potencial de recursos naturales, a la calidad técnica de sus recursos humanos y a la experiencia consolidada en el sector agropecuario.

En el contexto regional, los biocombustibles de bajo carbono emergen como una solución clave para la descarbonización de sectores críticos, como son el transporte terrestre, aéreo y marítimo, donde la dependencia de los combustibles fósiles aún es alta. Producidos a partir de biomasa diversa, como caña de azúcar, maíz, palma, así como residuos agrícolas y forestales, estos combustibles ofrecen una reducción sustancial en las emisiones netas de carbono cuando se evalúan con un enfoque integral del ciclo de vida.

Su compatibilidad con la infraestructura energética y de transporte existente, sin necesidad de realizar modificaciones significativas en motores o sistemas de distribución, posiciona a los biocombustibles como una alternativa viable técnicamente e inmediata para combatir el cambio climático. Además, su producción genera beneficios ambientales y socioeconómicos importantes: impulsa el desarrollo rural, crea empleo, dinamiza la economía agrícola y fomenta la innovación tecnológica, lo que otorga a la región ventajas competitivas únicas.

En 2023, la producción mundial de biocombustibles líquidos alcanzó los 180.544 miles de m<sup>3</sup> (IICA, 2024), de los cuales ALC aportó el 27%, con 47.827 miles de m<sup>3</sup>. Brasil lideró ampliamente la producción regional, representando casi el 25% de la producción global y el 93% de la producción total de ALC (SielLAC, 2024). En la región, el bioetanol y el biodiésel concentraron el 81% y el 19% de la producción de biocombustibles líquidos, respectivamente, con un consumo interno aproximado de 69 litros per cápita en 2023.

A pesar de los avances, la implementación de biocombustibles en ALC enfrenta diversos desafíos. Factores como la baja densidad energética de la biomasa, la dispersión geográfica de los recursos, la competencia por el uso del suelo y la falta de políticas públicas robustas son factores que limitan su potencial. Asimismo, sectores de difícil descarbonización, como el transporte aéreo y marítimo, requieren soluciones tecnológicas avanzadas e innovadoras que demandan mayores inversiones y cooperación internacional.

Mirando hacia el futuro, alcanzar la carbono neutralidad en el sector energético para 2050 requerirá un incremento significativo en la producción regional de biocombustibles líquidos.

Se estima que será necesario aumentar la producción en aproximadamente un 360% respecto a los niveles de 2023, lo que implicaría casi cuadruplicar la producción actual hasta alcanzar los 172.990 miles de m<sup>3</sup> en ALC.

Esta nota técnica analiza el estado actual de los biocombustibles de bajo carbono en América Latina y el Caribe, identificando oportunidades y desafíos clave para maximizar su impacto en la transición energética. El objetivo es posicionar a los biocombustibles como una herramienta sostenible, competitiva y esencial en los esfuerzos regionales y globales para mitigar el cambio climático.

## 2. MARCO CONCEPTUAL Y PERSPECTIVAS ACTUALES

### 2.1. Definición y Caracterización de los biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles derivados de materia orgánica que se obtienen a partir de diversas fuentes, tales como cultivos agrícolas, sus residuos y subproductos, residuos forestales, pecuarios, urbanos e industriales, así como a partir de la interacción de especies vegetales como algas y microorganismos. Al provenir de fuentes biológicas, y en muchos casos, de subproductos de procesos agrícolas e industriales, representan una alternativa a los combustibles fósiles, contribuyendo potencialmente a la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero y a la diversificación de la matriz energética. Sin embargo, su producción debe gestionarse de manera sostenible para evitar impactos negativos, como la competencia con la seguridad alimentaria, la degradación o cambios de uso de suelo de interés ecosistémico y la deforestación.

La conversión de biomasa en energía se lleva a cabo mediante procesos químicos, físicos y biológicos. Entre los métodos más comunes se encuentran la **fermentación**, la **transesterificación**, la **gasificación** y la **digestión anaeróbica**. Estas tecnologías han evolucionado, permitiendo el desarrollo de diversas generaciones de biocombustibles, cada una con características, ventajas y desafíos específicos.

Existen diversos criterios para clasificar a los biocombustibles, entre los cuales se destacan cuatro: su origen, su naturaleza, su tipo y su ruta tecnológica.

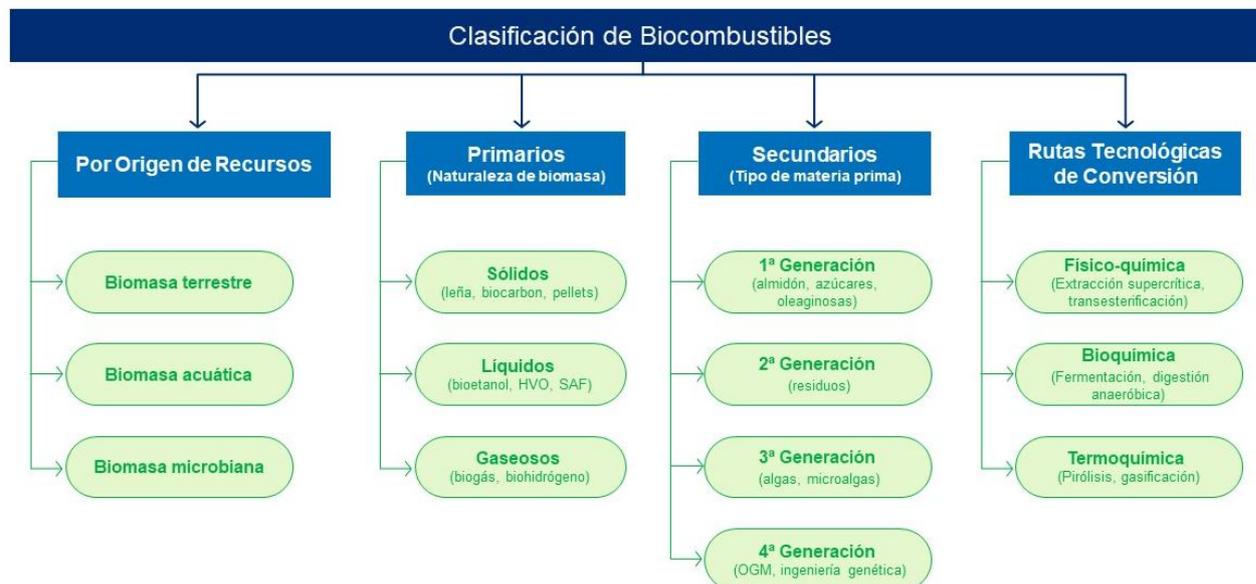
**Figura 1 - Criterios para clasificación de los biocombustibles**

CRITERIOS	CLASIFICACIÓN
ORIGEN	Clasificación según el origen orgánico del recurso
NATURALEZA	Clasificación según el estado del recurso
TIPO	Diferenciación entre el tipo de materia orgánica, recursos alimentarios y no alimentarios
RUTA TECNOLÓGICA	Consideración en base a los procesos empleados para transformar la biomasa en energía.

*Fuente: Elaboración propia*

La siguiente figura, ilustra de forma gráfica la categorización de los biocombustibles

**Figura 2 - Esquema de clasificación de los biocombustibles**



Fuente: Jiménez, M & Castillo, A. (2021)<sup>1</sup>.

Históricamente, se ha ido avanzando con distintas tecnologías, dando nacimiento a nuevos procesos y a nuevas generaciones de biocombustibles. En la tabla a continuación se describen de forma sucinta las materias primas y los procesos asociados a cada una de las **cuatro generaciones de biocombustibles**, resaltando las principales diferencias en la fuente de la biomasa y en los métodos de conversión empleados para obtener el combustible.

**Figura 3 - Clasificación de biocombustibles por generaciones**

GEN.	MATERIA PRIMA	PROCESO
I	Cultivos alimentarios y oleaginosos (maíz, caña de azúcar, soja, aceite de palma)	<b>Fermentación:</b> Producción de bioetanol. <b>Transesterificación:</b> Obtención de biodiésel.
II	Residuos lignocelulósicos (bagazo, paja, restos de poda y otros subproductos no alimentarios)	<b>Hidrólisis enzimática:</b> Conversión de biomasa en azúcares fermentables. <b>Gasificación:</b> Transformación de biomasa en gas de síntesis.
III	Algas y microalgas (organismos de rápido crecimiento cultivables en ambientes no aptos para la agricultura convencional)	<b>Extracción de lípidos:</b> Para producción de biodiésel mediante transesterificación. <b>Fermentación y otros métodos bioquímicos:</b> Conversión en bioetanol y otros combustibles.
IV	Sistemas biotecnológicos avanzados (organismos modificados genéticamente o sistemas integrados que combinan diversas fuentes de biomasa)	<b>Procesos biotecnológicos avanzados:</b> Incluyen técnicas para la producción de combustibles junto con la captura y almacenamiento de CO <sub>2</sub> . <b>Tecnologías emergentes:</b> Integración de métodos tradicionales con innovaciones en ingeniería genética y bioprocesos.

Fuente: Elaboración propia a partir de: Scielo (2021) y Springer Link (2022).

<sup>1</sup> [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2077-99172021000200265&script=sci\\_arttext&lng=en](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2077-99172021000200265&script=sci_arttext&lng=en)

## 2.2. Los biocombustibles de bajo carbono

*Los biocombustibles de bajo carbono son fuentes de energía líquida o gaseosa que, a lo largo de todo su ciclo de vida, emiten cantidades de CO<sub>2</sub> significativamente menores en comparación con los combustibles fósiles convencionales.*

La reducción en las emisiones de GEI se alcanza a través de un enfoque que combina la **selección de materias primas sostenibles** y la **optimización de las tecnologías de conversión de la biomasa en energía**. Esto implica el uso de residuos agrícolas, forestales o cultivos no alimentarios, así como la mejora en los procesos productivos de biocombustibles de primera generación, como el bioetanol y el biodiésel, a través de **prácticas agrícolas más eficientes, reducción del uso de insumos fósiles y avances en la captura de carbono**. De este modo, tanto los biocombustibles avanzados, como los de primera generación pueden desempeñar un papel en la descarbonización del sector energético.

Hay que tener en cuenta, además, que el concepto de combustibles de bajo carbono se enmarca en un contexto normativo que varía según el país o mercado. En Estados Unidos, la Norma de Combustibles Renovables (RFS, por sus siglas en inglés) clasifica los biocombustibles en cuatro categorías:

- Convencionales,
- Avanzados,
- Diésel a partir de biomasa, y
- Celulósicos.

Según esta regulación, los biocombustibles avanzados y el diésel de biomasa deben reducir en un 50% las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) durante su ciclo de vida, mientras que los biocombustibles celulósicos deben lograr una reducción del 60%. En cambio, los combustibles convencionales, como el etanol de maíz, solo requieren una reducción del 20%. Es importante destacar que, una vez que se superan estos umbrales, no se otorgan créditos adicionales por mejoras superiores en la intensidad de carbono.

En el caso de Europa, los límites han evolucionado a lo largo del tiempo, estableciendo requisitos crecientes de reducción de emisiones. Actualmente, se exige que el umbral mínimo de reducción de GEI sea del 65% en comparación con un combustible fósil líquido de referencia (valorado en 94 gCO<sub>2</sub>eq/MJ). Aunque este enfoque incentiva a los productores a cumplir y, en algunos casos, a superar el mínimo requerido para obtener beneficios de mercado, no necesariamente premia a quienes logran reducciones adicionales en la intensidad de carbono.

Brasil, por su parte, cuenta con el programa RenovaBio, creado en 2017 mediante la Ley N° 13.576. Este esquema promueve la producción y el uso de biocombustibles en función de su desempeño ambiental. Para ello, se utiliza un enfoque basado en la certificación de la reducción de emisiones de GEI durante el ciclo de vida del combustible, expresado en la intensidad de carbono ( $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$ ). Los productores y distribuidores certificados reciben Créditos de Descarbonización (CBIO), que se transan en el mercado y permiten a las empresas cumplir con metas anuales de reducción de emisiones. Este sistema incentiva directamente a los actores que logran mejoras más ambiciosas en la reducción de emisiones, diferenciándose así de los enfoques adoptados en Estados Unidos y Europa.

### 2.3. Análisis integral de la huella de carbono en biocombustibles

La huella de carbono de los biocombustibles es un componente crítico para evaluar su impacto climático y su contribución a la reducción neta de emisiones de GEI. Tradicionalmente, la metodología empleada para esta evaluación ha sido el **Análisis del Ciclo de Vida (ACV)**, cuyo enfoque se centra en la identificación y cuantificación de las emisiones en cada una de las siguientes **cuatro etapas**:

#### 1. Producción de la Biomasa:

Se consideran las emisiones derivadas de actividades agrícolas, tales como la siembra, cultivo, cosecha y manejo de la tierra, así como el impacto del cambio en el uso del suelo, que puede implicar tanto liberación como secuestro de carbono.

#### 2. Procesamiento y Conversión:

Se evalúa la eficiencia de los procesos que transforman la biomasa en biocombustibles, integrando el consumo energético y las emisiones asociadas a la conversión.

#### 3. Transporte y Distribución:

Se cuantifican las emisiones generadas por el traslado de la materia prima y del producto final, las cuales varían según la infraestructura y las distancias involucradas.

#### 4. Uso Final y Combustión:

Se analizan las emisiones directas que ocurren durante la combustión del biocombustible, en comparación con las de los combustibles fósiles convencionales.

Aunque el ACV ha sido fundamental para establecer un marco de referencia, presenta ciertas limitaciones, como la complejidad en la recopilación de datos consistentes, la variabilidad regional en las prácticas de manejo agrícola y la dificultad para integrar de manera dinámica los avances tecnológicos, especialmente en tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS). A continuación se precisan con mayor detalle las limitaciones del ACV:

- **Complejidad de Datos y Variabilidad Regional:**

La precisión del ACV depende en gran medida de la calidad y consistencia de los datos utilizados en cada etapa. Las variaciones regionales en prácticas agrícolas, procesos industriales y cambios en el uso del suelo pueden introducir incertidumbres significativas.

- **Desactualización frente a la innovación tecnológica:** Las metodologías tradicionales del ACV a menudo se basan en datos históricos y supuestos que pueden quedar desactualizados ante la rápida evolución tecnológica. Por ejemplo, los avances en tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) y en procesos de conversión altamente eficientes pueden no reflejarse adecuadamente en las evaluaciones actuales.

- **Adopción y adaptación tecnológica:**

La transferencia tecnológica requiere procesos de adaptación al contexto local en el que se va a implementar la tecnología para garantizar tanto la apropiación por parte de los usuarios como el desempeño eficiente y sostenible de las soluciones implementadas.

- **Evaluación del Cambio en el Uso del Suelo:**

La estimación del impacto de la conversión de tierras (por ejemplo, la deforestación o la conversión de tierras agrícolas) es particularmente compleja y puede variar ampliamente según el contexto geográfico y temporal.

Para abordar estas limitaciones, se han desarrollado enfoques más dinámicos y actualizables que enriquecen el análisis integral de la huella de carbono:

#### **ACV Dinámico y Actualizable:**

Incorporar datos en tiempo real a través de sensores, monitoreo satelital y sistemas de información geográfica (SIG) permite capturar variaciones en las prácticas agrícolas y en la eficiencia de los procesos. Este enfoque reduce la incertidumbre asociada a los datos históricos y regionales.

#### **Integración de Tecnologías de CCS:**

Los nuevos modelos de ACV incorporan análisis específicos de las tecnologías CCS utilizadas en plantas de procesamiento. Esto permite evaluar no solo las emisiones

generadas, sino también el CO<sub>2</sub> capturado y almacenado, ofreciendo una perspectiva más precisa de la huella neta.

### **Modelos de Simulación y Escenarios de Innovación:**

La utilización de modelos de simulación que contemplan diversos escenarios tecnológicos y de gestión permite explorar rutas alternativas para la reducción de emisiones. Estos modelos son esenciales para prever el impacto de futuras innovaciones y para guiar la toma de decisiones en políticas energéticas.

### **Enfoques Integrados de Contabilidad del Carbono:**

Algunos estudios recientes proponen marcos integrados que combinan el ACV con análisis de riesgo y evaluaciones económicas. Estos marcos no solo valoran los beneficios ambientales, sino también la viabilidad financiera y las barreras de implementación de nuevas tecnologías, ofreciendo una visión holística del desempeño de los biocombustibles.

La evaluación y gestión de las emisiones de carbono en el ciclo de vida de los biocombustibles requiere un enfoque holístico y dinámico que vaya más allá de las metodologías tradicionales del ACV. La integración de datos en tiempo real, la incorporación de tecnologías de captura y almacenamiento, y el desarrollo de modelos de simulación avanzados son esenciales para superar las limitaciones actuales. Estos enfoques permiten una evaluación más precisa y actualizada de la huella de carbono, facilitando la toma de decisiones informadas en el desarrollo y la implementación de biocombustibles realmente sostenibles. Al adoptar estas metodologías superadoras, se puede maximizar el potencial de los biocombustibles en la mitigación del cambio climático y promover una transición hacia un sistema energético de bajas emisiones.

#### **2.4. Comparativa de alternativas de reducción de emisiones en el transporte.**

Los biocombustibles se han posicionado como una herramienta clave para la descarbonización del sector transporte, uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial. La necesidad de reducir estas emisiones ha impulsado el desarrollo y la adopción de otras tecnologías y estrategias, entre las que destacan los vehículos eléctricos, los combustibles basados en hidrógeno y las medidas de eficiencia energética.

La siguiente tabla compara los principales aspectos de las alternativas para la reducción de emisiones en el transporte, con especial énfasis en el contexto de América Latina y el Caribe.

**Figura 4 – Alternativas de reducción de emisiones en el transporte**

Aspecto	Biocombustibles	Vehículos Eléctricos / Híbridos	Hidrógeno y Combustibles Sintéticos (E-fuels)	Eficiencia Energética
<b>Definición y Fuentes</b>	Fuentes biológicas : residuos agrícolas, forestales, cultivos no alimentarios, etc.	Funcionan con energía eléctrica (VE) o combinan motor eléctrico y de combustión (híbridos).	Uso de hidrógeno (para celdas de combustible) y producción de combustibles sintéticos mediante electrólisis y captura de CO <sub>2</sub> .	Mejoras en la tecnología de motores, aerodinámica y gestión logística sin cambiar la fuente energética.
<b>Evaluación del Ciclo de Vida</b>	Considera todas las etapas: producción de biomasa, procesamiento, transporte y combustión; incluye impactos por cambio en el uso del suelo y la integración de las emisiones residuales, utilizando tecnologías como CCS.	Depende de la fuente de electricidad (matriz energética) y del ciclo de vida de las baterías (producción, uso y reciclaje).	Evalúa la eficiencia en la producción de hidrógeno verde y la incorporación de tecnologías de captura y almacenamiento.	Se centra en la reducción del consumo de energía durante la operación, sin modificar la fuente de energía primaria.
<b>Ventajas</b>	Aprovechamiento de recursos locales, integración con infraestructura existente, generación de ingresos en zonas rurales, fortalecimiento de la seguridad y la soberanía energética.	Emisiones directas nulas durante su operación, alta eficiencia energética, mejora en la calidad del aire urbano y reducción de ruido.	Potencial de emisiones casi nulas si se utiliza electricidad renovable, adecuado para aplicaciones en transporte pesado y adaptable a infraestructuras existentes.	Baja inversión, rápida implementación y reducción inmediata del consumo de combustible.
<b>Limitaciones</b>	Riesgo de competencia con la seguridad alimentaria, Así como de deforestación de áreas de importancia ecosistémica; variabilidad en la disponibilidad y calidad de materias primas, retos en la integración efectiva de CCS.	Requiere una infraestructura robusta de recarga y presenta limitaciones en zonas de difícil acceso Genera impacto ambiental y social asociado a la producción y disposición de baterías y depende de tecnología avanzada y cadenas de suministro especializadas.	Altos costos de producción, infraestructura limitada para almacenamiento y distribución, y menor eficiencia global en comparación con otras alternativas.	Alcance limitado en términos de reducción absoluta de emisiones y necesidad de mejoras tecnológicas continuas en la eficiencia de los vehículos.
<b>Aspectos Económicos e Infraestructura</b>	Potencial retorno de inversión favorable en áreas con abundancia de materias primas, pero depende de políticas públicas y subsidios para fomentar la producción sostenible.	Elevada inversión en infraestructura de recarga y sistemas de gestión de baterías; requiere incentivos y una matriz eléctrica limpia para maximizar beneficios.	Necesita inversiones significativas en tecnología y redes de distribución de hidrógeno; con potencial a mediano-largo plazo en mercados maduros.	Menor inversión inicial y rápida implementación, siendo una estrategia complementaria que potencia otras tecnologías sin requerir cambios estructurales.
<b>Factores Regionales en ALC</b>	Alta disponibilidad de residuos y subproductos agrícolas, diversidad en prácticas de manejo del suelo y variabilidad en datos locales que afectan la precisión de la evaluación.	Ventajas en áreas urbanas con creciente capacidad renovable, pero limitado en regiones con infraestructura eléctrica insuficiente.	Potencial significativo en países con acceso a energías renovables y políticas de innovación, aunque requiere consolidar inversiones en I+D.	Fácil de implementar en diversos contextos, funcionando como una medida inmediata y complementaria para la reducción de emisiones.

Fuente: Elaboración propia

La comparativa de alternativas para la reducción de emisiones en el transporte revela que, si bien cada tecnología presenta ventajas y desafíos específicos, una combinación estratégica de ellas puede generar un impacto significativo en la mitigación del cambio climático. Los avances esperados en la producción de hidrógeno, las mejoras en la tecnología de baterías y las optimizaciones en los procesos de conversión de biomasa contribuirán a aumentar la eficiencia de cada alternativa.

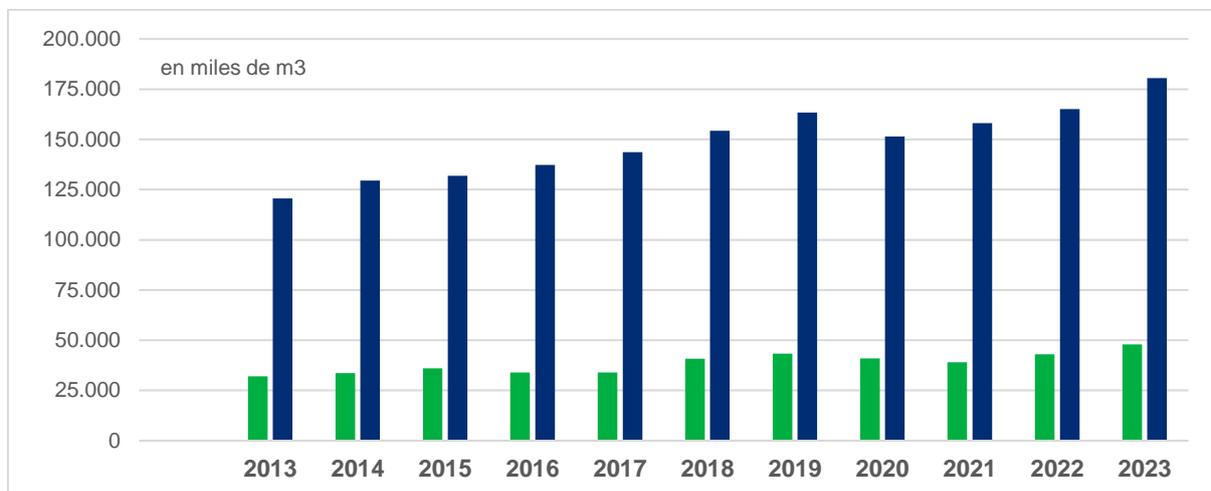
En este contexto, mientras que la electrificación se perfila como la opción determinante para el transporte liviano y urbano y el hidrógeno podrá desempeñar un papel relevante en sectores industriales, en América Latina y el Caribe los biocombustibles líquidos se destacan como una alternativa especialmente viable y prometedora. Su capacidad para aprovechar la abundancia de residuos y subproductos locales, integrarse en infraestructuras existentes y fomentar el desarrollo rural y la innovación tecnológica los posiciona como una herramienta estratégica para la descarbonización del transporte pesado por carretera, el transporte aéreo y el fluvial.

### 3. ESTADO ACTUAL DEL BIOETANOL Y EL BIODIESEL EN ALC

#### 3.1. Evolución durante 2013-2023

Durante la última década, América Latina y el Caribe se ha consolidado como un actor clave en el mercado global de biocombustibles, aportando más de un cuarto de la producción mundial (OLADE, 2024). En 2023, la participación de ALC en la producción de biocombustibles alcanzó un **27%**. Tanto ALC como el mercado global han experimentado un **crecimiento acumulado del 50%** en la producción de biocombustibles durante este período, evidenciando un crecimiento paralelo y sostenido en la región.

**Figura 5 - Producción mundial y regional de biocombustibles**

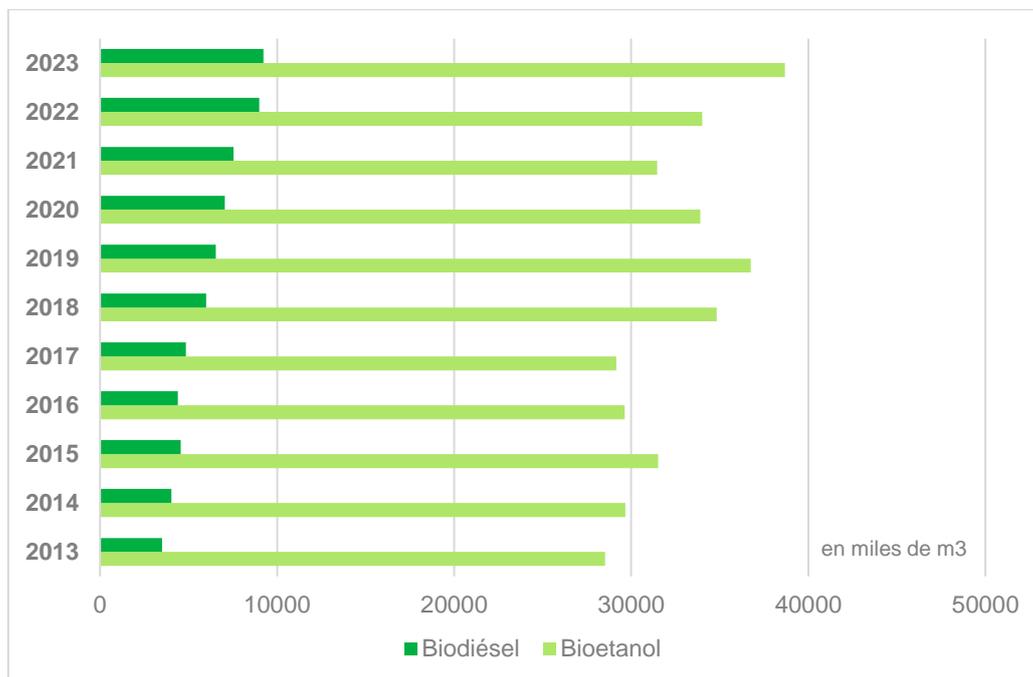


Fuente: SieLAC, IICA (2024)

Latinoamérica cuenta con una producción diversificada de biocombustibles, destacándose el bioetanol, obtenido principalmente a partir de la fermentación de azúcares provenientes de la caña de azúcar y el maíz, y el biodiésel, producido a partir de aceites vegetales como la soja, el girasol y el aceite de palma.

La figura 6 presenta la evolución de la producción bioetanol y biodiésel en América Latina y el Caribe durante la última década.

**Figura 6 - Evolución de la producción de biocombustibles en ALC**



Fuente: SieLAC para ALC entre 2013 y 2023

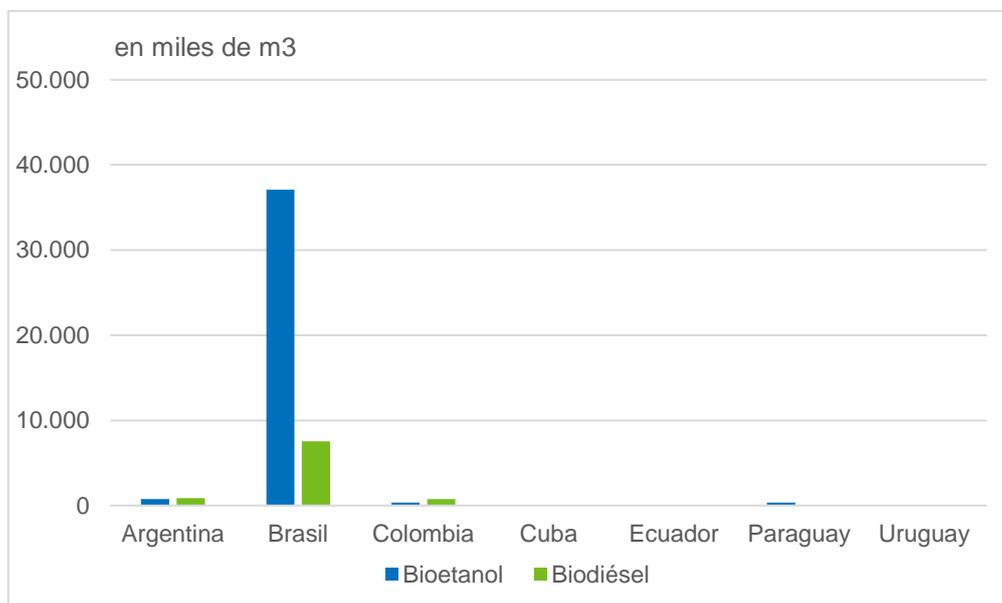
Como puede observarse, ambos biocombustibles han tenido una tendencia general al alza en la última década. Si bien la producción de bioetanol ha sido históricamente superior a la de biodiésel, el análisis de la evolución temporal revela un crecimiento porcentual significativamente mayor en este último. El **biodiésel** ha experimentado un aumento acumulado del **163%** en el período analizado, mientras que el bioetanol ha registrado un crecimiento del 36%. Este dato evidencia una mayor dinamización en la producción de biodiésel, que podría estar relacionada con factores como la diversificación de las fuentes de materias primas y las políticas de promoción específicas para este tipo de biocombustible.

### 3.2. Situación actual

El principal productor de biocombustibles en la región es Brasil, concentrando el 96% de la producción de bioetanol y el 82% de la producción de biodiésel.

En la actualidad existen siete países productores de bioetanol y cinco países productores de biodiésel en la LAC.

**Figura 7 - Producción de biocombustibles por país**



Fuente: SieLAC para 2023

### 3.3. Políticas y Regulaciones Públicas

La producción y el consumo de biocombustibles están estrechamente vinculados a las políticas y regulaciones públicas que promueven su adopción. A nivel global y regional, se han implementado diversas medidas relevantes, entre las cuales destacan:

- **Apoyo a la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i):**  
Los gobiernos y organismos internacionales han impulsado programas de I+D para mejorar las tecnologías de producción, conversión y optimización de biocombustibles. Estas iniciativas incluyen subvenciones, fondos de inversión y programas de colaboración entre instituciones académicas, centros de investigación y la industria, con el objetivo de aumentar la eficiencia y reducir los costos.
- **Incentivos Fiscales y Subsidios:**  
Se ofrecen exenciones fiscales, reducciones impositivas o subsidios directos a la producción y consumo de biocombustibles, medidas destinadas a reducir los costos de producción y mejorar la competitividad de estos frente a los combustibles fósiles.
- **Mandatos de Mezcla o Blending Mandates:**  
Muchos países han establecido obligaciones para incorporar un porcentaje mínimo de biocombustibles en los combustibles fósiles.

- **Créditos de Carbono y Mecanismos de Financiamiento:**

La inclusión de los biocombustibles en esquemas de créditos de carbono permite a los productores obtener ingresos adicionales al demostrar reducciones en la huella de carbono. Además, se han establecido líneas de financiamiento, tanto a nivel nacional como internacional, para proyectos de biocombustibles sostenibles, en ocasiones a través de alianzas público-privadas.

- **Normativas de Sostenibilidad y Certificación:**

Se han desarrollado estándares y certificaciones que garantizan que los biocombustibles se produzcan de manera sostenible. Estas regulaciones exigen evaluaciones de impacto ambiental (como el Análisis del Ciclo de Vida) y medidas de gestión responsable de la biomasa, lo que ayuda a asegurar que los beneficios ambientales no se vean comprometidos por acciones que puedan actuar como motores directos de deforestación o la competencia con la producción de alimentos.

- **Políticas de Transición Energética y Estrategias Nacionales:**

Varios países han integrado los biocombustibles dentro de sus planes y estrategias de transición energética. Estas políticas establecen metas de reducción de emisiones y de aumento en el uso de energías renovables, creando un marco normativo que facilita la inversión y el desarrollo de infraestructuras para biocombustibles.

De todas estas medidas, los **mandatos de mezcla** han demostrado tener mayor difusión e impacto. Al establecer cuotas mínimas, estos instrumentos reguladores crean un mercado asegurado para los biocombustibles, lo que estimula la inversión y facilita la expansión de la infraestructura necesaria para su producción y distribución.

El cuadro a continuación resume los marcos regulatorios adoptados por los países de la región y los porcentajes de mezcla que poseen en la actualidad.

(Nota: Para más detalle consultar el Anexo 3.)

**Figura 8 - Marcos regulatorios y porcentajes de mezcla de biocombustibles**

PAIS	ETANOL	DIÉSEL	LEY
Argentina	12%	7,5%	27.640 / 2021
Bolivia	25%	25%	Decreto Supremo 5.135 /2024
Brasil	27%	14%	8.723 / 1993 y 11.097 / 2005
Chile	N/A	5%	20.257 / 2008
Colombia	10%	10%	Resolución 40447 de 2022
Costa Rica	7%	N/A	36.447 – MINAE
Ecuador	5%	5%	Ley de Fomento Biocombustibles
El Salvador	10%	N/A	Promoción de Bios 2011
Guatemala	5%	N/A	Promoción de Bios 2008 + AG-159-2023
Jamaica	10%	N/A	Programa Nacional Etanol 2008
México	10% <sup>2</sup>	N/A	Promoción de Biocombustibles 2008
Panamá	5%	N/A	42 / 2011
Paraguay	30%	5%	2.748 / 2005
Perú	7,8%	5%	28.054 / 2003
Rep. Dominicana	15%	N/A	57-07
Uruguay	8,5%	N/A	18.195 / 2007 y 2022

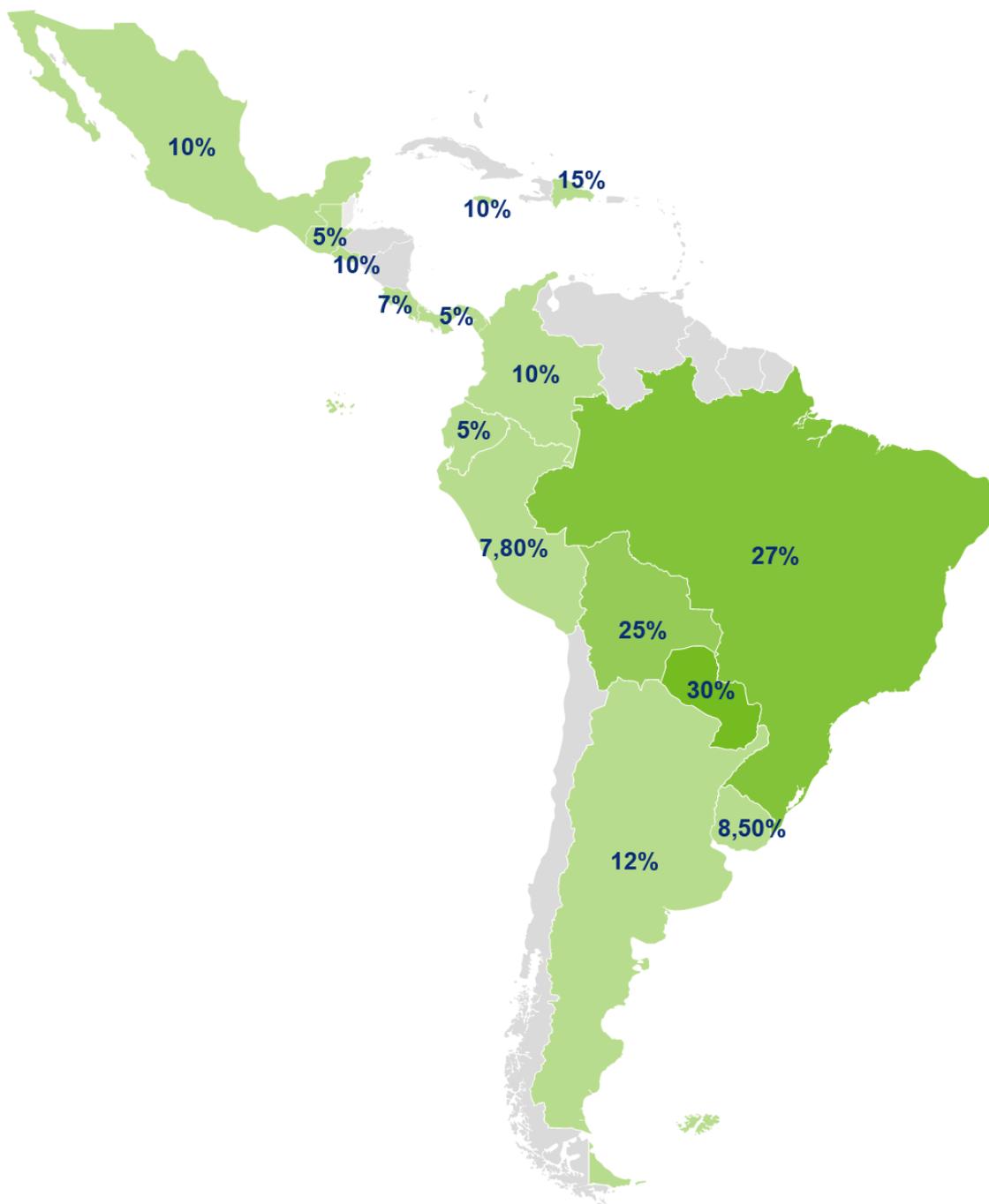
*Fuente: Elaboración Propia (ALC 2024)*

**Nota:** La información reflejada se basa en los marcos regulatorios y datos disponibles hasta la fecha de actualización (2024).

**Aclaración:** Los porcentajes de mezcla pueden variar según actualizaciones normativas y condiciones del mercado; se recomienda consultar fuentes oficiales para obtener la información más reciente.

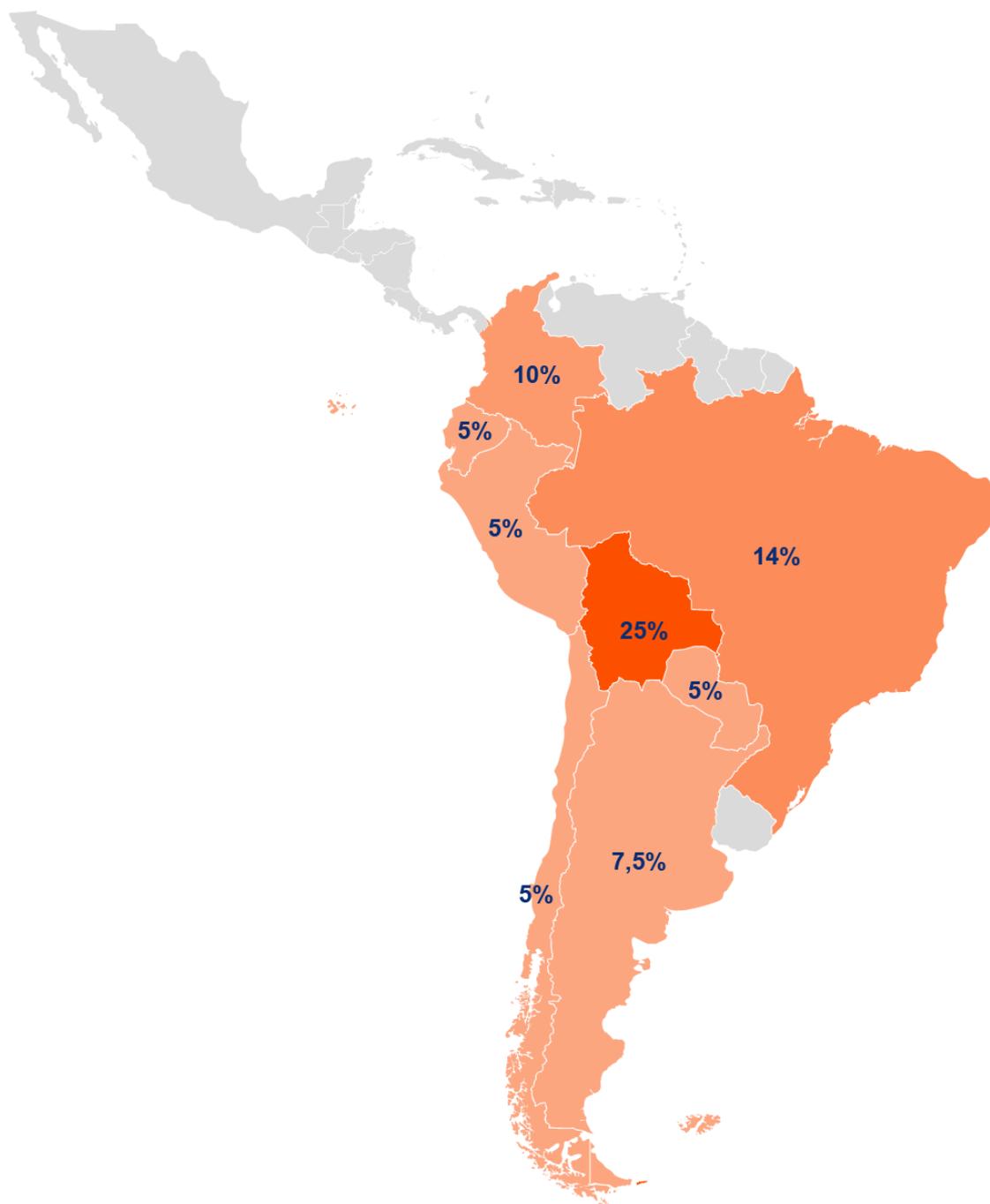
<sup>2</sup> En algunos Estados

**Figura 9 - Mandatos de uso de bioetanol en ALC**



Fuente: Elaboración Propia (ALC 2024)

**Figura 10 - Mandatos de uso de biodiésel en ALC**



*Fuente: Elaboración Propia (ALC 2024)*

## 4. SOLUCIONES TECNOLÓGICAS INNOVADORAS

Existe una oportunidad creciente en América Latina y el Caribe para expandir las políticas de promoción de los biocombustibles más allá del transporte terrestre—históricamente el foco principal debido a su alto consumo energético—hacia sectores como la aviación y el transporte marítimo, que, aunque representan una parte significativa de la demanda de energía y las emisiones de carbono, han recibido menos atención en el pasado. Sin embargo, este escenario está evolucionando, y las nuevas políticas comienzan a integrar de manera más clara estos sectores, abriendo un camino para su descarbonización. En este contexto, los biocombustibles avanzados, como el Sustainable Aviation Fuel (SAF) y el Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), están cobrando relevancia al ofrecer soluciones viables para reducir las emisiones en la aviación y el transporte marítimo, respectivamente, e incluso en la industria pesada, donde la electrificación enfrenta desafíos significativos.

### 4.1. Combustibles Sostenibles para la Aviación (SAF)

El sector de aviación contribuye con el 2,5% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>e, que equivale a unos 1.000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año (IEA, 2024). En 2021, la industria, representada por la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA), se comprometió a alcanzar cero emisiones netas de carbono para 2050. Un compromiso similar fue adoptado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en 2022.

El progreso de estos objetivos se está logrando a través de múltiples mejoras en el diseño de aeronaves, la eficiencia de los motores, las mejoras en el transporte terrestre, los sistemas de control del tráfico aéreo y otras medidas. Sin embargo, el uso de Combustible Sostenible de Aviación (SAF) desempeñará el papel más importante para que el sector alcance sus objetivos de descarbonización para 2050 (IATA, 2022).

Las 4 principales estrategias<sup>3</sup> para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>, y alcanzar el escenario de Cero Emisiones al 2050, requiere una combinación de múltiples acciones entre las cuales se menciona:

- ✓ SAF, siendo el responsable del 65%
- ✓ Compensación por captura de carbono, con el 19%
- ✓ Nuevas tecnologías eléctricas y la incorporación de hidrógeno, con el 13%
- ✓ Infraestructura y eficiencia operacional, con el 3%

---

<sup>3</sup> <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/>

Los SAF constituyen una categoría de biocombustibles avanzados destinados a reducir la huella de carbono del sector aéreo. Se producen a partir de diversas materias primas y tecnologías, y pueden reemplazar parcialmente o en su totalidad el combustible de aviación convencional sin necesidad de modificar los motores o la infraestructura de suministro.

El SAF tiene el potencial de disminuir las emisiones de GEI hasta en un 80 % en comparación con el combustible fósil. Su uso también reduce la emisión de contaminantes atmosféricos, como material particulado y óxidos de azufre, mejorando la calidad del aire. La magnitud de estas reducciones depende del tipo de materia prima y del proceso de conversión empleado.

Actualmente, existen 11 rutas tecnológicas<sup>4</sup> de conversión aprobadas y 42 fuentes de materia prima certificadas para la producción de SAF (Torroba, 2023). Las **rutas tecnológicas** son los distintos procesos industriales utilizados para convertir materias primas en un producto final con características específicas. En el caso del SAF las rutas tecnológicas se refieren a los métodos aprobados y en desarrollo para producir este combustible a partir de fuentes renovables como biomasa, residuos agrícolas, aceites vegetales, grasas animales o incluso CO<sub>2</sub> capturado.

Cada ruta tecnológica involucra diferentes procesos de transformación química, como **hidrotratamiento, hidrocrackeo, gasificación, fermentación o síntesis catalítica**, que permiten obtener un combustible con propiedades similares al queroseno fósil utilizado en aviación. Estas rutas deben cumplir con estándares internacionales, como la norma **ASTM D7566 o D1655**, para garantizar su seguridad, compatibilidad y rendimiento en motores de aeronaves. No todas las rutas tecnológicas han logrado el mismo desarrollo y volumen de procesamiento. El diagrama a continuación presenta las características de cada una de las rutas principales.

---

<sup>4</sup> <https://www.icao.int/environmental-protection/SAF/Pages/Conversion-processes.aspx>

**Figura 11 - Tres rutas tecnológicas de SAF consideradas**



Fuente: Walter A. et al <sup>5</sup>

La tecnología **HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)** es actualmente la única disponible comercialmente a gran escala para la producción de SAF. En 2023, se estimó una producción total de 1.29 millones de toneladas métricas, de las cuales aproximadamente 1.21 millones de toneladas provinieron de HEFA<sup>6</sup>, representando cerca del **94% de la producción de SAF**. Un análisis de la IEA Bioenergy Task, destaca que, si bien HEFA se ha consolidado como la tecnología predominante para SAF, su desarrollo ha estado ligado principalmente a la producción de **diésel renovable**. En los últimos años, varias refinerías han comenzado a

<sup>5</sup> [\(PDF\) Spatially Explicit Assessment of the Feasibility of Sustainable Aviation Fuels Production in Brazil: Results of Three Case Studies](#)

<sup>6</sup> [https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/crude-oil/120623-saf-production-to-triple-to-15-mil-mt-in-2024-but-progress-slow-iata?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/crude-oil/120623-saf-production-to-triple-to-15-mil-mt-in-2024-but-progress-slow-iata?utm_source=chatgpt.com)

incrementar la proporción destinada a SAF, influenciadas por incentivos regulatorios en mercados clave como Estados Unidos y la Unión Europea. No obstante, la viabilidad económica sigue siendo un obstáculo, ya que la producción de diésel renovable suele resultar más atractiva financieramente.

Otro de los principales desafíos de esta tecnología radica en la **disponibilidad y sostenibilidad de las materias primas**. Aunque la producción global de aceites vegetales supera los **220 millones de toneladas métricas anuales**, su uso exclusivo en SAF no alcanzaría para cubrir la demanda futura proyectada, que superará los **400 mil millones de litros en 2050**. Además, la obtención de insumos de baja intensidad de carbono, como **grasas, aceites usados y residuos (FOGs)**, podría limitar tanto la producción de SAF como la de diésel renovable.

Para abordar estas limitaciones, se requiere **diversificar las rutas tecnológicas** y fomentar el desarrollo de alternativas como **FT (Fischer-Tropsch)**, **AtJ (Alcohol-to-Jet)** y **PtL (Power-to-Liquid)**, con el objetivo de garantizar un suministro sostenible y reducir la dependencia exclusiva de HEFA.

El SAF se puede mezclar con el combustible convencional en proporciones de entre **10 % y 50 %**, dependiendo de la tecnología utilizada y las certificaciones de seguridad aeronáutica.

La variedad de rutas tecnológicas y materias primas sugiere un futuro mercado competitivo y en expansión. Sin embargo, la selección de la mejor opción dependerá del balance entre costos, disponibilidad y el impacto ambiental real de cada alternativa.

El SAF debe cumplir con estrictos estándares de calidad y certificación, como los establecidos por **ASTM International**, para garantizar su seguridad y compatibilidad con los motores de aeronaves. Además, iniciativas como **CORSIA** (Esquema de Reducción y Compensación de Carbono para la Aviación Internacional) impulsan su adopción global al exigir reducciones verificadas de emisiones en el sector aéreo.

Para los países latinoamericanos, la producción y suministro de SAF representa una oportunidad estratégica. A medida que CORSIA avance, la región necesitará fortalecer su capacidad productiva para abastecer tanto el tráfico intrarregional como el internacional. No obstante, cumplir con los estándares internacionales requiere que los productores sigan ciertos pasos clave:

- **Sostenibilidad:** Asegurar que los biocombustibles cumplan con criterios ambientales, como la reducción de emisiones de GEI y la conservación de la biodiversidad. Asimismo, resulta clave avanzar hacia esquemas de producción que promuevan la

circularidad, mediante la gestión adecuada de residuos y el aprovechamiento de subproductos.

- **Certificación:** Obtener acreditaciones como **RSB (Mesa Redonda sobre Energías Renovables)** o **ISCC (International Sustainability and Carbon Certification)**, que garanticen el cumplimiento de estándares internacionales.
- **Transparencia:** Implementar sistemas de trazabilidad en toda la cadena de suministro para verificar el cumplimiento de las normas de sostenibilidad.

En ese sentido, resultará fundamental el desarrollo de mecanismos regulatorios y financieros que fomenten la inversión en infraestructura e I+D, garanticen la disponibilidad de materia prima, permitan afrontar los altos costos de producción y de certificación.

Para la región se presentan grandes oportunidades, tanto en el aprovechamiento de los residuos agroindustriales y urbanos, como en el desarrollo de nuevos cultivos. Estos últimos estarán principalmente vinculados a la exploración de nichos agroecológicos, aprovechando áreas y períodos del año que actualmente no se utilizan para la captación de carbono a través de la fotosíntesis. Sin embargo, dada la brecha entre la oferta de materia prima y la creciente demanda global de SAF, será clave revisar las restricciones regulatorias sobre el uso de aceites comerciales, como los de soja y otras oleaginosas, asegurando su integración bajo protocolos de sostenibilidad reconocidos.

Dado el enorme desfasaje entre el volumen de materia prima disponibles y la demanda creciente de SAF es deseable que en el futuro cercano se flexibilicen y levanten las barreras regulatorias que impiden una mayor participación de los aceites comerciales como el de soja u otras oleaginosas bajo protocolos de sustentabilidad.

#### 4.2. Aceite Vegetal Hidrotratado (HVO)

El transporte marítimo representa cerca del 3%<sup>7</sup> de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, según la Organización Marítima Internacional (OMI). En 2023, durante la primera revisión programada de su estrategia de GEI, los estados miembros acordaron alcanzar cero emisiones netas de GEI para 2050 y establecer niveles de ambición más altos y puntos de control indicativos para 2030 y 2040. Para lograr estos objetivos, el sector deberá adoptar combustibles de bajo carbono, entre los que destaca el **HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)** como una alternativa viable.

---

<sup>7</sup> <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

El aceite vegetal hidrotratado o HVO, es un biocombustible avanzado de segunda generación que se distingue por su excelente compatibilidad con motores diésel convencionales y por generar un menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles. Aunque su nombre sugiere una exclusividad hacia los aceites vegetales, el HVO también se puede producir a partir de diversas materias primas, como grasas animales, aceite de cocina usado (UCO, Used Cooking Oil) y tall oil, un subproducto de la industria papelera.

El HVO se obtiene mediante un proceso de **hidrotratamiento**, en el cual el hidrógeno de alta pureza es utilizado para eliminar oxígeno, azufre y otras impurezas de los aceites y grasas. A altas temperaturas y presión, las moléculas de grasa se dividen y se transforman en hidrocarburos saturados con propiedades prácticamente idénticas al diésel fósil. Este proceso mejora la estabilidad del combustible y le otorga una mayor densidad energética, superando en calidad y desempeño al **biodiésel**, el cual presenta ciertas limitaciones en términos de estabilidad y compatibilidad con los motores diésel modernos.

En la última década la producción de HVO tuvo un incremento aproximado del 538 % para reemplazar al diésel. Se estima que en 2023 su producción alcanzó los 15069000 m<sup>3</sup> y ya representa el 25 % del biodiésel total producido (IICA, 2024)

El mercado global de HVO fue valorado en 20,82 mil millones de dólares en 2023 y se proyecta que alcance los 51,93 mil millones de dólares para 2030 ( NMSC, 2024).

El HVO representa una alternativa renovable y sostenible al diésel convencional, derivado de materias primas como aceites vegetales y grasas animales. Su producción implica un proceso de hidrotratamiento que elimina impurezas y reduce el contenido de oxígeno, lo que da como resultado un biocombustible de alta calidad y bajas emisiones, compatible con los motores diésel existentes

El producto final es un combustible **químicamente similar al diésel convencional**, lo que permite su uso puro (**HVO100**) o mezclado en cualquier proporción sin necesidad de modificaciones en motores o infraestructura de distribución.

El HVO ofrece múltiples **beneficios** en comparación con los combustibles diésel tradicionales y otras alternativas renovables:

- › **Reducción de emisiones:** Su combustión genera significativamente **menos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**, **material participado y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)** en comparación con el diésel fósil. Dependiendo de la materia prima utilizada, las emisiones de **GEI pueden reducirse hasta en un 90 %** a lo largo del ciclo de vida del combustible.

- › **Alto rendimiento en climas fríos:** A diferencia del biodiésel, el HVO tiene una excelente estabilidad a bajas temperaturas, lo que evita problemas de filtrabilidad y permite su uso en condiciones climáticas extremas sin requerir aditivos adicionales.
- › **Compatibilidad total:** Se puede utilizar sin restricciones en motores diésel existentes y en la infraestructura de distribución de combustibles, facilitando su adopción sin costos adicionales en nuevas tecnologías.

Estas cualidades convierten al HVO en una solución clave para sectores de difícil descarbonización como **el transporte pesado, marítimo y la industria**, donde las opciones de electrificación aún son limitadas.

A pesar de sus ventajas, el desarrollo y la adopción del HVO enfrentan **desafíos** significativos:

- **Costos de producción elevados:** Debido al uso de hidrógeno en el proceso de hidrotratamiento y las etapas adicionales de refinado, el costo de producción del HVO es superior al del biodiésel, con valores estimados entre **1,5 y 2,5 dólares por litro**. Sin embargo, estos costos pueden compensarse parcialmente por su mayor eficiencia y menor impacto ambiental.
- **Disponibilidad de hidrógeno sostenible:** La producción de HVO depende de un suministro de hidrógeno de alta pureza, cuyo impacto ambiental varía según su fuente. Para maximizar los beneficios climáticos del HVO, es clave desarrollar **hidrógeno verde** (producido a partir de electrólisis con energías renovables) en lugar de hidrógeno de origen fósil.
- **Acceso a materias primas sostenibles:** La creciente demanda global de biocombustibles está generando presión sobre la disponibilidad de aceites vegetales y residuos orgánicos. Para evitar impactos no deseados en la seguridad alimentaria y el uso del suelo, es fundamental diversificar las fuentes de materia prima y optimizar su trazabilidad bajo estrictos criterios de sostenibilidad.

## 5. CASO DE ÉXITO Y LECCIONES APRENDIDAS

### 5.1. Brasil: Un modelo de éxito de biocombustibles

Brasil es el segundo productor mundial de etanol, después de Estados Unidos, y ha construido una de las industrias de biocombustibles más avanzadas y sostenibles del mundo. Su modelo de desarrollo ha sido resultado de una combinación de políticas públicas, avances tecnológicos y una integración efectiva entre el sector agrícola y energético. Desde la década de 1970, con la implementación del Programa Nacional del Alcohol (Proálcool), el país ha promovido el etanol de caña de azúcar como alternativa a los combustibles fósiles, logrando una infraestructura robusta que hoy abastece a una de las flotas vehiculares más grandes del mundo con capacidad de operar con biocombustibles.

El programa Proálcool surgió como respuesta a la crisis del petróleo y permitió la creación de un mercado para el etanol mediante incentivos fiscales, financiamiento a la producción e infraestructura para su distribución. Por su parte, la adopción de vehículos flex-fuel a partir de 2003 marcó un punto de inflexión en la industria. Actualmente, más del 80% de los autos livianos en Brasil son capaces de operar con gasolina, etanol o una mezcla de ambos, lo que garantiza un mercado estable para el biocombustible. Esta flexibilidad, sumada a un mandato de mezcla que oscila entre un mínimo del 18% y un valor de referencia que se encuentra actualmente en 27% de etanol anhidro en la gasolina, ha consolidado la presencia del etanol en el mercado doméstico.

El éxito del modelo brasileño también radica en su integración con el sector agroindustrial. Brasil cuenta con condiciones climáticas ideales para la producción de caña de azúcar, lo que permite una alta eficiencia y bajos costos de producción. Además, la industria azucarera y la de etanol han logrado una relación sinérgica en la que el etanol actúa como un mecanismo de estabilidad financiera frente a la volatilidad de los precios del azúcar. Un aspecto adicional que refuerza la sostenibilidad del modelo es el aprovechamiento del bagazo de caña para la cogeneración de energía eléctrica, lo que permite que muchas plantas sean autosuficientes energéticamente y contribuyan al sistema eléctrico nacional.

En 2017, Brasil implementó el programa RenovaBio, un marco regulatorio orientado a la reducción de emisiones en el sector de biocombustibles. A través de este esquema, se han establecido metas de descarbonización para los distribuidores de combustibles y se han creado los Créditos de Descarbonización (CBIOs), que incentivan la producción de biocombustibles con menor huella de carbono.

El programa RenovaBio utiliza un enfoque de medición de emisiones basado en la generación y comercialización de CBIOS. Para calcular las emisiones asociadas a cada biocombustible y determinar la cantidad de CBIOS que pueden emitirse, el programa aplica diversos factores y metodologías. Entre ellos, se encuentran el Factor de Emisión de Carbono, que define la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero generadas a lo largo del ciclo de vida del biocombustible, y la Certificación de Biocombustibles, que exige a los productores demostrar la reducción de emisiones de GEI en su cadena de producción.

El estándar específico que rige este proceso es el Padrón RenovaBio (Resolución ANP nº 758/2018), que establece los parámetros y metodologías para la certificación de eficiencia energética y la reducción de emisiones. La certificación es realizada por entidades certificadoras acreditadas por la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP), auditores independientes y consultorías especializadas, garantizando así la integridad y precisión del cálculo de emisiones. Basándose en estas certificaciones, se asignan CBIOS a cada productor de biocombustibles, los cuales pueden ser comercializados en el mercado de carbono como un instrumento para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones establecidos por el programa RenovaBio.

El papel del Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES) ha sido clave en la consolidación del sector, proporcionando financiamiento para la expansión de la industria de biocombustibles, modernización de plantas y desarrollo de nuevas tecnologías. A través de su programa BNDES RenovaBio, lanzado en 2021, ha financiado mejoras en la eficiencia energética y ambiental de las plantas de biocombustibles. Hasta la fecha, el programa ha aprobado 12 operaciones con un financiamiento total cercano a 195 millones de dólares, beneficiando a empresas como FS Bioenergía y Alcoeste, que han optimizado sus procesos productivos y obtenido certificaciones de sostenibilidad. Además, el BNDES ha impulsado la producción de etanol de segunda generación (2G), con un financiamiento reciente de 1.000 millones de reales para la empresa Raízen, lo que permitirá aumentar la capacidad nacional en 440 millones de litros de biocombustible.

En octubre de 2024, Brasil aprobó la Ley del Combustible del Futuro, cuyo objetivo es reforzar la competitividad del etanol y otros biocombustibles en el contexto de la transición energética. La legislación establece programas nacionales para promover combustibles sostenibles y reducir las emisiones del sector transporte. Entre sus iniciativas clave se encuentran el Programa Nacional de Combustible Sostenible para la Aviación (ProBioQAV), que exige una reducción progresiva de emisiones en vuelos nacionales mediante el uso de biocombustibles sostenibles, comenzando con un 1% en 2027 y llegando al 10% en 2037. Asimismo, el

Programa Nacional de Diésel Verde (PNDV) establece cuotas mínimas anuales de mezcla de diésel verde con diésel fósil, reguladas por el Consejo Nacional de Política Energética.

Otro eje de la ley es el Programa Nacional de Descarbonización de los Productores e Importadores de Gas Natural y de Incentivo al Biometano, que busca promover la investigación, producción y uso de biometano y biogás en la matriz energética brasileña, con metas de reducción de emisiones desde el 1% en 2026 hasta un 10% en el futuro. Además, la ley eleva el margen para la mezcla de etanol en la gasolina del 22% al 27%, con la posibilidad de aumentarlo hasta el 35% en el futuro. En paralelo, establece un incremento gradual en la mezcla de biodiésel en el diésel, aumentando un punto porcentual cada año a partir de 2025 hasta alcanzar el 20% en 2030.

El caso de Brasil demuestra que el desarrollo de los biocombustibles requiere una estrategia integral que combine regulación, tecnología y una industria bien estructurada. Las políticas de largo plazo han sido clave para garantizar la estabilidad del sector, mientras que la disponibilidad de vehículos flex-fuel ha facilitado la adopción del etanol en el mercado interno. La sostenibilidad ha sido otro factor determinante, con una producción basada en fuentes renovables y procesos que reducen significativamente las emisiones de carbono. Dada la experiencia acumulada, la implementación y los resultados alcanzados, este marco debería considerarse a nivel regional para generar un efecto virtuoso que impulse el desarrollo de biocombustibles de bajas emisiones en América Latina y el Caribe.

## 5.2. Lecciones aprendidas

El caso de Brasil ofrece valiosas lecciones para América Latina y el Caribe sobre cómo el desarrollo de los biocombustibles puede articularse con políticas públicas de largo plazo, avances tecnológicos e integración entre los sectores agrícola y energético. Sin embargo, la experiencia brasileña también ha evidenciado desafíos relevantes que deben ser considerados. La expansión de la agroindustria de cultivos como la caña de azúcar y la soja, destinados en parte a la producción de biocombustibles, ha sido señalada como un factor que contribuyó a la deforestación, la pérdida de biodiversidad y conflictos por el uso de la tierra en regiones sensibles como el Amazonas y el Cerrado. Estos impactos socio ambientales generaron críticas a nivel internacional y resaltaron la necesidad de prevenir cambios indirectos en el uso del suelo (ILUC), así como de garantizar que la producción se realice bajo estándares que protejan tanto los ecosistemas como los derechos de las comunidades locales.

Por lo tanto, una de las principales lecciones es que el crecimiento del sector debe ir acompañado de marcos de sustentabilidad robustos, mecanismos de monitoreo ambiental y social, y la participación activa de las comunidades rurales. Asegurar que la expansión de los biocombustibles contribuya simultáneamente a la reducción de emisiones, la conservación ambiental y el desarrollo local será clave para consolidar un modelo regional sostenible y competitivo.

## 6. CONCLUSIONES

### 6.1. Síntesis de oportunidades y desafíos

En el contexto regional, los biocombustibles de bajo carbono emergen como una solución clave para la descarbonización de sectores críticos, como son el transporte terrestre, aéreo y marítimo, donde la dependencia de los combustibles fósiles sigue siendo significativa.

En 2023, la producción mundial de biocombustibles líquidos alcanzó los 180.544 miles de m<sup>3</sup> (IICA, 2024), de los cuales ALC aportó el 27%, con 47.827 miles de m<sup>3</sup>. Brasil lideró ampliamente la producción regional, representando casi el 25% de la producción global y el 93% de la producción total de ALC (SieLAC, 2024). En la región, el bioetanol y el biodiésel concentraron el 81% y el 19% de la producción de biocombustibles líquidos, respectivamente, con un consumo interno aproximado de 69 litros per cápita en 2023.

ALC cuenta con ventajas competitivas clave para consolidar su liderazgo en este sector. La región dispone de agro ecosistemas óptimos con temperatura, agua y suelos adecuados, junto con cadenas de producción eficientes y tecnológicamente avanzadas. La competitividad de cultivos como la caña de azúcar, la soja y la palma de aceite ha permitido consolidar una presencia destacada en los mercados internacionales. Además, la existencia de marcos regulatorios con mandatos de mezcla en varios países ha generado una demanda estable, respaldada por asociaciones sectoriales que han promovido estándares y certificaciones. A estas fortalezas se suma el potencial de generación de empleo en comunidades rurales, contribuyendo al desarrollo económico y social.

Las perspectivas de crecimiento se ven impulsadas por la creciente demanda de biocombustibles en sectores difíciles de electrificar, como la aviación y el transporte marítimo. La combinación de biocombustibles avanzados con hidrógeno verde y la captura de carbono abrirán nuevas posibilidades para reducir aún más las emisiones del sector transporte. Adicionalmente, los avances en biotecnología y la optimización de biorefinerías pueden mejorar la eficiencia de producción y generar sinergias con otras tecnologías renovables, como el biogás. La experiencia de Brasil en sistemas de incentivos y certificación ofrece un modelo replicable en otros países de la región para incentivar la reducción de emisiones y la integración con la industria de hidrocarburos.

No obstante, la expansión del sector estará condicionada por el cumplimiento de requisitos de sustentabilidad cada vez más exigentes en los mercados internacionales. Factores como el cambio indirecto en el uso del suelo, la pérdida de biodiversidad, la gestión de subproductos o productos residuales y la posible competencia con cultivos alimentarios representan

desafíos que requieren atención. Además, la aparición de tecnologías disruptivas en otras fuentes de energía renovable podría modificar el equilibrio actual del mercado.

Ante este escenario, tendrán un rol preponderante las políticas que proporcionen estabilidad y previsibilidad al sector, promoviendo incentivos alineados con los beneficios socio ambientales de los biocombustibles. Asimismo, resulta clave fortalecer la infraestructura logística y de almacenamiento para reducir costos y optimizar la comercialización. Además, la implementación de sistemas de trazabilidad y monitoreo mediante tecnologías avanzadas permitirá asegurar que la producción regional cumpla con los estándares ambientales y sociales que rigen el comercio internacional de combustibles sostenibles.

Para consolidar su posición en los mercados globales, ALC deberá también fortalecer los mecanismos de financiamiento a lo largo de toda la cadena productiva y promover la cooperación regional en materia de investigación, innovación y certificación. Estos esfuerzos permitirán aprovechar plenamente el potencial de los biocombustibles de bajo carbono como una herramienta esencial en la transición energética y el desarrollo sostenible de la región.

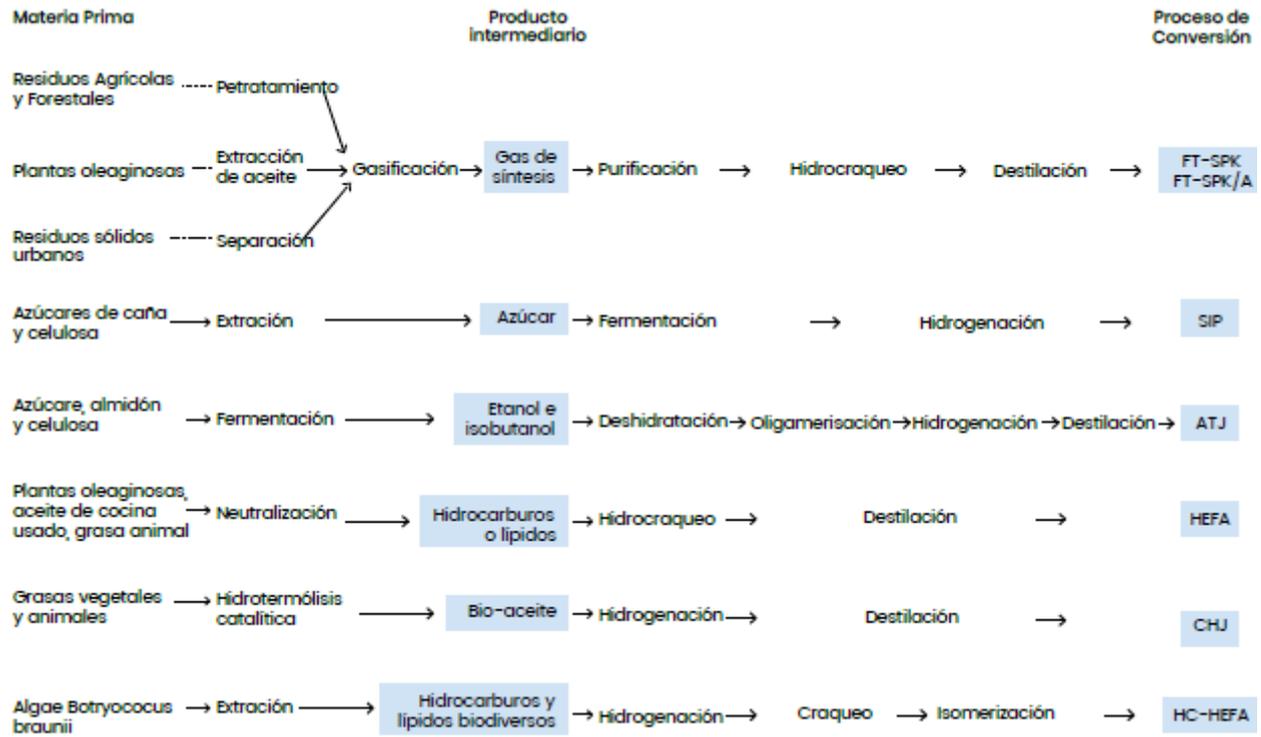
## ANEXOS

### A. Rutas aprobadas por ASTM para la producción de SAF

RUTA	ASTM	NOMBRE	AÑO	MATERIA PRIMA	MEZCLA
1	D7566 Anexo 1	<b>FT-SPK</b> <i>Fischer-Tropsch - Synthetic Paraffinic Kerosene</i>	2009	<b>Biomasa lignocelulósica:</b> Residuos agrícolas y forestales (bagazo y rastrojo de caña de azúcar y desechos municipales)	Hasta 50%
2	D7566 Anexo 2	<b>HEFA-SPK</b> <i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids - Synthetic Paraffinic Kerosene</i>	2011	<b>Aceites y grasas:</b> Camelina, Jatropha, aceites de ricino, de palma y de cocina usado y grasa animal	Hasta 50%
3	D7566 Anexo 3	<b>HFS-SIP</b> <i>Hydroprocessed Fermented Sugars - Synthetic Iso-Paraffins</i>	2014	<b>Conversión microbiana de azúcares en hidrocarburos:</b> caña de azúcar, mandioca, sorgo y maíz	Hasta 10%
4	D7566 Anexo 4	<b>FT-SPK/A</b> <i>Fischer-Tropsch - Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics</i>	2015	<b>Biomasa lignocelulósica:</b> Residuos agrícolas y forestales (bagazo y rastrojo de caña de azúcar, y desechos municipales)	Hasta 50%
5	D7566 Anexo 5	<b>ATJ-SPK</b> <i>Alcohol to jet - Synthetic Paraffinic Kerosene</i> Isobutanol / Etanol	2016 2018	<b>Biomasa utilizada para la producción de azúcar y biomasa lignocelulósica:</b> Caña de azúcar, mandioca, sargo, maíz, etanol	Hasta 50%
6	D7566 Anexo 6	<b>CHJ</b> <i>Catalytic hydrothermolysis jet fuel</i>	2020	<b>Materia prima basada en triglicéridos:</b> residuos, algas, soja, Jatropha, camelina y carinata	Hasta 50%
7	D7566 Anexo 7	<b>HC-HEFA-SPK</b> <i>Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene</i>	2020	Hidrocarburos de origen biológico, ésteres de ácidos grasos, tri-terpenos producidos por la especie de alga Botryococcus braunii.	Hasta 10%
8	D7566 Anexo 8	<b>ATJ-SPK/A</b> <i>Alcohol to jet - Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics</i>	2020	Alcoholes C2-C5 provenientes de biomasa	Hasta 50%
9	D1655 Anexo 1	<b>Co-HEFA en refinería convencional de petróleo</b> <i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids - Synthetic Paraffinic Kerosene</i>	2021	<b>Aceites y Grasas:</b> Aceites vegetales, grasas animales y aceites de cocina usados procesados junto con petróleo	Hasta 5%
10	D1655 Anexo 1	<b>FT Coprocesado en refinería convencional de petróleo</b> <i>Fischer-Tropsch</i>	2021	<b>Biomasa lignocelulósica:</b> Residuos agrícolas y forestales (bagazo y rastrojo de caña de azúcar, con petróleo)	Hasta 5%
11	D1655 Anexo 1	<b>HEFA Coprocesado</b> <i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids -</i>	2021	<b>Aceites y grasas:</b> Camelina, Jatropha, aceites de ricino, de palma y de cocina usado y grasa animal	Hasta 10%

Fuente: Elaboración propia en base a ICAO

## B. Síntesis de Procesos



Fuente: (Cabrera & Melo de Sousa, 2022)

## C. Macos Normativos en ALC

País	Etanol (Mezcla)	Biodiésel (Mezcla)	Marco Regulatorio
<b>Argentina</b>	E12 (12%)	B5 (5%)	La Ley N° 27.640/2021 establece el régimen de promoción de los biocombustibles, fijando un corte obligatorio del 5% para el biodiésel y del 12% para el bioetanol. Sin embargo, los porcentajes de mezcla han variado con el tiempo, dado que los valores pueden ser modificados por el Poder Ejecutivo según las condiciones del mercado.
<b>Bolivia</b>	E25 (25%)	B25 (25%)	El Decreto Supremo N° 5135 (marzo 2024) elevó el corte de bioetanol y biodiésel al 25%.
<b>Brasil</b>	E27 (27%)	~B13 (alrededor del 12%)	Brasil cuenta con uno de los programas de biocombustibles más avanzados del mundo. El mandato de etanol se estableció mediante la Ley N° 8.723/1993, y el de biodiésel a través de la Ley N° 11.097/2005. Los porcentajes de mezcla son ajustados periódicamente por el Consejo Nacional de Política Energética (CNPE).
<b>Chile</b>	No especificado (uso promovido, sin mandato)	B5 (5%)	La Ley N° 20.257/2008 establece las bases para la promoción de energías renovables no convencionales, incluyendo biocombustibles, sin un mandato específico para el etanol. Se promueve el biodiésel con un corte del 5%.
<b>Colombia</b>	E10 (10%)	B10 (10%)	Los marcos normativos del Ministerio de Minas y Energía han promovido la producción de biocombustibles, con porcentajes establecidos mediante resoluciones que han variado según las condiciones de mercado y disponibilidad de materias primas.
<b>Costa Rica</b>	E7 (7%)	No específico	El Decreto Ejecutivo N° 36.447-MINAE, que establece la Política Nacional de Biocombustibles, promueve el uso de biodiésel, aunque no existe un mandato específico para su mezcla.
<b>Ecuador</b>	E5 (5%)	B5 (5%)	La Ley de Fomento y Desarrollo de la Producción de Biocombustibles sienta las bases para la promoción de estos combustibles. Para el etanol no existe un mandato obligatorio, pero la gasolina comercializada (ECOPAÍS E) se produce con corte; para el biodiésel, existe un mandato del 5% (aún pendiente de operativización).
<b>El Salvador</b>	E10 (10%)	No específico	La Ley de Promoción y Fomento de los Biocombustibles de 2011 establece el uso obligatorio de etanol en las gasolinas.
<b>Guatemala</b>	E5 (5%)	No específico	La Ley de Promoción de los Biocombustibles de 2008, junto con el Reglamento General de la Ley de Alcohol Carburante AG-159-2023, establece una obligación de uso mínimo de etanol del 5% en gasolinas a partir del 1 de enero de 2025.
<b>Jamaica</b>	E10 (10%)	No específico	El Programa Nacional de Etanol, implementado en 2008, establece el uso obligatorio de E10 en el país.
<b>México</b>	E10 (en algunos estados)	No específico	La Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos de 2008 establece las bases para el uso de biocombustibles; a nivel federal no existe un mandato obligatorio, pero en algunos estados se utiliza E10.

<b>Panamá</b>	E5 (5%)	No específico	La Ley N° 42/2011 establece el uso obligatorio de etanol en las gasolinas. Se promueve el uso de biodiésel, pero sin un mandato específico.
<b>Paraguay</b>	E30 (30%)	B5 (5%)	La Ley N° 2748/2005 establece el uso obligatorio de biocombustibles, y los porcentajes de mezcla son definidos por el Poder Ejecutivo.
<b>Perú</b>	E7.8 (7.8%)	B5 (5%)	La Ley N° 28054/2003 promueve el mercado de biocombustibles y establece los porcentajes de mezcla obligatoria.
<b>República Dominicana</b>	E15 (15%)	No específico	La Ley N° 57-07 sobre Incentivo al Desarrollo de Fuentes Renovables de Energía y de sus Regímenes Especiales establece el uso obligatorio de etanol en las gasolinas.
<b>Uruguay</b>	E8,5 (8,5%)	0%	La Ley N° 18.195/2007 establecía el régimen de promoción de agrocombustibles; sin embargo, en 2022 el mandato de biodiésel fue derogado, manteniéndose únicamente un corte para etanol.

*Fuente: Elaboración propia*

## REFERENCIAS

- Cabrera, E., & Melo de Sousa, J. (2022). *Use of Sustainable Fuels in Aviation - A Review*. doi:<https://doi.org/10.3390/en15072440>
- IATA. (2022). *Resolution A41-21: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to*. Retrieved from [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution\\_A41-21\\_Climate\\_change.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution_A41-21_Climate_change.pdf)
- IEA (2024). Carbon Accounting for Sustainable Biofuels from <https://www.iea.org/reports/carbon-accounting-for-sustainable-biofuels>
- IEA Bioenergy (2024). *Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and policies*. from <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>
- IICA. (2024). *Atlas de los biocombustibles líquidos 2023-2024/ Agustín Torroba y Anabel Chiara*
- NMSC. (2024). *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Market*. Next Move Strategy Consulting. Retrieved from <https://www.nextmsc.com/report/hydrotreated-vegetable-oil-market>
- OLADE. (2024). *Panorama Energético*. Retrieved from <https://www.olade.org/publicaciones/panorama-energetico-de-america-latina-y-el-caribe-2024/>
- Torroba, A. (2023). *Descarbonizando los cielos: biocombustibles sostenibles de aviación*. IICA. Retrieved from <https://repositorio.iica.int/handle/11324/21441?show=full>